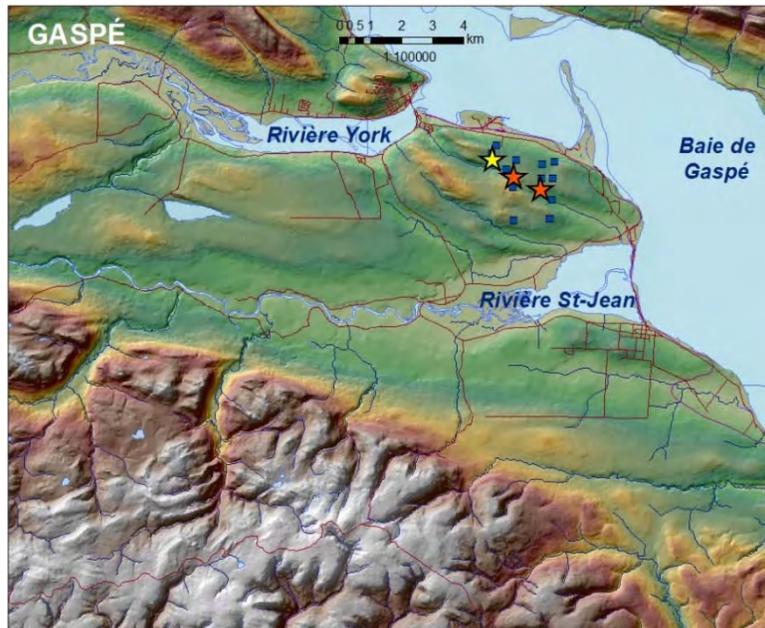


RAPPORT FINAL – VERSION FINALE

(Version du texte après révision linguistique)

Caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand

Mélanie Raynauld, Morgan Peel, René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad et Erwan Gloaguen



RAPPORT FINAL – VERSION FINALE

(Version du texte après révision linguistique)

Caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand

Mélanie Raynauld¹, Morgan Peel¹, René Lefebvre¹, Heather Crow²,
John Molson³, Jason Ahad² et Erwan Gloaguen¹

1 : INRS; 2 : Commission géologique du Canada; 3 : Université Laval

Travaux réalisés pour le ministère du Développement durable,
de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec

Rapport soumis à
Michel Ouellet, ing., M.Sc.
Chef de la division des eaux souterraines
Service de l'aménagement et des eaux souterraines
Direction des politiques de l'eau

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Rapport de recherche R-1497

Mai 2014

Résumé

Le présent rapport fait état des résultats de l'étude hydrogéologique du secteur Haldimand, à Gaspé, réalisée pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). Cette étude avait pour but d'évaluer le risque pour la qualité de l'eau souterraine des activités d'exploration pétrolière dans le secteur Haldimand, particulièrement par rapport à l'éventuel forage exploratoire Haldimand n° 4. La réalisation de l'étude est basée sur 1) des données existantes compilées de sources publiques, tels des rapports et la base de données du ministère des Ressources naturelles (MRN), ainsi que des rapports internes mis à la disposition de l'INRS par Pétrolia; 2) des puits d'observation et des données découlant d'une étude hydrogéologique réalisée entre 2011 et 2012 par la firme TechnoRem mandatée par Pétrolia; 3) des analyses chimiques spécialisées réalisées par la Commission géologique du Canada (CGC) sur des composés organiques dans l'eau souterraine et dans les suintements pétroliers, ainsi que des analyses isotopiques de l'eau souterraine à partir d'échantillons prélevés par TechnoRem en 2012; 4) des diagraphies réalisées par la CGC dans les puits d'observation en 2012; 5) des analyses chimiques détaillées d'échantillons d'eau prélevés lors de la caractérisation du MDDEFP à la fin de l'été et à l'automne 2013. Les analyses chimiques des échantillons prélevés par le MDDEFP incluent tous les paramètres prévus dans le projet de règlement du MDDEFP de mai 2013 (Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection) ainsi que des analyses plus spécialisées. Les travaux réalisés ont permis de définir les conditions hydrogéologiques, résumées sous la forme d'un modèle conceptuel hydrogéologique qui a servi de base au développement d'un modèle numérique de l'écoulement à densité variable le long d'une ligne d'écoulement.

Sur le plan des matériaux, le roc poreux et fracturé joue le rôle d'aquifère régional. Le roc est recouvert d'épaisseurs variables de till peu perméable, agissant comme un aquitard. La fracturation naturelle du roc et sa perméabilité, sont contrôlées par la profondeur sous la surface du roc. Le roc est plus fracturé dans les 20 premiers mètres de sa partie supérieure. L'écoulement de l'eau souterraine se fait des hauts topographiques, qui sont des zones de recharge préférentielle, vers les cours d'eau et la périphérie de la péninsule. L'eau souterraine du secteur Haldimand est généralement de très bonne qualité et très peu de dépassements de critères de santé ou esthétiques ont été observés dans les puits résidentiels ou d'observation. Il y a cependant une grande variabilité dans la géochimie de l'eau souterraine. Même si des suintements d'hydrocarbures sont présents à trois endroits à la surface de la région d'étude, on retrouve de très faibles concentrations d'hydrocarbures ou d'acides organiques dissous dans l'eau souterraine. En revanche, du méthane se retrouve dans l'eau souterraine qui est à la fois de type biogénique et de type thermogénique, vraisemblablement d'origine naturelle. Cependant, la présence d'hydrocarbures et les pressions élevées dans le réservoir indiquent son isolement hydraulique des unités sus-jacentes. L'eau des puits d'approvisionnement de la ville de Gaspé au sud de la rivière St-Jean a une géochimie distincte des eaux retrouvées dans la péninsule d'Haldimand. La modélisation numérique montre que la zone d'écoulement actif dans le secteur Haldimand est assez peu profonde. La modélisation montre aussi que les patrons d'écoulement peuvent apporter des eaux évoluées ayant de longs temps de résidence (excédant un million

d'années) de la profondeur vers les exutoires du système d'écoulement, particulièrement la rivière St-Jean. Selon le modèle, on retrouverait sous la péninsule d'Haldimand des eaux à long temps de résidence (1 000 à 10 000 ans) à de relativement faibles profondeurs, ce qui expliquerait l'observation des eaux plus évoluées dont la répartition pourrait être influencée par un patron complexe de fracturation près de la surface du roc.

Sur la base de notre compréhension du système hydrogéologique, nous avons fait une évaluation du risque environnemental de dégradation de la qualité de l'eau souterraine par rapport aux activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures dans le secteur Haldimand. Cette évaluation tient compte de trois aspects de la question : 1) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport au projet de règlement du MDDEFP (2013) visant l'encadrement des activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures; 2) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport aux mécanismes de contamination potentielle de l'eau souterraine qui pourraient résulter des opérations pétrolières; 3) les incidences que pourrait avoir l'émission de contaminants à Haldimand par ces mécanismes de contamination potentielle. Toutes les conditions présentes dans le secteur Haldimand par rapport à l'éventuel forage Haldimand n° 4 satisfont aux exigences du projet de règlement du MDDEFP (2013). C'est cependant le MDDEFP lui-même qui a pris la responsabilité de réaliser une caractérisation hydrogéologique conforme aux exigences du projet de règlement. Les exigences du projet de règlement par rapport à la mise en place d'un réseau de puits d'observation étaient déjà respectées dans le cadre des travaux réalisés antérieurement par TechnoRem (2013) pour Pétrolia. Les mécanismes potentiels d'émission des contaminants dans l'eau souterraine par des activités d'exploration ou de production d'hydrocarbures que nous avons considérés incluent les épanchements de liquide en surface, les fuites à travers la cimentation ou les coffrages et la migration des fluides à partir des niveaux exploités jusqu'aux aquifères par des cheminements préférentiels naturels (failles) ou les puits pétroliers (anciens ou actifs). Les épanchements de liquide en surface sont les plus susceptibles de se produire et la vulnérabilité moyenne à très élevée de l'aquifère au roc fait en sorte que ces épanchements pourraient avoir une incidence directe sur la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Considérant la localisation du site du forage Haldimand n° 4, c'est le ruisseau Dean qui serait le milieu récepteur susceptible d'être affecté par ce mécanisme d'émission. Des mesures de protection de l'aquifère au roc, telle la mise en place d'une membrane sous le site de forage, permettraient de limiter le risque de contamination de l'aquifère au roc. Une gestion rigoureuse des opérations de transport, de transfert et d'entreposage des fluides contribuerait aussi à la réduction du risque de contamination. Les puits résidentiels entourant la péninsule d'Haldimand de même que les puits municipaux situés au sud de la rivière St-Jean ne représentent pas des milieux récepteurs potentiels d'émissions qui se produiraient aux sites Haldimand n° 1, n° 2 et n° 4. Les autres mécanismes potentiels d'émission de contaminants par les opérations pétrolières ont moins de probabilité de se produire et ont des incidences moindres sur la qualité de l'eau souterraine. Quel que soit le mécanisme d'émission considéré, si les émissions sont constituées de pétrole provenant du réservoir pétrolier ou de gaz purement thermogénique, la signature chimique de ces hydrocarbures pourra être distinguée de celle des suintements pétroliers et du méthane présent naturellement à Haldimand.

Sommaire vulgarisé

Ce sommaire décrit les résultats de l'étude hydrogéologique du secteur Haldimand, à Gaspé ([carte 1](#)), réalisée pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) du Québec. Cette étude avait pour but d'établir le contexte hydrogéologique du secteur Haldimand, de manière à évaluer le risque pour la qualité de l'eau souterraine des activités d'exploration pétrolière dans ce secteur, particulièrement par rapport à l'éventuel forage Haldimand n° 4. Les travaux réalisés à l'aide des données existantes et des nouvelles données acquises dans le cadre de ce projet ont permis d'acquérir une bonne compréhension du système d'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur Haldimand. Cette compréhension forme la base d'un modèle conceptuel hydrogéologique qui a servi au développement d'un modèle numérique qui apporte une compréhension quantitative, mais générale, du système d'écoulement. Le risque environnemental pour la qualité de l'eau souterraine a ensuite été évalué par rapport 1) au cadre prévu par le projet de règlement déposé par le MDDEFP en mai 2013; 2) aux mécanismes potentiels d'émission de contaminants par les activités pétrolières pour les conditions propres au secteur Haldimand; et 3) à l'incidence de ces émissions potentielles de contaminants dans le secteur Haldimand.

L'étude a été basée sur plusieurs sources d'information : 1) des données existantes compilées de sources publiques, tels des rapports et la base de données du ministère des Ressources naturelles (MRN), ainsi que de rapports internes mis à la disposition de l'INRS par Pétrolia; 2) des puits d'observation et des données découlant d'une étude hydrogéologique réalisée entre 2011 et 2012 par la firme TechnoRem mandatée par Pétrolia ([carte 4](#), [section 2.1](#) et [annexes 3 et 4](#)); 3) des analyses chimiques spécialisées réalisées par la Commission géologique du Canada (CGC) sur des composés organiques dans l'eau souterraine et dans les suintements pétroliers ([annexe 4](#)); 4) des diagraphies réalisées par la CGC dans les puits d'observation en 2012 et qui ont été faites à l'aide de sondes descendues dans les puits pour mesurer les propriétés de l'aquifère et de l'eau souterraine ([annexe 4](#)); 5) des analyses chimiques détaillées d'échantillons d'eau souterraine prélevés dans des puits résidentiels, dans un rayon de deux kilomètres du site du forage Haldimand n° 4, et dans des puits d'observation lors de la caractérisation du MDDEFP à la fin de l'été et à l'automne 2013 ([carte 5](#), [section 2.2](#) et [annexes 1 et 2](#)). Les analyses chimiques des échantillons prélevés par le MDDEFP incluent tous les paramètres prévus dans le projet de règlement du MDDEFP de mai 2013 ([annexe 4](#)). À l'exception du méthane, aussi analysé par la CGC, ces analyses ont été réalisées dans les laboratoires du MDDEFP. D'autres analyses plus spécialisées et non prévues dans le projet de règlement ont été faites dans différents laboratoires : analyses isotopiques de l'eau à l'Université de Waterloo (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C et ^{13}C), analyses isotopiques du méthane à l'Université d'Ottawa et analyses des gaz nobles et des CFC et du SF_6 à l'Université de Rennes ([protocoles à l'annexe 1](#)).

Le secteur Haldimand couvre environ 50 km^2 et forme une péninsule dans la baie de Gaspé, entre la rivière York, au nord-ouest, et la rivière St-Jean, au sud. Le secteur est en majorité boisé ([carte 12](#)), avec des résidences au pourtour le long de la route 132 (montée de Sandy Beach, au nord, et route Haldimand, au sud) et du boulevard de York Sud, à l'ouest. Des chemins privés gravelés pénètrent dans la péninsule. Le

pourtour de la péninsule est au niveau moyen de la mer (NMM) et trois crêtes d'orientation nord-ouest/sud-est atteignent plus de 100 m par rapport au NMM (maximum à 200 m du NMM). En plus des cours d'eau majeurs au nord-ouest et au sud, quatre ruisseaux encaissés découpent la péninsule (Kennedy, Aug, Dean et N° 02M60000) [carte 5]. Le réseau d'aqueduc municipal étant restreint à la partie nord-ouest du secteur Haldimand (carte 5), les résidences au pourtour de la péninsule utilisent généralement des puits pour assurer leur approvisionnement en eau. Ces puits sont presque tous forés au roc et ont une profondeur moyenne de 22 m (max. de 65 m).

Les conditions géologiques du secteur Haldimand peuvent être définies à partir de travaux antérieurs (section 1.3). Le roc est constitué de grès et de mudstone qui représentent respectivement des sables et des boues consolidés. Dans le secteur Haldimand, ces roches sont relativement peu déformées, mais elles sont bordées par deux failles régionales : la faille Haldimand et la faille du Bras Nord-Ouest (section 1.3.2 et carte 3). Le roc est poreux et fracturé et joue le rôle d'aquifère régional, c'est-à-dire qu'il est possible d'exploiter l'eau souterraine à partir de puits forés dans le roc. Le roc est recouvert par des épaisseurs variables de dépôts d'origine glaciaire (section 1.3.1 et carte 2), généralement entre 0 et 7 m (section 3.4.1 et carte 6). Ces dépôts sont constitués surtout de till glaciaire, un mélange de sédiments de dimensions variables.

Les conditions hydrogéologiques contrôlant la circulation de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux fracturé du secteur Haldimand ont été définies sur la base de différents travaux (chapitre 3). Les mesures faites avec des sondes dans les puits d'observation (diagraphies) ont permis de distinguer certaines subdivisions dans les types de roches composant l'aquifère au roc (section 3.1). Ces mesures ont aussi permis de déceler la présence de fractures dans le roc. L'intensité de ces fractures contrôle la perméabilité du roc, c'est-à-dire la facilité avec laquelle l'eau souterraine y circule. La fracturation du roc et sa perméabilité varient selon la profondeur sous la surface du roc (section 3.2). Le roc est ainsi plus fracturé, et parfois altéré, dans les 20 premiers mètres de sa partie supérieure où on y retrouve plus de fractures ouvertes permettant la circulation de l'eau souterraine. Cependant, l'intensité de la fracturation diminue rapidement jusqu'à environ 40 m, la profondeur maximale à laquelle les puits d'observation ont été forés. Il est donc plus facile pour l'eau souterraine de circuler dans la partie supérieure de l'aquifère au roc qu'en profondeur.

Des cartes et coupes hydrogéologiques définissent les conditions d'écoulement de l'eau souterraine dans le secteur Haldimand (section 3.4). Une carte de l'épaisseur des dépôts meubles qui recouvrent le roc (carte 6) a permis de définir aussi la topographie de la surface du roc (carte 8). Les dépôts meubles sont surtout constitués de till, qui est un matériau compact et peu perméable. La présence de till épais (plus de 2 m) sur l'aquifère au roc limite sa recharge, c'est-à-dire la proportion de l'eau provenant des précipitations qui contribue au renouvellement de l'eau de l'aquifère. Par contre, ce till épais protège l'aquifère au roc et le rend moins vulnérable à la contamination découlant d'activités qui pourraient émettre des contaminants à la surface du sol (carte 31). Enfin, la présence de till peut garder l'eau souterraine présente dans l'aquifère au roc sous pression, ce qu'on appelle des conditions « confinées » (carte 11). La carte dite « piézométrique » représente l'élévation du niveau de l'eau souterraine (carte 9). L'écoulement de l'eau souterraine se fait à partir des endroits où le niveau d'eau est

élevé vers ceux où le niveau est faible. Les fortes élévations du niveau d'eau souterraine correspondent aux hauts topographiques qui ne sont pas recouverts de till et représentent des zones de recharge préférentielle de l'aquifère au roc. En dehors des hauts topographiques, la couverture de till limite la recharge, ce qui implique aussi une réduction de la vulnérabilité. L'écoulement de l'eau souterraine dépend ainsi de la topographie ([cartes 5 et 8](#)) et se fait des hauts topographiques vers les cours d'eau et la périphérie de la péninsule. Les lignes de partage des eaux souterraines correspondent aux limites de sous-bassins versants des cours d'eau, délimitant où l'eau souterraine peut s'écouler et où pourraient migrer des contaminants dissous dans l'eau souterraine ([carte 9](#)). Les cours d'eau semblent au moins partiellement reliés à l'aquifère, car ils agissent comme des drains. Cependant, la présence d'une épaisseur importante de till sous certains segments de cours d'eau fait que ce lien n'est pas nécessairement direct et continu, dans le temps ou l'espace ([cartes 6 et 11](#)).

Les enregistrements de la variation dans le temps des niveaux d'eau dans les puits d'observation sont appelés des hydrogrammes. Leur interprétation a permis d'évaluer la recharge dans les zones préférentielles de recharge sur les hauts topographiques ([section 3.6.1](#)). La recharge a aussi été évaluée sur l'ensemble du secteur Haldimand à l'aide d'un bilan d'eau qui implique l'estimation de la répartition des précipitations entre le ruissellement de surface, l'évapotranspiration et l'eau qui s'infiltre dans le sol pour recharger l'aquifère ([section 3.6.2](#)). L'établissement de ce bilan a nécessité la cartographie de l'utilisation du territoire ([carte 12](#)), de la pente de la surface du sol ([carte 13](#)) et des groupes hydrologiques ([carte 14](#)) qui contrôlent l'importance du ruissellement ([carte 15](#)), pour enfin produire une carte de la recharge ([carte 16](#)). La vulnérabilité de l'aquifère au roc a été évaluée avec la méthode DRASTIC, qui utilise une combinaison pondérée de sept indicateurs correspondants aux lettres de l'acronyme du nom de la méthode : profondeur à la nappe (*Depth*; [carte 17](#)), recharge ([carte 19](#)), type d'aquifère ([carte 21](#)), type de sol ([carte 23](#)), pente de la surface du sol (*Topography*; [carte 25](#)), influence de la zone non saturée ([carte 27](#)) et conductivité hydraulique ([carte 29](#)). L'indice DRASTIC ([carte 31](#)) montre que la vulnérabilité de l'aquifère au roc va de moyenne à très élevée dans le secteur Haldimand, ce qui signifie que des émissions de contaminants en surface sont susceptibles de mener à une contamination de l'eau souterraine dans l'aquifère au roc.

La composition chimique de l'eau souterraine nous apprend beaucoup, non seulement sur la qualité de l'eau, mais aussi sur son évolution chimique, ce qui nous donne des indications sur le fonctionnement du système aquifère ([chapitre 4](#)). Les paramètres chimiques de l'eau souterraine obtenus de son analyse ont été utilisés pour classer l'eau souterraine en deux groupes de types d'eau ayant des compositions chimiques distinctes ([section 4.2](#)). Cette classification a permis de reconnaître un groupe de quatre types d'eau représentant des eaux souterraines peu « évoluées » et typiques des zones de recharge (cation majeur Ca^{2+} et anion majeur HCO_3^-). Un autre groupe comprend aussi quatre types d'eau qui ont des compositions plus « évoluées » (cation majeur Na^+ et anion majeur HCO_3^- ou Cl^-), mais tout de même avec une teneur en solides dissous modérée (concentration moyenne de moins de 400 mg/L). L'eau des puits d'observation et d'approvisionnement de la ville de Gaspé au sud de la rivière St-Jean a une géochimie distincte des eaux retrouvées dans la péninsule d'Haldimand. Il y a ainsi une grande variabilité dans la géochimie de l'eau souterraine et la répartition spatiale des

différents types d'eau est complexe ([carte 33](#)). Ceci pourrait indiquer que la fracturation naturelle joue un rôle dans la répartition des apports d'eau évoluée dans la zone active d'écoulement et qu'il y a des apports d'eau évoluée ayant un long temps de résidence vers la surface et certains cheminements préférentiels d'écoulement. Les analyses isotopiques montrent que l'eau souterraine provient des précipitations, qu'il y a une proportion d'eau jeune, et donc de la recharge, presque partout, mais qu'on peut aussi retrouver des eaux avec de longs temps de résidence de quelques milliers d'années. Ces temps de résidence de l'eau souterraine sont suffisamment longs pour permettre l'évolution géochimique de l'eau observée dans le secteur Haldimand, mais signifient aussi qu'il y a des apports d'eau évoluée dans l'aquifère de surface. Globalement, sur la base des analyses du MDDEFP, l'eau souterraine peut être considérée de très bonne qualité : seulement quatre puits résidentiels et quatre puits d'observation présentent des concentrations en métaux qui dépassent les normes de potabilité.

Des composés et des acides organiques ont été détectés dans les échantillons d'eau souterraine, mais tous à des concentrations sous les normes ou critères esthétiques. Ainsi, même si des suintements d'hydrocarbures sont présents à trois endroits à la surface de la région d'étude, on retrouve de très faibles concentrations d'hydrocarbures ou d'acides organiques dissous dans l'eau souterraine. Pour ce qui est des concentrations en méthane, trois puits résidentiels et sept puits d'observation dépassent le seuil d'alerte du méthane de 7 mg/L. Les plus fortes concentrations en méthane sont associées aux eaux plus évoluées. Le méthane est d'origine naturelle mixte, biogénique et thermogénique, ce qui signifie qu'il y a une production directement dans la partie supérieure de l'aquifère lui-même et un certain apport de gaz d'origine plus profonde. Seul le méthane à PH-01 près du puits Haldimand n° 1 est clairement thermogénique, mais il pourrait être d'origine peu profonde. Le méthane ne représente pas un problème de qualité d'eau, mais il pose un problème de sécurité et son accumulation dans la tuyauterie doit être évitée. Les propriétaires des puits résidentiels avec des concentrations en méthane excédant 7 mg/L ont été avisés de cette situation et des mesures à prendre. La composition de l'huile aux suintements d'hydrocarbures a été analysée ([carte 5](#)). Les hydrocarbures dans le suintement S1, présent en bordure du ruisseau Dean, sont très dégradés. Toutefois, les hydrocarbures dans le suintement POT2, retrouvé au sud-ouest de la rue Forest, sont beaucoup moins dégradés. La composition des hydrocarbures du suintement S1 laisse supposer une mise en place à une époque reculée, tandis que la signature du suintement POT2 témoigne de la présence d'huile plus « fraîche ». Le suintement S1 semble ainsi inactif et ne représente pas un apport actif d'huile à partir de la profondeur. Il est cependant impossible de déterminer la source et l'activité du suintement POT2 à cause de la présence d'un ancien puits pétrolier associé au suintement. Les travaux réalisés lors de la présente étude n'ont pas permis de déterminer si le puits pétrolier a été foré dans un suintement actif ou si ce puits est lui-même en partie responsable du suintement.

Un modèle numérique en deux dimensions a été développé pour représenter le système d'écoulement du secteur Haldimand. Afin de considérer l'effet de l'écoulement régional, le modèle représente une coupe verticale allant des hauts topographiques au sud d'Haldimand jusqu'à la baie de Gaspé, sur environ 13 km de longueur et 1 km de profondeur ([chapitre 5 et carte 35](#)). La géométrie de l'aquifère (topographie de la surface), les propriétés des matériaux, la présence d'eau ayant des salinités différentes

(eau douce, eau marine et eau de formation) et les conditions de recharge et de résurgence de l'eau souterraine sont considérées par ce modèle. À partir de ces conditions, le modèle permet de représenter l'écoulement de l'eau souterraine, le transport des composés dissous naturellement dans l'eau souterraine et le temps de résidence (âge) de l'eau souterraine qui circule dans le système d'écoulement. La modélisation numérique montre que la zone active d'écoulement dans le secteur Haldimand serait assez peu profonde, allant jusqu'à environ 120 m sous le NMM. De l'eau douce pourrait se trouver jusqu'à environ 200 m sous le NMM. Cependant, le modèle a utilisé des conditions telles que la zone active et l'intervalle contenant de l'eau douce sont jugés d'épaisseur maximale par rapport aux conditions réelles. La modélisation montre un apport d'eau souterraine à partir des hautes terres situées au sud de la rivière St-Jean, laquelle est un exutoire important, mais une partie de l'eau poursuit son écoulement jusque sous Haldimand, jusqu'au nord de la péninsule. La modélisation montre aussi que les patrons d'écoulement peuvent apporter des eaux évoluées ayant de longs temps de résidence (excédant un million d'années) de la profondeur vers les exutoires du système d'écoulement, surtout la rivière St-Jean. Sous la péninsule d'Haldimand, on retrouverait des eaux à long temps de résidence (1 000 à 10 000 ans) à de relativement faibles profondeurs, ce qui expliquerait l'observation des eaux souterraines plus évoluées dont la répartition pourrait être influencée par un patron complexe de fracturation près de la surface du roc.

Le degré d'isolement du réservoir pétrolier par rapport à l'aquifère au roc peut être évalué à partir de différentes observations. D'abord, le réseau de fractures naturelles du roc observé près de la surface est différent de celui observé en profondeur où l'intensité de la fracturation est relativement faible ([section 3.2](#)). Le réseau de fractures naturelles du roc ne devrait donc pas permettre une communication entre la profondeur et l'aquifère au roc près de la surface. Ensuite, une estimation de la pression de l'eau de la surface jusqu'au niveau du réservoir a été comparée aux pressions mesurées dans le réservoir pétrolier ([section 3.8](#)). Les pressions dans le réservoir sont beaucoup plus élevées que celles qui seraient obtenues si l'eau était en continuité, ce qui indique que la roche couverture du réservoir isole efficacement les hydrocarbures du réservoir des unités sus-jacentes et empêche leur migration. Enfin, les très faibles concentrations en hydrocarbures dissous et en acides organiques dans l'eau souterraine ([section 4.5](#)) ainsi que l'origine biogénique prédominante du méthane ([section 4.4](#)) ne donnent pas d'indication d'apport important de fluides profonds dans l'aquifère au roc superficiel.

Sur la base de notre compréhension du système hydrogéologique, nous avons fait une évaluation du risque environnemental de dégradation de la qualité de l'eau souterraine par rapport aux activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures dans le secteur Haldimand ([chapitre 6](#)). Considérant les conditions rencontrées à Haldimand ([section 6.1 et tableau 6-1](#)), cette évaluation tient compte de trois aspects de la question : 1) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport au projet de règlement du MDDEFP (2013) visant l'encadrement des activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures ([section 6.2.1 et tableau 6-2](#)); 2) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport aux mécanismes de contamination potentielle de l'eau souterraine qui pourraient résulter des opérations pétrolières ([section 6.2.2 et tableau 6-3](#)); et 3) les incidences que pourrait avoir l'émission de contaminants à Haldimand par ces mécanismes de contamination potentielle ([section 6.2.3](#)). Toutes les

conditions présentes dans le secteur Haldimand par rapport à l'éventuel forage Haldimand n° 4 satisfont aux exigences du projet de règlement du MDDEFP (2013) [tableau 6-2]. C'est cependant le MDDEFP lui-même qui a pris la responsabilité de réaliser une caractérisation hydrogéologique conforme aux exigences du projet de règlement. Les exigences du projet de règlement par rapport à la mise en place d'un réseau de puits d'observation étaient déjà respectées dans le cadre des travaux réalisés antérieurement par TechnoRem (2013) pour Pétrolia (section 6.3).

Les mécanismes potentiels d'émission des contaminants dans l'eau souterraine par des opérations pétrolières que nous avons considérés incluent les épanchements de liquide en surface, les fuites à travers la cimentation ou les coffrages des puits pétroliers et la migration des fluides à partir des niveaux exploités jusqu'aux aquifères par des cheminements préférentiels naturels (failles) ou des puits pétroliers (anciens ou actifs) [section 6.2.2 et tableau 6-3]. En tant que mode potentiel d'émission de contaminants, les épanchements de liquide en surface sont les plus susceptibles de se produire. La vulnérabilité moyenne à très élevée de l'aquifère au roc fait en sorte que ces épanchements pourraient avoir une incidence directe sur la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Sans mesures de prévention ou de mitigation, ce mécanisme d'émission pourrait être à l'origine de zones sources de contamination qui pourraient agir à moyen ou long terme (au-delà d'une décennie), particulièrement si le liquide émis est un contaminant organique immiscible comme du pétrole. Considérant la localisation du site du forage Haldimand n° 4, c'est le ruisseau Dean qui serait le milieu récepteur susceptible d'être affecté par ce mécanisme d'émission. Cependant, la migration de contaminants dissous serait retardée par leur diffusion dans la matrice poreuse de l'aquifère au roc ainsi que par la présence de till d'une épaisseur variant entre 2 et 4 m sous le ruisseau Dean. De plus, des mesures de protection de l'aquifère au roc, telle la mise en place d'une membrane sous le site de forage, permettraient de limiter le risque de contamination de l'aquifère au roc. Une gestion rigoureuse des opérations de transport, de transfert et d'entreposage des fluides contribuerait aussi à la réduction du risque de contamination. Aux sites Haldimand n° 1, n° 2 et n° 4, les puits résidentiels entourant la péninsule d'Haldimand de même que les puits municipaux situés au sud de la rivière St-Jean ne représentent pas des milieux récepteurs potentiels d'émissions qui se produiraient aux sites mêmes de ce forage ou de ces puits. Cependant, si des épanchements se produisaient sur les routes conduisant aux sites de forage, alors certains des puits résidentiels situés au nord de la péninsule pourraient constituer des milieux récepteurs de la contamination. Les autres mécanismes potentiels d'émission de contaminants par les opérations pétrolières ont moins de probabilité de se produire et ont des incidences moindres et non immédiates sur la qualité de l'eau souterraine. Cependant, le fait que certains anciens puits atteignent le réservoir pétrolier Haldimand devrait inciter à une vérification de la qualité des mesures d'abandon et de cimentation des anciens puits prises par le MRN.

Quel que soit le mécanisme d'émission considéré, si ces émissions sont constituées de pétrole provenant du réservoir pétrolier ou de gaz purement thermogénique, la signature chimique de ces hydrocarbures pourrait être distinguée de celle des suintements pétroliers et du méthane présent naturellement à Haldimand, de même que de celle des sources de contamination qui pourraient être reliées à des émissions d'essence ou de diesel non liées aux opérations pétrolières.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1. MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2. MANDAT ET OBJECTIFS.....	2
1.3. PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE.....	3
1.3.1. GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES.....	4
1.3.2. GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX.....	5
2. TRAVAUX DE CARACTÉRISATION.....	10
2.1. CARACTÉRISATION DE TECHNOREM EN 2011 ET 2012.....	10
2.1.1. INSTALLATION DE PUIITS D'OBSERVATION ET CAROTTAGE.....	10
2.1.2. ESSAIS HYDRAULIQUES ET PIÉZOMÉTRIE.....	10
2.1.3. ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSE DE L'EAU SOUTERRAINE.....	11
2.2. CARACTÉRISATION DU MDDEFP EN 2013.....	12
2.2.1. CONTEXTE DES TRAVAUX.....	12
2.2.2. TRAVAUX D'ÉCHANTILLONNAGE.....	12
2.2.3. PROGRAMME ANALYTIQUE.....	14
2.2.4. SUIVI À LONG TERME DE LA NAPPE.....	16
2.3. INTÉGRATION DES DONNÉES DANS UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG).....	16
3. CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES.....	21
3.1. UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES DÉFINIES PAR LES DIAGRAPHIES.....	21
3.1.1. LEVÉS RÉALISÉS PAR DIAGRAPHIE.....	21
3.1.2. UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET FRACTURATION NATURELLE.....	23
3.2. STRUCTURE ET FRACTURATION NATURELLE À HALDIMAND.....	24
3.2.1. SOURCES ET TRAITEMENT DES DONNÉES.....	24
3.2.2. CARACTÉRISTIQUES DES STRUCTURES ET FRACTURES.....	25
3.3. PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX.....	34
3.3.1. ESSAIS HYDRAULIQUES DANS LES PUIITS D'OBSERVATION.....	34
3.3.2. ESSAIS DE POROSITÉ ET PERMÉABILITÉ SUR DES CAROTTES.....	35
3.4. CARTES ET COUPES HYDROGÉOLOGIQUES.....	36
3.4.1. ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS QUATÉNAIRES ET TOPOGRAPHIE DU ROC.....	36
3.4.2. PIÉZOMÉTRIE ET CONDITIONS DE CONFINEMENT.....	37
3.4.3. COUPE HYDROGÉOLOGIQUE.....	38
3.5. SUIVI DE NAPPE.....	40
3.5.1. SUIVI DE NAPPE ET RELEVÉS DE NIVEAU D'EAU.....	40
3.5.2. HYDROGRAMMES DE PUIITS ET CONDITIONS DE RECHARGE ET CONFINEMENT.....	42

3.6. ÉVALUATION DE LA RECHARGE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX	48
3.6.1. INTERPRÉTATION D'UN HYDROGRAMME DE PUIITS EN ZONE DE RECHARGE	48
3.6.2. BILAN HYDROLOGIQUE SUR L'ENSEMBLE DE LA RÉGION D'ÉTUDE	50
3.7. VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES.....	51
3.7.1. DESCRIPTION ET APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC.....	51
3.7.2. CARTES INTERMÉDIAIRES	51
3.7.3. CARTES DE VULNÉRABILITÉ DRASTIC.....	55
3.8. PÉTROLE ET FLUIDES PROFONDS.....	57
3.8.1. PÉTROLE	57
3.8.2. INDICES DE FLUIDES DANS LES FORAGES PÉTROLIERS	60
3.8.3. PRESSIONS DES FLUIDES DANS LES FORAGES PÉTROLIERS.....	60
<u>4. GÉOCHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE.....</u>	<u>64</u>
4.1. VÉRIFICATION DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES DU MDDEFP.....	64
4.1.1. CALCUL DU BILAN IONIQUE ET COMPARAISON DES DUPLICATAS	64
4.1.2. COMPARAISON AVEC LES DONNÉES ANTÉRIEURES (TECHNOREM, 2013).....	65
4.2. IDENTIFICATION DES TYPES D'EAU SOUTERRAINE.....	66
4.2.1. PRINCIPES DE L'ANALYSE MULTIVARIÉE	66
4.2.2. APPLICATION DE L'ANALYSE MULTIVARIÉE	68
4.2.3. RÉSULTATS DE L'ANALYSE HIÉRARCHIQUE REGROUPEE (CLUSTERING).....	70
4.2.4. RÉSULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	76
4.3. PROVENANCE ET TEMPS DE RÉSIDENCE DES EAUX SOUTERRAINES.....	77
4.3.1. PROVENANCE DES EAUX SOUTERRAINES : ISOTOPES STABLES ET GAZ NOBLES.....	77
4.3.2. INDICATEURS DE TEMPS DE RÉSIDENCE.....	80
4.3.3. DISCUSSION ET IMPLICATIONS SUR LE SYSTÈME AQUIFÈRE	84
4.4. MÉTHANE ET GAZ ASSOCIÉS.....	85
4.4.1. MÉTHANE DANS LES ENVIRONNEMENTS NATURELS ET FORMATION DU MÉTHANE.....	85
4.4.2. CARACTÉRISTIQUES DES GAZ À HALDIMAND.....	88
4.4.3. ORIGINES DU MÉTHANE	90
4.4.4. RISQUES RELIÉS AU MÉTHANE	94
4.5. COMPOSÉS ORGANIQUES.....	94
4.5.1. ANALYSES CONVENTIONNELLES (MDDEFP)	94
4.5.2. COMPOSÉS ORGANIQUES ANALYSÉS PAR LA CGC.....	94
4.5.3. DISCUSSION SUR LES COMPOSÉS ORGANIQUES.....	95
4.6. QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE À HALDIMAND.....	95
4.6.1. DÉPASSEMENTS DE CRITÈRES DE QUALITÉ.....	95

4.6.2.	DISCUSSION DES DÉPASSEMENTS DE CRITÈRES DE QUALITÉ	96
5.	<u>MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE</u>	98
5.1.	DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE NUMÉRIQUE	98
5.1.1.	SUPPOSITIONS ET LIMITATIONS DE LA SIMULATION	98
5.1.2.	MAILLAGE ET CONDITIONS LIMITES	99
5.1.3.	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES	100
5.1.4.	PROPRIÉTÉS DU MODÈLE DE TRANSPORT	101
5.1.5.	DISTRIBUTION DE LA RECHARGE	102
5.1.6.	VÉRIFICATION DE LA DISCRÉTISATION.....	102
5.2.	CONDITIONS SIMULÉES.....	105
5.2.1.	ÉCOULEMENT DE L'EAU SOUTERRAINE	105
5.2.2.	TRANSPORT DE MASSE.....	106
5.2.3.	TEMPS DE RÉSIDENCE DE L'EAU SOUTERRAINE.....	107
5.2.4.	CONDITIONS PROPRES À HALDIMAND	108
5.2.5.	EFFET POTENTIEL DE FUITES DANS UN PUIS PÉTROLIER ET DE DISCONTINUITÉS	110
6.	<u>SYNTHÈSE ET ÉVALUATION DU RISQUE</u>	113
6.1.	MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE CONCEPTUEL DU SYSTÈME AQUIFÈRE.....	113
6.2.	RISQUE ENVIRONNEMENTAL PAR RAPPORT AUX ACTIVITÉS PÉTROLIÈRES	119
6.2.1.	CONDITIONS DU SITE PAR RAPPORT AU PROJET DE RÈGLEMENT	119
6.2.2.	CONDITIONS DU SITE PAR RAPPORT AUX MÉCANISMES DE CONTAMINATION	123
6.2.3.	INCIDENCE POTENTIELLE D'ÉMISSIONS DE CONTAMINANTS	129
6.3.	RÉSEAU DE SURVEILLANCE	130
7.	<u>CONCLUSIONS.....</u>	133
8.	<u>RÉFÉRENCES.....</u>	136
CARTES	145

ANNEXE 1 – PROTOCOLES (VERSION COMPLÈTE SUR CD)

ANNEXE 2 – RÉSULTATS DE MESURES OU D'ANALYSES

ANNEXE 3 – INFORMATIONS SUR LES PUIS D'OBSERVATION (VERSION COMPLÈTE SUR CD)

ANNEXE 4 – COMPILATION DE DOCUMENTS (VERSION COMPLÈTE SUR CD)

ANNEXE 5 – FICHIERS DE TRAVAIL (SUR CD)

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1	CARACTÉRISTIQUES DES PUIITS RÉSIDENTIELS ÉCHANTILLONNÉS LORS DE LA CAMPAGNE DU MDDEFP	4
TABLEAU 2-1	SOMMAIRE DES DONNÉES PUBLIQUES UTILISÉES	18
TABLEAU 2-2	SOMMAIRE DES DONNÉES VECTORIELLES PRODUITES	19
TABLEAU 2-3	SOMMAIRE DES DONNÉES MATRICIELLES PRODUITES	20
TABLEAU 3-1	DIAGRAPHIES RÉALISÉES DANS LES PUIITS D'HALDIMAND (D'APRÈS CROW ET AL., 2014)	22
TABLEAU 3-2	CLASSIFICATION DES STRUCTURES OBSERVÉES PAR <i>TELEVIEWER</i> (D'APRÈS CROW ET AL., 2014). 'F' (<i>FLOW</i>) INDIQUE QUE LA FRACTURE EST COULANTE ET 'NF' (<i>NO-FLOW</i>) INDIQUE QU'AUCUN DÉBIT N'A ÉTÉ MESURÉ À PARTIR DE LA FRACTURE.....	22
TABLEAU 3-3	ORIENTATIONS DES DIFFÉRENTES FAMILLES DE FRACTURES DÉFINIES À PARTIR DES RELEVÉS DE TERRAIN ET DES DIAGRAPHIES DANS LES PUIITS D'OBSERVATION	26
TABLEAU 3-4	ORIENTATIONS DES FAMILLES DE FRACTURES DU BATTERY POINT DÉFINIES À PARTIR DES DONNÉES DE FMI.....	32
TABLEAU 3-5	ORIENTATIONS DES FAMILLES DE FRACTURES DU YORK RIVER DÉFINIES À PARTIR DES DONNÉES DE FMI.....	32
TABLEAU 3-6	SUIVI LONG TERME POUR LES PUIITS D'OBSERVATION INSTRUMENTÉS (FÉVRIER 2012 À SEPTEMBRE 2013).....	41
TABLEAU 3-7	SONDES MISES EN PLACE EN SEPTEMBRE 2013.....	42
TABLEAU 3-8	RELEVÉS MANUELS DU NIVEAU D'EAU (EN MÈTRES) POUR LES PUIITS D'OBSERVATION	42
TABLEAU 3-9	CLASSEMENT DES PUIITS SELON LEURS CONDITIONS DE CONFINEMENT	47
TABLEAU 3-10	PARAMÈTRES D'AJUSTEMENT DU NIVEAU D'EAU CALCULÉ PAR BILAN QUOTIDIEN.....	49
TABLEAU 3-11	COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT POUR DES CONDITIONS HYDROLOGIQUES MOYENNES EN FONCTION DE L'UTILISATION DU SOL, DE LA PENTE ET DE LA CLASSE HYDROLOGIQUE. MODIFIÉ DE MONFET (1979) PAR CROTEAU (2006).....	51
TABLEAU 3-12	COTES ET POIDS DES PARAMÈTRES DE LA MÉTHODE DRASTIC (TRADUIT D'ALLER ET AL., 1987)	53
TABLEAU 3-13	ATTRIBUTION DES COTES DRASTIC POUR LE TYPE D'AQUIFÈRE POUR L'AQUIFÈRE GRANULAIRE.....	54
TABLEAU 3-14	ATTRIBUTION DES COTES DRASTIC POUR LE TYPE DE SOL	54
TABLEAU 3-15	ATTRIBUTION DES COTES DRASTIC POUR L'IMPACT DE LA ZONE VADOSE	55
TABLEAU 3-16	COORDONNÉES DES SUINTEMENTS ÉCHANTILLONNÉS.....	58
TABLEAU 3-17	COORDONNÉES DES ANCIENS FORAGES PÉTROLIERS.....	58
TABLEAU 3-18	SYNTHÈSE DES FLUIDES PROFONDS (DONNÉES TIRÉES DU SIGPEG)	60
TABLEAU 3-19	SOMMAIRE DES TESTS EFFECTUÉS ET DES PRESSIONS DE RÉSERVOIR DÉRIVÉES DANS LES PUIITS PÉTROLIA HALDIMAND N ^o 1 ET HALDIMAND N ^o 2. PT : TEST DE PRODUCTION; DFIT : TEST DIAGNOSTIQUE D'INJECTION EN FRACTURE (<i>DIAGNOSTIC FRACTURE INJECTION TEST</i>); DST : ESSAI EN BOUT DE TIGE (<i>DRILLSTEM TEST</i>) [PÉTROLIA, 2014].....	61

TABLEAU 3-20	CONCENTRATIONS EN SOLIDES DISSOUS TOTAUX (SDT) CALCULÉES À PARTIR DE LA SIMULATION D'ÉCOULEMENT À DENSITÉ VARIABLE (VOIR LA SECTION 5.2.2).....	62
TABLEAU 4-1	CORRECTIONS EFFECTUÉES SUR LES PARAMÈTRES AVANT L'ANALYSE MULTIVARIÉE AFIN D'APPROXIMER AU MIEUX UNE DISTRIBUTION NORMALE	70
TABLEAU 4-2	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES PARAMÈTRES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DES ÉCHANTILLONS D'EAU APPARTENANT AUX GROUPES DÉFINIS PAR L'ANALYSE HIÉRARCHIQUE. TOUTES LES VALEURS SONT EN MG/L, SAUF LE PH (SANS UNITÉS).....	74
TABLEAU 4-3	POIDS DES CINQ PREMIÈRES COMPOSANTES POUR LES 16 PARAMÈTRES ANALYSÉS (LES POIDS MAXIMAUX POUR CHAQUE PARAMÈTRE SONT EN GRAS).....	77
TABLEAU 4-4	TEMPÉRATURES DE RECHARGE ESTIMÉES À PARTIR DES ANALYSES DE GAZ NOBLES	79
TABLEAU 4-5	SIGNATURES ISOTOPIQUES ET CHIMIQUES TYPIQUES DES GAZ THERMOGÉNIQUES ET BIOGÉNIQUES	87
TABLEAU 4-6	ANALYSES CHIMIQUES DE DEUX ÉCHANTILLONS DE GAZ RÉCOLTÉS DANS LE Puits PÉTROLIA HALDIMAND N ^o 1 (SIGPEG, 2014).....	88
TABLEAU 4-7	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES ANALYSES DE GAZ DISSOUS C ₁ , C ₂ ET C ₃ (MG/L)	89
TABLEAU 4-8	RÉSULTATS ANALYTIQUES DE GAZ DISSOUS, D'ISOTOPES DU MÉTHANE ET DU $\Delta^{13}\text{C}$ DES ÉCHANTILLONS SUR LESQUELS DES ANALYSES ISOTOPIQUES DU MÉTHANE ONT ÉTÉ EFFECTUÉES, SELON LES RÉSULTATS DE LA CGC. ND : NON DÉTECTÉ.....	89
TABLEAU 5-1	CALCUL DU NOMBRE DE PECLLET	104
TABLEAU 5-2	CALCUL DU NOMBRE DE COURANT	104
TABLEAU 6-1	SOMMAIRE DES CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES DU SECTEUR HALDIMAND..	115
TABLEAU 6-2	SOMMAIRE DES CONDITIONS DU SECTEUR HALDIMAND PAR RAPPORT AU PROJET DE RÉGLEMENT DU MDDEFP (2013).....	121
TABLEAU 6-3	SOMMAIRE DE L'ÉVALUATION DU RISQUE ENVIRONNEMENTAL DES OPÉRATIONS PÉTROLIÈRES POUR LE SECTEUR HALDIMAND PAR RAPPORT AUX MÉCANISMES POTENTIELS D'ÉMISSION DE CONTAMINANTS.....	127

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1 CARTE GÉOLOGIQUE RÉGIONALE DE LA PÉNINSULE GASPÉSIENNE. LES ZONES COLORÉES REPRÉSENTENT LES ROCHES APPARTENANT À LA CEINTURE DE GASPÉ. LA ZONE D'ÉTUDE À L'EST DE GASPÉ EST INDIQUÉE PAR UN CARRÉ NOIR. MODIFIÉE DE BRISEBOIS ET NADEAU (2003) ET DE PINET ET AL. (2005).....	6
FIGURE 1.2 GÉOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE. A) CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE, AVEC L'EMPLACEMENT DE LA COUPE A-A'. MODIFIÉE DE BRISEBOIS ET NADEAU (2003) ET DE PINET ET AL. (2005); B) COLONNE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DES FORMATIONS RETROUVÉES DANS LA RÉGION D'HALDIMAND. MODIFIÉE DE BOURQUE ET AL. (2001); C) COUPE A-A'. MODIFIÉE DE PÉTROLIA (2013). FH : FAILLE HALDIMAND; FBNO : FAILLE DU BRAS NORD-OUEST; FTL : FAILLE DU TROISIÈME LAC	8
FIGURE 3.1 DÉFINITION DES UNITÉS GÉOLOGIQUES SUR LA BASE DES DIAGRAPHIES (MODIFIÉE DE CROW ET AL., 2014; VOIR L'ANNEXE 4).....	23
FIGURE 3.2 STÉRÉOGRAMMES DES STRUCTURES GÉOLOGIQUES SUPERFICIELLES OBSERVÉES DANS LA RÉGION D'HALDIMAND.....	27
FIGURE 3.3 A) PROJECTION DES DONNÉES NON CORRIGÉES DE STRATIFICATION (S_0) OBTENUES SUR LE TERRAIN À HALDIMAND ET À TAR POINT DÉFINISSANT L'ORIENTATION D'UN PLI ET DE SES FLANCS; B) DÉFINITION DES FAMILLES DE FRACTURES S1 À S5 À PARTIR DES PÔLES DE DENSITÉ DE TOUTES LES STRUCTURES OBSERVÉES DANS LES PUIITS D'OBSERVATION ET SUR LE TERRAIN; C) DÉFINITION DES FAMILLES H1 ET H2 À PARTIR DES PÔLES DE DENSITÉ DES FRACTURES HYDRAULIQUEMENT ACTIVES. LES TRACES DES DEUX FLANCS DU PLI DÉFINI PAR LA STRATIFICATION SONT SUPERPOSÉES AUX DONNÉES DE DENSITÉ. LES DENSITÉS ONT ÉTÉ CALCULÉES À PARTIR DES DONNÉES CORRIGÉES POUR L'ORIENTATION.	28
FIGURE 3.4 INTENSITÉS DE FRACTURATION ET FRACTIONS CUMULÉES DES FRACTURES EN FONCTION DE LA PROFONDEUR OBTENUES DES DIAGRAPHIES ATV. LES DENSITÉS DE FRACTURATION SONT CALCULÉES POUR TOUS LES PUIITS ET NORMALISÉES PAR RAPPORT AU NOMBRE DE PUIITS DANS CHAQUE INTERVALLE.....	29
FIGURE 3.5 INTENSITÉS DE FRACTURATION DES FRACTURES SUBHORIZONTALES ($\gamma < 30^\circ$) OUVERTES, PARTIELLEMENT OUVERTES ET HYDRAULIQUEMENT ACTIVES OBSERVÉES AVEC LES DIAGRAPHIES ATV. FPO : FRACTURES OUVERTES ET PARTIELLEMENT OUVERTES; FHA : FRACTURES HYDRAULIQUEMENT ACTIVES	30
FIGURE 3.6 PROJECTIONS STÉRÉOGRAPHIQUES DES DONNÉES STRUCTURALES OBTENUES À PARTIR DU FMI DANS LE FORAGE HALDIMAND N ^o 2. A) DONNÉES DE STRATIFICATION (S_0) DANS LE BATTERY POINT ET LE YORK RIVER; B) DONNÉES DE FRACTURATION DANS LE BATTERY POINT; C) DONNÉES DE FRACTURATION DANS LE YORK RIVER. LA CORRECTION DE TERZAGHI N'A PAS ÉTÉ APPLIQUÉE LORS DU CALCUL DES LIGNES DE CONTOUR.	31
FIGURE 3.7 RELATIONS ENTRE LA POROSITÉ ET LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE POUR LA MATRICE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX FRACTURÉ À PARTIR DES ANALYSES DE CAROTTES (RÉSULTATS À L'ANNEXE 2).....	35
FIGURE 3.8 MODÈLE CONCEPTUEL HYDROGÉOLOGIQUE, COUPE NORD-SUD LE LONG DE LA LIGNE AB (CARTES 1 ET 9). EXAGÉRATION VERTICALE ~20X	39
FIGURE 3.9 HYDROGRAMMES DES PUIITS EN CONDITIONS LIBRES	43
FIGURE 3.10 HYDROGRAMMES DES PUIITS EN CONDITIONS SEMI-CAPTIVES ET CAPTIVES ...	44
FIGURE 3.11 HYDROGRAMMES DES PUIITS D'OBSERVATION DU 16 FÉVRIER AU 29 JUIN 2012 POUR LES PUIITS D'OBSERVATION SITUÉS LE LONG DE LA COUPE AB (FIGURE 3.8; LOCALISATION À LA CARTE 9).....	45

FIGURE 3.12 NIVEAU D'EAU ESTIMÉ PAR UN BILAN HYDROLOGIQUE QUOTIDIEN COMPARÉ À L'HYDROGRAMME DU Puits POH-11-09 POUR LA PÉRIODE DE FÉVRIER 2012 À SEPTEMBRE 2013	49
FIGURE 3.13 AIRES D'ALIMENTATION DES Puits DE LA VILLE DE GASPÉ. MODIFIÉ D'ARRAKIS (2011)	56
FIGURE 3.14 LOCALISATION DES Suintements D'HYDROCARBURES DANS LE SECTEUR HALDIMAND	57
FIGURE 3.15 PROFILS DE Pression Hydrostatique Calculés Et Pressions De Réservoir Au Niveau Des Puits Pétrolia Haldimand N° 1 Et Haldimand N° 2	63
FIGURE 4.1 BILAN DES CHARGES DES Échantillons Analysés Lors De La Campagne 2013 Du MDDEFP	64
FIGURE 4.2 COMPARAISON DE CERTAINS Résultats Analytiques Des Campagnes D'Échantillonnage De 2012 (Technorem) Et De 2013 (MDDEFP)	65
FIGURE 4.3 BILAN DES CHARGES DES Échantillons Récoltés Lors De La Campagne 2012 De Technorem.....	66
FIGURE 4.4 RELATION ENTRE LES CONCENTRATIONS D'OXYGÈNE DISSOUS (OD) ET DE MÉTHANE	69
FIGURE 4.5 DENDROGRAMME OBTENU LORS DE L'ANALYSE HIÉRARCHIQUE REGROUPEE. DES DIAGRAMMES DE STIFF Représentant Les Valeurs Médianes Des Concentrations En Ions Majeurs Pour Chaque Groupe Défini Par L'Analyse Sont Montrés Sous Le Dendrogramme.....	71
FIGURE 4.6 DIAGRAMME DE PIPER MONTRANT LES FACIÈS Hydrochimiques Des Différents Échantillons	72
FIGURE 4.7 A) CONCENTRATION DES CHLORURES (CL) EN FONCTION DU SODIUM (NA); B) CONCENTRATION DU CALCIUM (CA) EN FONCTION DU BICARBONATE (HCO ₃). LES LIGNES EN POINTILLÉS Représentent Les Lignes De Dissolution De L'Halite (NaCl) Et De La Calcite (CaCO ₃) Respectivement.....	72
FIGURE 4.8 Résultats De L'Analyse En Composantes Principales : A) Poids Des Composantes Pour Les 90 Échantillons Sélectionnés; B) Poids Des Composantes Pour Les 16 Paramètres Retenus.....	76
FIGURE 4.9 ISOTOPES Stables Des Eaux Souterraines Et De Surface. DMM : Droite Météorique Mondiale (Rozanski Et Al., 1993); DML Truro : Droite Météorique Locale De La Station De Truro, Nouvelle-Écosse (IAEA/WHO, 2001); DML Chaudières-Appalaches : Droite Météorique Locale Du Bassin De La Rivière Chaudière (Benoit Et Al., 2011).....	78
FIGURE 4.10 TEMPÉRATURE DE RECHARGE ESTIMÉE À PARTIR DES DONNÉES DE GAZ NOBLES PAR RAPPORT À L'ÉLÉVATION DES Puits Desquels Proviennent Les Échantillons D'EAU	80
FIGURE 4.11 CONCENTRATIONS Atmosphériques Représentatives De Divers CFC Et Du SF ₆ Dans L'Hémisphère Nord Depuis 1940 (Modifié De USGS, 2014).....	81
FIGURE 4.12 GRAPHIQUES MONTRANT LES CONCENTRATIONS DE Divers CFC Et Du SF ₆ . SEULES LES VALEURS DU SF ₆ ONT ÉTÉ CORRIGÉES POUR L'EXCÈS D'AIR.....	83
FIGURE 4.13 CONCENTRATION EN TRITIUM (EN TU) PAR RAPPORT AU % DE CARBONE MODERNE DU ¹⁴ C (PCM) DU CARBONE INORGANIQUE DISSOUS (CID)	83
FIGURE 4.14 ISOTOPES Stables (Δ ¹³ C Et Δ ² H) Du Méthane Dissous. Les Champs Correspondant Aux Signatures Isotopiques Du Méthane Formé Par Différents Mécanismes Sont Montrés. Modifié De Whitarcar (1999).....	91

FIGURE 4.15 ISOTOPES DU CARBONE DU MÉTHANE EN FONCTION DU RAPPORT MOLAIRE MÉTHANE (C ₁)/ÉTHANE (C ₂)+PROPANE (C ₃). SEULS LES ÉCHANTILLONS POUR LESQUELS DES CONCENTRATIONS D'ÉTHANE ET/OU DE PROPANE ONT ÉTÉ DÉTECTÉES SONT REPORTÉS ICI. LES CONCENTRATIONS DE GAZ DISSOUS MESURÉES PAR LA CGC ONT ÉTÉ UTILISÉES ICI. LES EFFETS GLOBAUX DU MÉLANGE DE GAZ THERMOGÉNIQUE ET BIOGÉNIQUE, DE L'OXYDATION BACTÉRIENNE DU MÉTHANE ET DE LA MIGRATION DE GAZ THERMOGÉNIQUE SONT MONTRÉS. MODIFIÉ DE BERNARD ET AL. (1978).....	91
FIGURE 4.16 $\Delta^{13}\text{C}$ DU CARBONE INORGANIQUE DISSOUS (CID) EN FONCTION DE LA CONCENTRATION DE MÉTHANE DISSOUS.....	92
FIGURE 4.17 $\Delta^{13}\text{C}$ DU CARBONE INORGANIQUE DISSOUS (CID) EN FONCTION DE L'ALCALINITÉ TOTALE	93
FIGURE 4.18 SODIUM (NA) VS BARYUM (BA). LES ÉCHANTILLONS SONT COLORÉS EN FONCTION DES COULEURS ATTRIBUÉES AUX GROUPES LORS DE L'ANALYSE HIÉRARCHIQUE REGROUPEE.....	97
FIGURE 4.19 HISTOGRAMME DES CONCENTRATIONS DE CUIVRE (CU), ZINC (ZN) ET PLOMB (PB)	97
FIGURE 5.1 CONDITIONS INITIALES ET LIMITES DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT ET DE TRANSPORT LE LONG DE LA COUPE CD (LOCALISATION SUR LES CARTES 1 ET 35). EXAGÉRATION VERTICALE ~10X.....	99
FIGURE 5.2 DISTRIBUTION DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES (AGRANDISSEMENT SUR LES PREMIÈRES COUCHES DU MODÈLE) [EXAGÉRATION VERTICALE ~25X].....	100
FIGURE 5.3 HAUT : VUE D'ENSEMBLE DES VECTEURS DE VITESSE SUR TOUT LE DOMAINE (EXAGÉRATION VERTICALE ~10X). BAS : AGRANDISSEMENT DES VECTEURS DE VITESSE DE -150 À 400 M NMM (EXAGÉRATION VERTICALE ~18X).....	103
FIGURE 5.4 PROFIL DES VITESSES LE LONG DE LA LIGNE AA' (FIGURE 5.3, HAUT).....	104
FIGURE 5.5 MODÈLE NUMÉRIQUE 2D VERTICAL DE L'ÉCOULEMENT À DENSITÉ VARIABLE. CHARGES HYDRAULIQUES ET LIGNES D'ÉCOULEMENT EN RÉGIME PERMANENT (EXAGÉRATION VERTICALE ~10X). À NOTER QUE LE FLUX N'EST PAS UNIFORME ENTRE CHAQUE LIGNE DE COURANT.	105
FIGURE 5.6 CONCENTRATION RELATIVE SIMULÉE EN SEL ($C_{\text{MAX}} = 157\ 000\ \text{MG/L}$) [EXAGÉRATION VERTICALE ~10X].....	106
FIGURE 5.7 SIMULATION DE L'ÂGE ADVECTIF-DISPERSIF (COUPE CD; CARTE 1) ET LIGNE D'ÉCOULEMENT DU TRAÇAGE DE PARTICULES; INTERVALLE DE 5 000 ANS ENTRE LES MARQUEURS (EXAGÉRATION VERTICALE ~10X). IL EST IMPORTANT DE NOTER QUE LE FLUX N'EST PAS UNIFORME ENTRE CHAQUE LIGNE D'ÉCOULEMENT.	108
FIGURE 5.8 CONDITIONS LOCALES À HALDIMAND (ÉCOULEMENT, TRANSPORT, ÂGE); INTERVALLE DE 5 000 ANS ENTRE LES MARQUEURS (EXAGÉRATION VERTICALE ~13X). IL EST IMPORTANT DE NOTER QUE LE FLUX N'EST PAS UNIFORME ENTRE CHAQUE LIGNE D'ÉCOULEMENT.	109
FIGURE 5.9 TRAÇAGE DE PARTICULES À PARTIR DU PUIT HALDIMAND N° 4 PROJETÉ; INTERVALLE DE 50 000 ANS ENTRE LES PARTICULES (EXAGÉRATION VERTICALE ~6X)..	110
FIGURE 5.10 MODÈLE NUMÉRIQUE 2D VERTICAL DE L'ÉCOULEMENT À DENSITÉ VARIABLE AVEC LA PRÉSENCE D'UNE DISCONTINUITÉ VERTICALE PRÈS DU RUISSEAU DEAN (COUPE CD; CARTE 1). A) CHARGES HYDRAULIQUES ET LIGNES D'ÉCOULEMENT EN RÉGIME PERMANENT; B) CONCENTRATION RELATIVE EN SEL ($C_{\text{MAX}} = 157\ 000\ \text{MG/L}$) [EXAGÉRATION VERTICALE ~10X].....	111
FIGURE 6.1 LOCALISATION DES PUITES D'OBSERVATION EXISTANTS À CONSERVER ET À ABANDONNER.....	131

LISTE DES CARTES

CARTE 1	LOCALISATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE	146
CARTE 2	GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE.....	147
CARTE 3	GÉOLOGIE DU ROC.....	148
CARTE 4	LOCALISATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DE TECHNOREM	149
CARTE 5	LOCALISATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU MDDEFP	150
CARTE 6	ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS QUATERNAIRES	151
CARTE 7	CONTRÔLES SUR LES ÉPAISSEURS.....	152
CARTE 8	ÉLÉVATION DE LA SURFACE DU ROC.....	153
CARTE 9	PIÉZOMÉTRIE DE L'AQUIFÈRE AU ROC	154
CARTE 10	PROFONDEUR DE LA NAPPE.....	155
CARTE 11	CONFINEMENT DE L'AQUIFÈRE AU ROC	156
CARTE 12	UTILISATION DU SOL	157
CARTE 13	PENTE DE LA SURFACE DU SOL.....	158
CARTE 14	GROUPES HYDROLOGIQUES.....	159
CARTE 15	COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT	160
CARTE 16	RECHARGE TOTALE	161
CARTE 17	COTES DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE – AQUIFÈRE AU ROC.....	162
CARTE 18	COTES DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE – AQUIFÈRE GRANULAIRE.....	163
CARTE 19	COTES DE LA RECHARGE – AQUIFÈRE AU ROC.....	164
CARTE 20	COTES DE LA RECHARGE – AQUIFÈRE GRANULAIRE.....	165
CARTE 21	COTES DES TYPES D'AQUIFÈRE – AQUIFÈRE AU ROC.....	166
CARTE 22	COTES DES TYPES D'AQUIFÈRE – AQUIFÈRE GRANULAIRE	167
CARTE 23	COTES DES TYPES DE SOL – AQUIFÈRE AU ROC	168
CARTE 24	COTES DES TYPES DE SOL – AQUIFÈRE GRANULAIRE	169
CARTE 25	COTES DE LA TOPOGRAPHIE (PENTE) – AQUIFÈRE AU ROC	170
CARTE 26	COTES DE LA TOPOGRAPHIE (PENTE) – AQUIFÈRE GRANULAIRE	171
CARTE 27	COTES POUR LA ZONE VADOSE – AQUIFÈRE AU ROC.....	172
CARTE 28	COTES POUR LA ZONE VADOSE – AQUIFÈRE GRANULAIRE	173
CARTE 29	COTES POUR LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE – AQUIFÈRE AU ROC.....	174
CARTE 30	COTES POUR LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE – AQUIFÈRE GRANULAIRE	175
CARTE 31	CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ – AQUIFÈRE AU ROC.....	176
CARTE 32	CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ – AQUIFÈRE GRANULAIRE.....	177
CARTE 33	DISTRIBUTION DES GROUPES D'EAU	178
CARTE 34	CONCENTRATIONS EN MÉTHANE DANS L'EAU SOUTERRAINE.....	179
CARTE 35	DÉPÔTS QUATERNAIRES ET GÉOLOGIE LE LONG DE LA COUPE MODÉLISÉE.....	180

CARTE 36 DISTANCES SÉPARATRICES DES PUITTS D'APPROVISIONNEMENT EN EAU 181

1. INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte

Les activités reliées à l'exploration et à l'exploitation des ressources en hydrocarbures requièrent la compréhension des risques environnementaux qui leur sont associés, notamment en relation avec la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Le débat est d'actualité à l'échelle internationale en raison de l'accroissement de l'exploitation de réservoirs non conventionnels (gaz et pétrole de shale, gaz et pétrole dans les réservoirs peu perméables de type « *tight gas* » ou « *tight oil* », hydrates de gaz, etc.). Au Canada, les ressources potentielles de gaz non conventionnel sont considérables et estimées à plus de 3 300 Tcf (*Trillion cubic feet*) [Rivard et al., 2014].

Le développement récent de cette activité industrielle a amené les gouvernements à établir des réglementations environnementales mieux adaptées afin de concilier développement économique et protection de l'environnement. Au Québec, la protection de la qualité de l'eau souterraine et de surface constitue une des principales préoccupations (BAPE, 2011). Un projet de règlement déposé en mai 2013 prévoit l'obligation de la part des compagnies d'exploration pétrolière et gazière de faire une étude hydrogéologique avant le début des activités dans un rayon de deux kilomètres autour des forages pétroliers ou gaziers projetés (MDDEFP, 2013). Cette étude doit notamment comprendre l'échantillonnage et l'analyse des eaux souterraines dans tous les puits d'approvisionnement en eau souterraine à l'intérieur de ce rayon.

Ce n'est toutefois que tout récemment que des cadres d'évaluation du risque environnemental relié à l'exploration et à l'exploitation des ressources non conventionnelles en hydrocarbures ont commencé à être élaborés et appliqués (US EPA, 2012; Rivard et al., 2014; Lavoie et al., 2014; Lange et al., 2013; Kissinger et al., 2013; Soeder et al., 2014). Dans les régions où ces activités se sont développées de façon intensive, il est difficile d'évaluer si la qualité de l'eau souterraine qui est observée a été affectée ou non par ces activités, d'où l'importance d'établir la qualité naturelle des eaux souterraines avant l'exploitation, particulièrement en ce qui concerne les gaz dissous. Cela a été fait récemment dans les basses-terres du Saint-Laurent (Pinti et al., 2013) en lien avec l'évaluation environnementale stratégique sur les gaz de shale (CÉES, 2014). Les mécanismes potentiels de dégradation de la qualité de l'eau souterraine par les activités d'exploration et d'exploitation des ressources en hydrocarbures qui sont généralement considérés incluent les épanchements de liquide en surface, les fuites à travers la cimentation ou les coffrages le long des forages et la migration des fluides à partir des niveaux exploités jusqu'aux aquifères par des cheminements préférentiels qui peuvent être naturels (failles, réseau de fractures) ou reliés aux opérations pétrolières (anciens puits ou puits actifs) [US EPA, 2012; Kissinger et al., 2013; Jackson et al., 2013]. La fracturation hydraulique peut augmenter le potentiel de migration par des failles ou d'anciens puits pétroliers (Gassiat et al., 2013; Watson, 2013; AER, 2013).

Même si des cadres d'évaluation du risque environnemental relié aux activités de l'industrie des hydrocarbures sont élaborés, il n'existe pratiquement pas d'exemple de

caractérisation environnementale d'aquifères dans des contextes d'exploration pétrolière, particulièrement au Québec où l'exploration a été relativement modeste. Une telle caractérisation exige l'évaluation des liens potentiels entre les unités productrices d'hydrocarbures, situées jusqu'à des milliers de mètres de profondeur, et les aquifères superficiels, ce qui nécessite des développements technologiques et scientifiques. Cependant, les mécanismes potentiels de contamination des eaux souterraines en relation avec les activités d'exploration et de production pétrolière et gazière ne sont pas limités à la migration de contaminants à partir de la profondeur. Les activités réalisées en surface sont en fait les plus susceptibles de mener plus directement et à plus court terme à la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Dans cette perspective, l'étude documentée dans le présent rapport définit les conditions du système aquifère qui vont contrôler la possibilité et l'incidence d'une éventuelle contamination sur la qualité de l'eau souterraine. Ces conditions incluent la nature de l'aquifère, particulièrement la fracturation du roc, les zones de recharge, les conditions d'écoulement et la vulnérabilité de l'aquifère.

C'est dans ce contexte que nous présentons les résultats de la caractérisation hydrogéologique d'un site d'exploration pétrolière situé dans le secteur Haldimand, à Gaspé, au Québec. Cette étude a permis l'acquisition et l'interprétation des données prévues par le projet de règlement du MDDEFP (2013), fournissant ainsi un exemple de démarche d'évaluation des conditions hydrogéologiques par rapport aux activités d'exploration pétrolière. Ces travaux intègrent les informations sur les puits résidentiels à celles obtenues de puits d'observation aménagés dans la région d'étude afin de définir les conditions hydrogéologiques. Les caractéristiques physiques du système aquifère, la géochimie de l'eau souterraine ainsi qu'un modèle numérique d'écoulement et de transport de masse permettent de définir un modèle conceptuel du système aquifère. La compréhension de ce système aquifère et de ses relations avec les unités géologiques plus profondes permet de faire une évaluation qualitative du risque environnemental pour les eaux souterraines et de déterminer des mesures de mitigation du risque afin d'assurer la protection de la qualité de l'eau souterraine.

1.2. Mandat et objectifs

Le mandat de l'étude est de définir le contexte hydrogéologique du secteur Haldimand, à Gaspé, qui est visé par la recherche et, éventuellement, l'exploitation d'hydrocarbures. Cette étude hydrogéologique doit notamment fournir les renseignements suivants :

- 1° La topographie du territoire;
- 2° Le profil stratigraphique;
- 3° La localisation et la profondeur des prélèvements d'eau effectués à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire;
- 4° La vulnérabilité des aquifères par rapport aux activités en surface;
- 5° La recharge des eaux souterraines;
- 6° Les liens entre les eaux souterraines et les eaux de surface;

- 7° La direction d'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères;
- 8° La localisation des puits de recherche ou d'exploitation d'hydrocarbures abandonnés, incluant les sites connus de suintements d'hydrocarbures, et leur effet, réel ou potentiel, sur la qualité des eaux souterraines, voire des eaux de surface;
- 9° L'évaluation des impacts potentiels sur les prélèvements d'eau effectués à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire dans l'hypothèse où un site de forage projeté d'un puits de recherche ou d'exploitation d'hydrocarbures, notamment le site Haldimand n° 4 de la compagnie Pétria, serait à l'origine d'une contamination des eaux souterraines.

La réalisation de cette étude hydrogéologique s'appuie sur la synthèse et l'interprétation des données et informations disponibles pour le secteur Haldimand, lequel couvre un territoire d'environ 50 km². L'étude comprend une caractérisation de la qualité des eaux par l'échantillonnage des prélèvements d'eau effectués à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire présents dans un rayon de deux kilomètres du site Haldimand n° 4 de la compagnie Pétria. Cet échantillonnage a été réalisé sous la responsabilité du MDDEFP conformément aux dispositions de l'annexe II du projet de règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection publié à la *Gazette officielle du Québec* du 29 mai 2013 (MDDEFP, 2013).

Le présent rapport présente une synthèse des travaux hydrogéologiques réalisés dans le secteur Haldimand. Ce rapport comprend les références de l'ensemble des documents et des données collectés, la description du programme de caractérisation réalisé par le MDDEFP ainsi qu'un résumé des travaux réalisés. Il comprend aussi des cartes décrivant les conditions géologiques et hydrogéologiques du secteur Haldimand, une description de la qualité de l'eau souterraine à partir de la caractérisation géochimique réalisée par le MDDEFP ainsi que les résultats d'un modèle numérique d'écoulement et de transport de masse. Ces résultats permettent d'établir les caractéristiques du système aquifère et d'élaborer un modèle hydrogéologique conceptuel décrivant le contexte hydrogéologique du territoire couvert par l'étude.

1.3. Présentation de la région d'étude

La carte 1 montre que le site d'Haldimand est localisé au sud-est de la ville de Gaspé et est bordé au nord-ouest par la rivière York, au nord et à l'est par la baie de Gaspé et au sud par la rivière St-Jean. La topographie de la péninsule d'Haldimand montre trois crêtes d'orientation nord-ouest/sud-est qui atteignent plus de 100 m par rapport au niveau moyen de la mer (NMM), avec une élévation maximale de 202 m au centre de la péninsule. En direction de la mer, l'altitude diminue pour atteindre le niveau moyen de la mer de 0 m. La péninsule d'Haldimand est en majorité boisée, avec des résidences au pourtour le long de la route 132 (montée de Sandy Beach, au nord, et route Haldimand, au sud) et du boulevard de York Sud, à l'ouest. Des chemins privés gravelés pénètrent dans la péninsule. En plus des cours d'eau majeurs qui bordent la péninsule au nord-est et au sud (rivières York et St-Jean), quatre principaux ruisseaux encaissés découpent la péninsule (Kennedy, Aug, Dean et 02M60000).

D'anciens puits pétroliers abandonnés se trouvent dans le secteur Haldimand et leur localisation sera précisée plus loin. Les puits pétroliers actifs Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2 sont situés à l'intérieur de la péninsule (carte 1). Un troisième puits pétrolier est prévu au site Haldimand n° 4. Comme il est décrit au chapitre 3, le principal aquifère du secteur est constitué de la partie supérieure du socle rocheux fracturé. Les principaux utilisateurs de l'eau souterraine sont majoritairement résidentiels et situés en périphérie de la péninsule d'Haldimand. Les puits résidentiels de la région sont généralement ouverts au roc et atteignent une profondeur maximale de 65 m (moyenne de 22 m, tableau 1-1). Les futurs puits d'alimentation de la ville de Gaspé sont situés au sud de la rivière St-Jean (carte 1). Ces trois puits ont une profondeur moyenne de 17 m. L'eau captée par les puits municipaux provient des dépôts granulaires et de la partie supérieure de l'aquifère de roc fracturé (Arrakis Consultants inc., 2011). La ville de Gaspé possède également le puits de la plage qui se trouve à l'embouchure de la rivière St-Jean (Arrakis Consultants inc., 2010) [carte 1]. La prise d'eau de surface montrée sur la carte 5 présente l'actuelle source d'approvisionnement en eau pour l'aqueduc de la ville de Gaspé.

Tableau 1-1 Caractéristiques des puits résidentiels échantillonnés lors de la campagne du MDDEFP

Nombre de puits échantillonnés	75	Statistiques de profondeur	
		Centile	Profondeur (m)
Nombre de puits de profondeur connue*	56	minimum	5,5
		5	9,8
		25	14,6
		50	20,0
		75	25,9
		95	39,3
		maximum	65,0
		moyenne	22,0

* Les profondeurs de quatre puits résidentiels ont été compilées à partir des données de LNA (2008)

1.3.1. Géologie des formations superficielles

La géologie des formations superficielles qui est présentée à la carte 2 est issue de la compilation de Veillette et Cloutier (1983). La région d'étude comprend dix unités quaternaires distinctes. Les sédiments glaciaires, du till (Tm, Tc) de même qu'une unité dite de roc altéré (Q), sont omniprésents sur l'ensemble de la région d'étude et ils couvrent près de 80 % de la surface. Une étendue importante de sédiments fluvioglaciaires (Gs) et d'alluvions (A) se trouve dans la vallée de la rivière St-Jean, au sud de la région d'étude, et des sédiments deltaïques et prodeltaïques (MGd) se trouvent à l'embouchure nord de la rivière. On retrouve des sédiments marins littoraux et intertidaux (Mb, Mi) à quelques endroits au bord de la mer et une tourbière (Ot) à la tête du ruisseau Kennedy. Des dépôts de versants non différenciés (C) recouvrent le nord-ouest de la péninsule à l'embouchure sud de la rivière York.

1.3.2. Géologie du socle rocheux

1.3.2.1. Contexte général

La péninsule gaspésienne fait partie des Appalaches du Nord, qui ont été formées lors d'une série d'orogénèses au cours de l'ère paléozoïque (Williams, 1979). Deux domaines tectono-stratigraphiques distincts sont généralement définis dans la partie nord-est de la péninsule (Bertrand et Malo, 2001) :

- Les roches du Paléozoïque inférieur des zones de Humber et Dunnage, au nord;
- Les roches du Paléozoïque moyen de la ceinture de Gaspé, plus au sud, dont fait partie la région d'étude située à l'est de Gaspé.

L'assemblage du Paléozoïque inférieur est constitué de roches cambro-ordoviciennes de la marge passive laurentienne (zone de Humber) et de roches ordoviciennes du domaine océanique de l'océan Iapetus (zone de Dunnage) [Bertrand et Malo, 2001]. Ces deux zones ont été affectées tant par l'orogénèse taconienne (Ordovicien tardif) que par l'orogénèse acadienne (Dévonien moyen) [St-Julien et Hubert, 1975].

La ceinture de Gaspé, à laquelle appartiennent les roches retrouvées dans la région d'Haldimand, représente un bassin successeur post-taconique composé pour la majeure partie de roches sédimentaires siluro-dévonniennes qui reposent de façon discordante sur les roches de la zone de Humber et de Dunnage (Malo et Bourque, 1993; Bourque et al., 1995).

Les principaux éléments structuraux rencontrés dans la ceinture de Gaspé sont reliés à l'orogénèse acadienne, bien que quelques traces de la perturbation salinique (Silurien) soient localement observées (Malo, 2001).

1.3.2.2. Caractéristiques de la déformation acadienne

La tendance structurale acadienne principale observée dans les roches de la ceinture de Gaspé est orientée NE-SO. La ceinture de Gaspé est divisée en trois domaines structuraux distincts qui suivent cette tendance structurale acadienne (Malo et al., 1995) [figure 1.1] :

- Le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé;
- L'anticlinorium d'Aroostook-Percé;
- Le synclinorium de la Baie des Chaleurs.

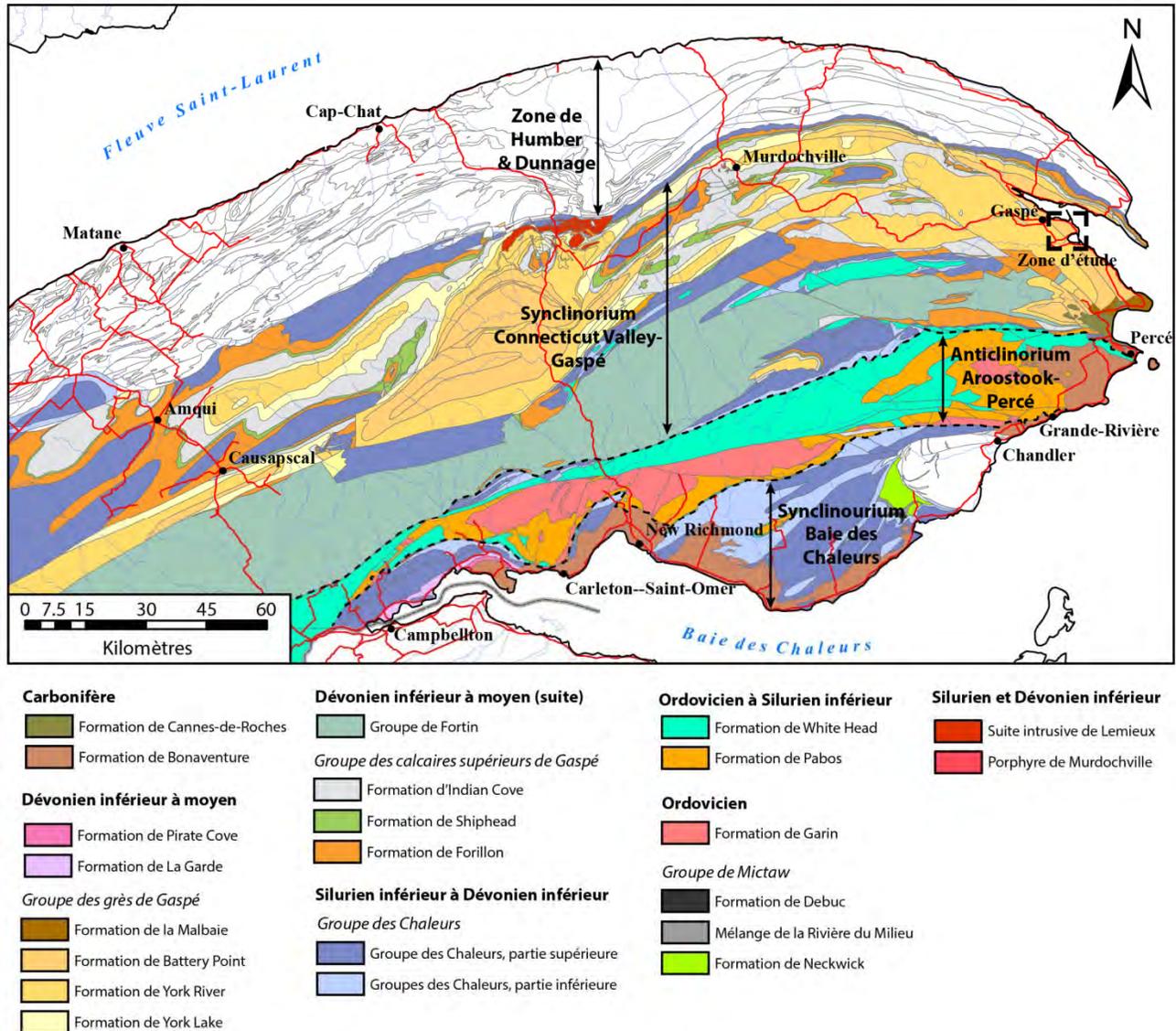


Figure 1.1 Carte géologique régionale de la péninsule gaspésienne. Les zones colorées représentent les roches appartenant à la ceinture de Gaspé. La zone d'étude à l'est de Gaspé est indiquée par un carré noir. Modifiée de Brisebois et Nadeau (2003) et de Pinet et al. (2005)

La partie est du synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé, à l'intérieur de laquelle se trouve la région d'étude, est située entre la discordance taconienne au nord et le système de failles de la Grande Rivière au sud (Bourque et al., 1995). Dans ce synclinorium, on retrouve de grands synclinaux ouverts et des anticlinaux légèrement déjetés vers le nord (Bourque et al., 1995). Dans la partie sud-ouest du synclinorium, on retrouve des failles inverses et des failles décrochantes parallèles à l'axe des plis NE-SO. Cependant, la partie nord-est du synclinorium est caractérisée par des plis d'orientation E-O à ONO-ESE et des failles de décrochement dextres d'orientation NO-SE (Malo, 2001). Les structures principales observées dans le synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé sont reliées à trois phases principales de déformation dans

un régime de transpression lors de l'orogénèse acadienne (Malo et Bourque, 1993; Kirkwood, 1999) :

- La formation de plis NE-SO et des failles de chevauchement NE-SO à fort pendage dans la partie sud-ouest du synclinorium;
- Une déformation fragile-ductile des plis NE-SO suivie du développement de failles de décrochement dextre E-O;
- Un mouvement tardif le long des failles NO-SE de décrochement dextre dans la partie nord-est du synclinorium.

Dans le secteur Haldimand, qui se trouve dans la partie nord-est du synclinorium, ce sont les deux dernières phases qui ont pu être responsables, dans un premier temps, de la formation des plis d'axe O-E et, dans un deuxième temps, du développement de plis ONO-ESE et de failles de décrochement dextres d'orientation NO-SE (p. ex., failles du Bras Nord-Ouest, Haldimand, du Troisième Lac.) [Pétrolia, comm. pers. 2013].

1.3.2.3. Lithostratigraphie

La ceinture de Gaspé est constituée de quatre assemblages temporels et lithologiques distincts (figure 1.2) [Bourque et al., 2001; Malo, 2001] :

- Un faciès d'eau profonde à grains fins silicoclastiques et de carbonates des groupes d'Honorat et de Matapédia (Ordovicien supérieur – Silurien inférieur). Les roches de ce faciès ne sont pas retrouvées dans la région de la péninsule d'Haldimand;
- Un faciès de plateforme continentale d'eau peu profonde à profonde du groupe des Chaleurs (Silurien-Dévonien inférieur). Dans le secteur Haldimand, seule la partie supérieure de ce groupe est retrouvée. Elle comprend les formations de Roncelles et d'Indian Point, composées de conglomérats, de roches volcaniques et de calcaires récifaux;
- Un faciès silicoclastique et de carbonates à grains fins de plateforme profonde et de bassin du groupe des calcaires supérieurs de Gaspé et de son équivalent latéral, le groupe de Fortin (Dévonien inférieur). Les calcaires supérieurs de Gaspé sont divisés en trois formations : 1) la formation de Forillon, une succession homogène de calcilutite argileuse, dolomitique et siliceuse; 2) la formation de Shiphead, plus siliciclastique, avec quelques lits de grès et de bentonite; 3) la formation d'Indian Cove, une succession homogène de calcilutite siliceuse;
- Un faciès littoral et terrestre à grains grossiers des grès de Gaspé (Dévonien inférieur – Dévonien moyen). Dans la région d'Haldimand, ce faciès est représenté par deux assemblages terrigènes : 1) la formation de York River, une séquence régressive caractérisée par une granulométrie croissante de sa base à son sommet, passant d'un assemblage mudstone-siltstone-grès à un grès avec un peu de mudstone; 2) la formation de Battery Point, composée de grès conglomératique, de grès moyen à grossier, de siltstone et de mudstone, avec une unité sommitale de grès, de siltstone et mudstone rouges.

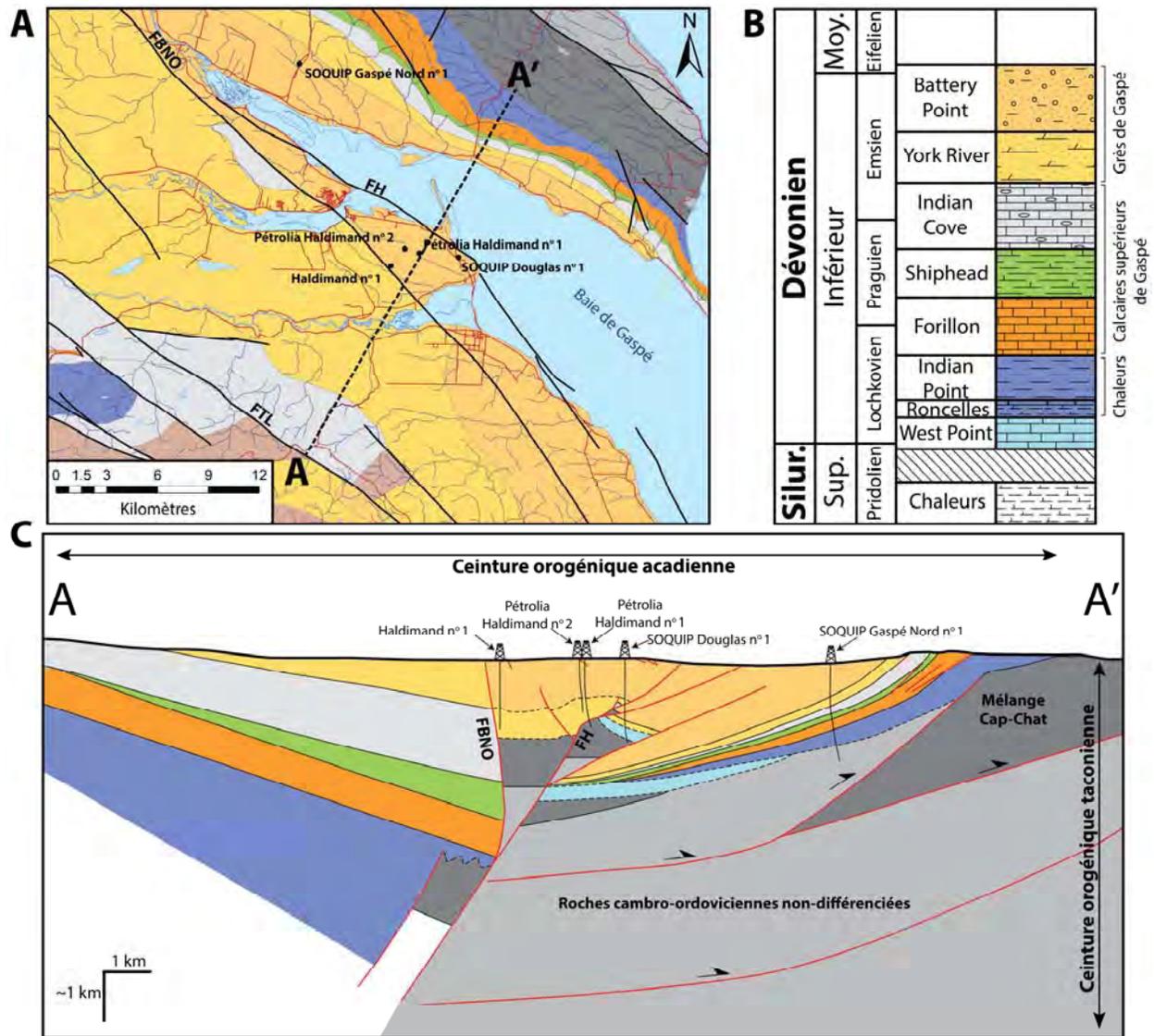


Figure 1.2 Géologie de la zone d'étude. A) Carte géologique de la région d'étude, avec l'emplacement de la coupe A-A'. Modifiée de Brisebois et Nadeau (2003) et de Pinet et al. (2005); B) Colonne lithostratigraphique des formations retrouvées dans la région d'Haldimand. Modifiée de Bourque et al. (2001); C) Coupe A-A'. Modifiée de Pétrolia (2013). FH : faille Haldimand; FBNO : faille du Bras Nord-Ouest; FTL : faille du Troisième Lac

Les formations de Battery Point et de York River sont les seules qui affleurent dans la péninsule d'Haldimand (figure 1.2; carte 3). Alors que la formation de York River affleure au sud-ouest de la faille du Bras Nord-Ouest, elle se retrouve sous plusieurs centaines de mètres de roches du Battery Point au nord-est. L'épaisseur relativement importante de roches du York River située entre les failles du Bras Nord-Ouest et Haldimand constitue le réservoir ciblé dans le cadre des activités d'exploration pétrolière actuelles dans la péninsule d'Haldimand.

1.3.2.4. Suintements et exploration pétrolière dans la péninsule gaspésienne

La présence de suintements naturels d'hydrocarbures dans la ceinture de Gaspé a été documentée pour la première fois par Logan en 1836 (Logan, 1863). Depuis cette époque, plus de 80 suintements distincts ont été décrits par divers auteurs (Lavoie et Bourque, 2001). Ils apparaissent majoritairement dans la partie nord-est de la Gaspésie et sont souvent associés à des zones fracturées à proximité des zones de failles acadiennes (Parks, 1929; McGerrigle, 1950; Sikander, 1975; Bertrand et Malo, 2001). Ces suintements sont généralement confinés à des unités dévoniennes de la ceinture de Gaspé (Lavoie et Bourque, 2001) :

- Formation d'Indian Cove (calcaires supérieurs de Gaspé);
- Contact entre calcaires supérieurs de Gaspé et grès de Gaspé sus-jacents;
- Formation de York River (grès de Gaspé).

Certains suintements en surface de la formation de Battery Point sont aussi connus depuis plus de 150 ans. Trois de ces suintements ont été échantillonnés dans le cadre de la présente étude (voir la section 3.8). Aucune analyse chimique antérieure de ces suintements n'est connue; cependant, une description sommaire de leurs caractéristiques est donnée par McGerrigle (1950) et Sikander (1975).

Les premiers puits pétroliers en Gaspésie ont été forés en 1860 par la *Gaspé Mining Company* à proximité de certains des suintements décrits ci-dessus (McGerrigle, 1950). À partir de ces premiers travaux, l'activité d'exploration pétrolière en Gaspésie peut être divisée en trois phases principales (Lavoie et Bourque, 2001; Roy, 2008). La première phase, qui s'étend de 1860 à 1950, a été caractérisée par le forage d'environ 70 sondages. De ces 70 puits, 48 ont montré des indices de gaz ou de pétrole, et des petites quantités d'huile ont été produites, allant jusqu'à 20 m³ environ (McGerrigle, 1950; Roy, 2008). La deuxième période se situe dans les années 1970, à la suite de la création de la SOQUIP, en 1969. Malgré des travaux étendus de géophysique sismique, des analyses de laboratoire et le forage de sept nouveaux sondages, aucun résultat probant concernant l'accumulation de quantités économiques d'hydrocarbures n'a été obtenu (Lavoie et Bourque, 2001). Ceci a mené au retrait de la SOQUIP et de la plupart des autres compagnies pétrolières de la Gaspésie au début des années 1980. La troisième phase d'exploration, qui est encore en cours, a débuté en 1995, parallèlement à la découverte de gisements d'huile et de gaz à Terre-Neuve. Une quinzaine de forages pétroliers ont été réalisés en Gaspésie par des compagnies juniors depuis cette date, et plus de la moitié montre des indices de gaz ou de pétrole (SIGPEG, 2014). À Haldimand, deux puits ont été forés en 2005 et 2009 (puits Pétrolia Haldimand n° 1 et n° 2, respectivement). Le puits Pétrolia Haldimand n° 1 avait une production de 40 barils d'huile par jour en février 2012 (Pétrolia, 2012a).

2. TRAVAUX DE CARACTÉRISATION

Des travaux de caractérisation des conditions hydrogéologiques ont été réalisés dans le secteur Haldimand entre novembre 2011 et octobre 2013. TechnoRem (2013) décrit les travaux que la firme a réalisés en 2011 et 2012 dans le cadre d'un mandat reçu de Pétrolia, incluant l'installation de puits d'observation, la réalisation d'essais hydrauliques dans ces puits et l'échantillonnage d'eau souterraine dans les puits d'observation et des puits résidentiels. Une caractérisation de l'eau souterraine a ensuite été réalisée par le MDDEFP en 2013 dans les puits d'observation installés par TechnoRem et dans les puits résidentiels compris dans un rayon de deux kilomètres du site prévu pour le forage du puits pétrolier Haldimand n° 4. La présente section décrit l'ensemble des travaux de caractérisation réalisés de 2011 à 2013 à Haldimand, mais avec plus de détails sur les travaux réalisés par le MDDEFP puisque les travaux précédents sont documentés par TechnoRem (2013) [voir le rapport inclus à l'annexe 4].

2.1. Caractérisation de TechnoRem en 2011 et 2012

Une campagne de terrain a été réalisée par la firme TechnoRem entre novembre 2011 et octobre 2012 afin de caractériser les conditions hydrogéologiques à Haldimand et Tar Point. Cette campagne comprenait le forage et parfois le carottage d'une série de puits d'observation, des essais hydrauliques, un suivi automatisé du niveau de l'eau souterraine dans les puits d'observation et un échantillonnage des eaux souterraines pour des analyses générales et spécialisées.

2.1.1. Installation de puits d'observation et carottage

Quatorze puits d'observation et un puits d'alimentation pour le futur forage Haldimand n° 4 ont été aménagés dans la zone d'étude (carte 4). Ces puits s'ajoutent aux deux puits d'approvisionnement qui étaient déjà existants au niveau des sites des puits Pétrolia Haldimand n° 1 et n° 2 et qui peuvent servir de puits d'observation puisqu'ils ne contiennent pas d'installations permanentes de production d'eau. Deux des forages (POH-11-03 et POH-11-10) ont été forés à l'aide d'un carottier.

2.1.2. Essais hydrauliques et piézométrie

Divers essais hydrauliques ont été effectués dans le cadre de la campagne de TechnoRem et leurs résultats sont décrits plus en détail à la section 3.3 :

- Un essai de perméabilité (*slug test*) dans le puits POH-11-10;
- Des essais de pompage de courte durée dans 15 puits;
- Un essai de pompage de longue durée (72 heures) dans le puits POH-11-06.

De plus, en février 2012, 12 puits d'observation ont été instrumentés de sondes de pression d'eau (PH-01, PH-02, POH-11-02, POH-11-04, POH-11-06, POH-11-07, POH-11-08, POH-11-09, POH-11-11, POH-11-12, POH-11-13, POH-11-14). En juin 2012, les sondes ont été retirées pour neuf de ces puits. Les trois autres sondes ont été retirées en octobre 2012. À la fin des travaux réalisés par TechnoRem

(novembre 2012), trois sondes de lecture de niveau d'eau ont été remises en place dans les puits d'observation POH-11-05, POH-11-06 et POH-11-09, et trois sondes barométriques ont été réinstallées. Les résultats du suivi de la nappe sont discutés et interprétés à la section 3.5.

2.1.3. Échantillonnage et analyse de l'eau souterraine

Une série d'échantillons a été prélevée dans les puits d'observation et dans certains puits résidentiels autour de la péninsule d'Haldimand. L'emplacement des lieux d'échantillonnage est montré à la carte 4. Cet échantillonnage a été effectué afin de procéder à des analyses générales pour tous les échantillons (section 2.1.3.1) et à des analyses spécialisées (section 2.1.3.2) sur une partie des échantillons. Les échantillons des puits résidentiels ont été prélevés à un robinet de la résidence (p. ex., cuisine, extérieur) après une purge de 15 à 20 minutes.

2.1.3.1. Analyses générales

Des échantillons de 17 puits d'observation, 66 puits résidentiels et 6 eaux de surface ont été prélevés pour des analyses générales. Ces analyses comprenaient la détermination des concentrations des métaux, composés inorganiques, hydrocarbures pétroliers (C₁₀-C₅₀), hydrocarbures aromatiques polycycliques et composés organiques volatils. Ces analyses ont montré que l'eau souterraine était généralement de bonne qualité dans la péninsule d'Haldimand, à l'exception d'un dépassement pour le fluorure. Toutefois, les concentrations de certains paramètres excédaient les critères esthétiques de Santé Canada (2012) : sulfures (11), manganèse (9), dureté totale (8), chlorures (5), sodium (5), solides totaux dissous (5) et fer (1). L'aluminium dépassait le critère esthétique pour deux échantillons d'eau de surface, soit en aval du ruisseau Dean et en amont du ruisseau 02M60000.

2.1.3.2. Analyses spécialisées

Un échantillonnage pour des analyses spécialisées s'est concentré sur les puits d'observation du site Haldimand, deux puits résidentiels et quatre lieux de prélèvement d'eaux de surface. Le programme spécialisé comprenait notamment :

- Des analyses des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) par les laboratoires de l'Université d'Ottawa. L'échantillonnage a été effectué sur dix puits observation, deux puits résidentiels et quatre eaux de surface (résultats discutés à la section 4.3.1);
- L'analyse de l'activité de radioisotopes (carbone-14 [^{14}C] du carbone inorganique dissous [CID] et tritium [^3H] de l'eau) par l'Université de Waterloo. Dix puits d'observation, quatre eaux de surface et deux puits résidentiels ont été échantillonnés (résultats discutés à la section 4.3.2.2);
- L'analyse des composés organiques (organiques extractibles à l'acide [OEA], composés organiques volatils [COV], hydrocarbures aromatiques polycycliques [HAP], *n*-alcanes) par le Delta-lab de la Commission géologique du Canada à Québec. Onze puits d'observation, deux puits résidentiels, quatre eaux de

surface et deux suintements ont été échantillonnés. De plus, un échantillon de l'huile produite par le puits Pétrolia Haldimand n° 1 a été analysé. Les résultats sont discutés aux sections 3.8.1.2 et 4.5.2 (résultats détaillés dans le rapport inclus à l'annexe 4).

2.2. Caractérisation du MDDEFP en 2013

2.2.1. Contexte des travaux

Dans le cadre d'une caractérisation de la qualité des eaux souterraines réalisée sous la responsabilité du MDDEFP, des travaux d'échantillonnage ont débuté à la fin août 2013 pour se terminer en novembre 2013. Ces travaux avaient pour but de réaliser l'échantillonnage et l'analyse de l'eau souterraine conformément aux dispositions de l'annexe II du projet de règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection publié à la *Gazette officielle du Québec* du 29 mai 2013 (MDDEFP, 2013).

Tous les prélèvements d'eau effectués à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire dans un rayon de deux kilomètres du site prévu du puits d'exploration pétrolière Haldimand n° 4 ont donc été recensés par le MDDEFP. La carte 5 montre la localisation des sites d'échantillonnage dans un rayon de deux kilomètres autour du site Haldimand n° 4. Le réseau d'aqueduc de la ville de Gaspé est également représenté sur la carte 5. Les puits d'observation, les puits d'alimentation en eau des sites de forage pétrolier ainsi que les points de prélèvement des eaux de surface de TechnoRem (2013) ont aussi fait l'objet d'un nouvel échantillonnage. Ce nouvel échantillonnage était requis puisque le programme analytique prévu par le projet de règlement exige des analyses qui n'avaient pas été faites sur les échantillons prélevés dans le cadre des travaux de TechnoRem. De plus, cet échantillonnage permet de vérifier les résultats analytiques obtenus suite à la campagne de TechnoRem et de fournir des données géochimiques similaires pour l'ensemble de la région d'étude.

Cette campagne d'échantillonnage présente deux types d'échantillonnage, à savoir le programme analytique de base et le programme analytique spécialisé qui sont décrits plus en détail dans les paragraphes qui suivent (voir aussi les tableaux à l'annexe 1).

2.2.2. Travaux d'échantillonnage

2.2.2.1. Échantillonnage des puits résidentiels

Afin de connaître la qualité naturelle de l'eau souterraine des puits résidentiels, il est nécessaire de prélever des échantillons d'eau brute non traitée. Les échantillons ont donc été prélevés le plus près possible de l'ouvrage de captage avant que l'eau n'atteigne un réservoir ou les systèmes de distribution ou de traitement. Les puits ont été purgés environ 40 minutes à chaque site.

Lors de l'échantillonnage des puits résidentiels, les propriétaires ont d'abord été informés du déroulement de la campagne, en personne ou par téléphone. Lors de la visite, un feuillet d'information sur le projet a été remis aux propriétaires. Les résultats

analytiques relatifs à l'eau de leur puits ont été transmis par la poste en décembre 2013 accompagnés d'une lettre de remerciement et d'information expliquant les critères et les recommandations gouvernementales applicables en matière d'eau potable. Des informations concernant le méthane dans l'eau souterraine ont également été transmises dans les cas de dépassement de ce critère.

2.2.2.2. Échantillonnage des puits d'observation

L'échantillonnage des puits d'observation sur le site Haldimand a été réalisé après avoir obtenu les permissions d'accès des propriétaires des terrains et de Pétrolia. Un technicien de Pétrolia a accompagné les équipes sur les différents sites d'échantillonnage des puits d'observation. Dans le cas des puits situés dans le secteur des puits municipaux, les permissions d'accès ont également été obtenues auprès des propriétaires ainsi que de la Ville de Gaspé.

L'échantillonnage des puits d'observation non aménagés a requis la mise en place d'une tubulure Wattera dédiée à chaque site. Ces puits ont été échantillonnés à l'aide d'une pompe Redi-Flo 2. Après chaque échantillonnage, la pompe et le filage de la pompe étaient décontaminés selon la séquence suivante : acétone, hexane, acétone, suivi d'un rinçage à l'eau distillée. De plus, les différents fluides ont été recirculés dans la pompe selon la même séquence pour procéder à la décontamination de l'intérieur de la pompe.

La capacité importante du futur puits d'alimentation SJ-PE/2 a nécessité la mise en place d'une pompe submersible plus puissante. Une firme d'installation de pompe a procédé à la mise en place d'une pompe submersible et d'un robinet d'échantillonnage.

Le prélèvement des échantillons a été réalisé d'après le *Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine* du projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) de Chaudière-Appalaches (Beaudry, 2013). Ce protocole est joint à l'annexe 1. La purge a été effectuée jusqu'à la stabilisation des paramètres physicochimiques. L'échantillonnage des gaz nobles, des CFC (chlorofluorocarbures) et du SF₆ (hexafluorure de soufre) ainsi que l'échantillonnage du méthane ont été réalisés en suivant les protocoles respectifs qui sont également joints à l'annexe 1.

2.2.2.3. Échantillonnage des eaux de surface et suintements

L'échantillonnage des eaux de surface a été fait à même le cours d'eau. Les suintements ont été prélevés de la même façon.

2.2.2.4. Manipulation des échantillons

Pour chaque site d'échantillonnage, les informations suivantes ont été recueillies :

- Informations générales : adresse, nom du propriétaire, coordonnées GPS du puits, capacité du réservoir, présence de traitement;
- Paramètres physicochimiques : température, pH, conductivité spécifique, salinité, solides totaux dissous, oxygène dissous et potentiel d'oxydoréduction.

Tous les échantillons d'eau ont été conservés à 4 °C et à l'obscurité jusqu'à leur analyse. Les échantillons étaient entreposés dans le réfrigérateur du Centre Merinov, à Gaspé, pendant la semaine avant d'être transportés à Québec. Une fois à Québec, les échantillons étaient redirigés vers les différents laboratoires d'analyse. Pendant le transport, des bouteilles d'eau congelée et des blocs réfrigérants (*ice pack*) ont été utilisés afin de maintenir la température des glacières à 4 °C. Seuls les échantillons d'eau analysés pour les gaz nobles, les CFC et le SF₆ ne nécessitaient pas d'être conservés au froid.

2.2.3. Programme analytique

2.2.3.1. Programme analytique de base

Le programme analytique de base comprend l'analyse des paramètres prévus dans l'annexe II du projet de règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection publié à la *Gazette officielle du Québec* du 29 mai 2013. Le tableau A1-1 de l'annexe 1 présente la liste des paramètres prévus au projet de règlement et indique les analyses qui ont été réalisées par TechnoRem (2013) pour les échantillons prélevés en 2011 ou 2012 à chaque puits d'observation du site Haldimand par rapport aux analyses de base du programme réalisé par le MDDEFP en 2013. Les cases vides représentent les paramètres qui ont été ajoutés à la campagne d'échantillonnage du MDDEFP pour satisfaire au projet de règlement. La section *Autres paramètres analysés* comprend les paramètres qui ont été analysés par TechnoRem, mais qui ne se trouvent pas dans la liste des paramètres requis dans le projet de règlement.

Au total, 70 puits résidentiels situés à l'intérieur du rayon de deux kilomètres du puits Haldimand n° 4 ainsi que les 16 puits d'observation et d'alimentation des forages pétroliers du site Haldimand ont été échantillonnés pour les paramètres de base.

Des échantillons ont également été prélevés pour des puits résidentiels situés à l'extérieur du rayon de deux kilomètres. Ces puits ont été sélectionnés sur la base des résultats de TechnoRem puisqu'ils montraient des eaux souterraines évoluées de type NaCl. Ces échantillons ont été analysés pour les paramètres du programme analytique de base afin de vérifier leur composition chimique ainsi que la présence potentielle de méthane. Au total, cinq puits résidentiels ont été échantillonnés à l'extérieur du rayon de deux kilomètres.

Le secteur des futurs puits d'alimentation de la ville de Gaspé au sud de la rivière St-Jean a aussi fait l'objet du programme analytique de base. Dans ce secteur, un des futurs puits d'alimentation de la ville de Gaspé ainsi que quatre puits d'observation ont été échantillonnés. Ces puits ont été sélectionnés pour être représentatifs des conditions rencontrées dans ce secteur, soit des puits d'observation crépinés dans l'aquifère rocheux et d'autres dans les alluvions, ainsi que des puits d'observation à proximité des puits d'approvisionnement et d'autres en bordure de la rivière St-Jean. La comparaison de la géochimie de l'eau souterraine de ces puits avec celle des puits du reste du secteur Haldimand permet d'évaluer si la provenance de l'eau captée par les puits d'approvisionnement est similaire à celle présente dans les alluvions ou typique des eaux retrouvées dans l'aquifère rocheux fracturé.

Des prélèvements d'eau de surface ont été effectués à trois endroits; l'échantillonnage et l'analyse des gaz dissous ont cependant été soustraits du programme analytique de base, compte tenu du contact du cours d'eau avec l'atmosphère, ce qui laisse échapper les gaz et d'autres composés volatils.

Au total, le programme d'échantillonnage réalisé par le MDDEFP en 2013 a permis l'échantillonnage de 75 puits résidentiels, 16 puits d'observation (incluant les 3 puits d'alimentation en eau des sites de forage pétrolier), 5 puits de la ville de Gaspé, 3 échantillons d'eau de surface et 3 suintements d'hydrocarbures.

2.2.3.2. Programme analytique spécialisé

Le programme analytique spécialisé se concentre sur les puits d'observation du site Haldimand ainsi que sur le site des futurs puits d'alimentation de la municipalité de Gaspé. Pour ce programme, des puits ont été ciblés pour les différentes analyses. Le tableau A1-2 de l'annexe 1 présente les sites visés dans le cadre du programme analytique spécialisé.

Les gaz nobles, les CFC et le SF₆ ont été analysés à l'Université de Rennes, en France. Ces analyses ont été réalisées pour un total de 20 sites localisés dans le secteur Haldimand et dans le secteur des futurs puits municipaux. Ces analyses ont permis d'estimer la température de recharge (section 4.3.1) ainsi que le temps de résidence de la portion de l'eau souterraine qui a rechargé l'aquifère relativement récemment (moins de 60 ans) [section 4.3.2].

Les analyses isotopiques pour l'activité du tritium (³H) dans l'eau et pour l'activité du carbone-14 (¹⁴C) du carbone inorganique dissous (CID) ont été réalisées par le laboratoire de l'Université de Waterloo et les isotopes stables (δ¹⁸O et δ²H) ont été analysés au laboratoire de l'Université d'Ottawa. Ces trois derniers paramètres n'ont été prélevés que sur les sites où ce prélèvement n'avait pas été réalisé à l'automne 2012 en vue de compléter l'échantillonnage. Les analyses sur le tritium et ¹⁴C donnent des indications sur le temps de résidence de l'eau souterraine dans l'aquifère ainsi que sur le mélange d'eaux récentes et anciennes, qui sont complétées par les analyses des CFC et du SF₆ (section 4.3.2). Les isotopes stables permettent de déterminer si l'eau souterraine est de provenance atmosphérique (précipitations) et de déterminer les mécanismes qui ont pu l'affecter, telle l'évaporation (section 4.3.1).

Pour compléter l'analyse des composés organiques réalisée par la CGC à l'automne 2012, des échantillons ont été prélevés sur les puits d'observation et pour un des futurs puits d'alimentation de la municipalité de Gaspé. Un autre suintement pétrolier (suintement S2) a également été échantillonné aux fins d'analyse des composés organiques par la CGC. Ces analyses permettent de déceler la présence des composés organiques dans l'eau souterraine ou dans les suintements pétroliers et d'en déterminer la nature. Par comparaison avec la composition des hydrocarbures produits par le puits Haldimand n° 1, ces analyses aident aussi à préciser si les hydrocarbures retrouvés dans l'eau souterraine ou les suintements sont de nature semblable ou distincte de celle des hydrocarbures provenant du réservoir pétrolier Haldimand.

2.2.3.3. Analyse des composés organiques par la CGC

L'analyse des composés organiques a été réalisée par le chercheur Jason Ahad au laboratoire de la Commission géologique du Canada à Québec. Cette analyse comprend les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène) ainsi que d'autres COV, les HAP et les OEA. L'analyse des composés organiques a pour objectif de définir le portrait initial de ces composés dans les eaux souterraines peu profondes ainsi que dans les eaux de surface.

Le prélèvement des échantillons a commencé à l'automne 2012 et a pris fin à l'automne 2013, pour un total de 20 échantillons. En 2012, 13 échantillons ont été prélevés par TechnoRem, soit dix échantillons d'eau souterraine prélevés dans des puits d'observation, deux suintements et un échantillon de l'huile produite au puits pétrolier Haldimand n° 1. En 2013, sept échantillons ont été prélevés par le MDDEFP, dont cinq dans les puits d'observation, un dans un futur puits municipal et un suintement. Les sites échantillonnés pour ces analyses sont également documentés dans le tableau A1-2 de l'annexe 1.

2.2.4. Suivi à long terme de la nappe

Les données des trois sondes de lecture de niveau d'eau mis en place par TechnoRem en novembre 2012 ont été téléchargées à l'automne 2013 lors des travaux d'échantillonnage du MDDEFP. Les sondes ont été remises dans les mêmes puits pour poursuivre le suivi, soit les puits POH-11-05, POH-11-06 et POH-11-09. Le suivi de la nappe est décrit en détail à la section 3.5. Les données enregistrées par les sondes de pression permettent de tracer les hydrogrammes de puits présentés à la section 3.5.2.

2.3. Intégration des données dans un système d'information géographique (SIG)

Toutes les données colligées à partir de sources publiques ou des travaux de TechnoRem (2013) ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG – ArcGIS 10.1). Préalablement, ces données ont été numérisées, standardisées et validées afin d'éliminer, notamment, les données incomplètes ou redondantes. Toutes les données SIG produites ont été intégrées dans une base de données géoréférencées (annexe 5) comprenant des entités de type matriciel et de type vectoriel. L'intégration des données dans un SIG a permis d'effectuer diverses analyses spatiales et de produire différentes cartes de base et interprétatives.

Les données sources nécessaires à l'analyse SIG sont présentées au tableau 2-1. Pour chaque donnée, le tableau fournit la description des jeux de données, la source, le système de coordonnées d'origine ainsi que le format donnant des informations sur la nature de ces données. Le système de coordonnées commun utilisé est la projection cartographique UTM (zone 20) dans le système de référence géodésique NAD83-CSRS.

Les tableaux 2-2 et 2-3 présentent le sommaire des données vectorielles et matricielles produites. Ces tableaux fournissent une description des données, le nom du fichier et

une brève description des opérations nécessaires à leur production. Les numéros des cartes sur lesquelles apparaissent les couches sont également indiqués dans les tableaux. Les matrices produites ont une résolution de 100 m sur 100 m. Toutes les couches sont intégrées dans une base de données géoréférencées (annexe 5).

Tableau 2-1 Sommaire des données publiques utilisées

<i>Description des données</i>	<i>Source</i>	<i>Système de coordonnées</i>	<i>Format</i>
Modèle numérique d'élévation (MNE), résolution 10 m par 10 m	MRN	NAD_1983_Quebec_Lambert	Matriciel
Vue ombragée (<i>hill shade</i>) du MNE	MRN	NAD_1983_Quebec_Lambert	Matriciel
Hydrographie	CANVEC - GéoGratis	GCS_North_American_1983_CSRS	Vectorel
Routes et toponymie	CANVEC - GéoGratis	GCS_North_American_1983_CSRS	Vectorel
Géologie et linéaments (failles, plis, etc.)	MRN	NAD_1983_Quebec_Lambert	Matriciel
Géologie du quaternaire, carte quaternaire 1804A	GÉOSCAN	GCS_North_American_1927	Vectorel
Affleurements Brisebois	GÉOSCAN	NAD_1983_UTM_Zone_20N	Vectorel
Forages pétroliers et forages au diamant	MRN	GCS_North_American_1983	Vectorel
Réseau d'aqueduc de Gaspé	Transmis par TechnoRem	NAD83_Zone_5_Metre_Quebec_Newfoundland_and_Labrador_66_63d_W	Vectorel
Pédologie	IRDA	GCS_North_American_1983	Vectorel
Couverture du sol	Geobase	GCS_North_American_1983_CSRS	Matriciel
Données SIH	SIH	NAD_1983_UTM_Zone_19N	Vectorel

Acronymes

GeoBase : Portail de données géospatiales en ligne parrainé par le Conseil canadien de la géomatique (COCG)

GeoGratis : Portail du Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada (RNCAN) pour la diffusion des données géospatiales

GÉOSCAN : Base de données des publications scientifiques du Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada

IRDA : Institut de recherche et développement en agroenvironnement

MRN : Ministère des Ressources naturelles

SIH : Système d'information hydrogéologique (MDDEFP)

Tableau 2-2 Sommaire des données vectorielles produites

<i>Description des données</i>	<i>Nom du fichier</i>	<i>Opérations</i>	<i>N° de carte</i>
Puits d'observation et d'alimentation des forages pétroliers	PuitsObs	Créé à partir d'un tableau de données	4, 5, 9, 11 à 32, 35, 36
Sites des forages pétroliers Pétrolia	SitePetrolia	Créé à partir d'un tableau de données transmis par Pétrolia	1, 3, 5, 9, 10, 12 à 32, 36
Anciens forages pétroliers	AncienPuitsPetrole	Anciens puits pétroliers repositionnés à partir des informations transmises par Pétrolia	3
Sites échantillonnés par le MDDEFP	EchMDDEFP	Créé à partir d'un tableau de données	5
TechnoRem	EchTechnoRem	Créé à partir d'un tableau de données	4
LNA 2008	EchLNA	Créé à partir d'un tableau de données	4
Coupe hydrogéologique AB	CoupeAB	Dessiné dans ArcGIS	1 et 5
Coupe CD modélisée	CoupeCD	Dessiné dans ArcGIS	1 et 35
Région d'étude	RegionEtude	Dessiné dans ArcGIS	1
Prélèvements d'eau de la ville de Gaspé	PriseEauGaspé	Créé à partir d'un tableau de données transmis par le MDDEFP	1 et 5
Lignes de partage des eaux souterraines	LigneBassin	Les lignes de partage ont été interprétées, puis tracées dans ArcGIS	4, 5, 9, 36
Rayon de 2 km du PH-04	Rayon2kmPH-04	<i>Buffer</i> de 2 km du PH-04	4, 5, 11 à 32
Affleurements McGerrigle	AffleurementsRG035	Numérisation des affleurements à partir de la carte de McGerrigle (1950)	7
Données utilisées pour l'interpolation	DonneesHaldimand	Créé à partir d'un tableau de données comprenant toutes les données recueillies	6, 7, 8, 10, 11
Rayon de 300 m des puits résidentiels	Rayon300mPuitsPrive	<i>Buffer</i> de 300 m des puits résidentiels vs PH-04	36

Tableau 2-3 Sommaire des données matricielles produites

<i>Description des données</i>	<i>Nom du fichier</i>	<i>Opérations</i>	<i>N° de carte</i>
Épaisseur des formations quaternaires	Epaisseur	Décrit à la section 3.4.1	6 et 7
Élévation de la surface du roc	TopoRoc	Décrit à la section 3.4.1	8
Piézométrie	Piezo	Décrit à la section 3.4.2	9
Profondeur de la nappe	ProfNappe	Décrit à la section 3.4.2	10
Zones de confinement	Confinement	Décrit à la section 3.4.2	11
<i>Production de la carte de la recharge (carte 16)</i>			
Utilisation du sol	UtilisationSol	Décrit à la section 3.6.2	12
Pentes générées pour le calcul du coefficient de ruissellement	Pente	Décrit à la section 3.6.2	13
Groupes hydrologiques	GroupeHydro	Décrit à la section 3.6.2	14
Coefficient de ruissellement	CN	Décrit à la section 3.6.2	15
Recharge totale	Recharge	Décrit à la section 3.6.2	16
<i>Production des cartes pour l'indice DRASTIC – Aquifère au roc</i>			
Cotes de la profondeur de la nappe	D-Roc	Décrit à la section 3.7.2.1	17
Cotes de la recharge	R-Roc	Décrit à la section 3.7.2.2	19
Cotes des types d'aquifère	A-Roc	Décrit à la section 3.7.2.3	21
Cotes des types de sol	S-Roc	Décrit à la section 3.7.2.4	23
Cotes de la topographie (pente)	T-Roc	Décrit à la section 3.7.2.5	25
Cotes pour la zone vadose	I-Roc	Décrit à la section 3.7.2.6	27
Cotes pour la conductivité hydraulique	C-Roc	Décrit à la section 3.7.2.7	29
Carte de la vulnérabilité	DRASTIC-Roc	Décrit à la section 3.7.3	31
<i>Production des cartes pour l'indice DRASTIC – Aquifère granulaire</i>			
Cotes de la profondeur de la nappe	D-Depot	Décrit à la section 3.7.2.1	18
Cotes de la recharge	R-Depot	Décrit à la section 3.7.2.2	20
Cotes des types d'aquifère	A-Depot	Décrit à la section 3.7.2.3	22
Cotes des types de sol	S-Depot	Décrit à la section 3.7.2.4	24
Cotes de la topographie (pente)	T-Depot	Décrit à la section 3.7.2.5	26
Cotes pour la zone vadose	I-Depot	Décrit à la section 3.7.2.6	28
Cotes pour la conductivité hydraulique	C-Depot	Décrit à la section 3.7.2.7	30
Carte de la vulnérabilité	DRASTIC-Depot	Décrit à la section 3.7.3	32

3. CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

3.1. Unités hydrogéologiques définies par les diagraphies

3.1.1. Levés réalisés par diagraphie

La chercheuse Heather Crow et son équipe de la CGC ont réalisé des diagraphies dans les puits d'observation disponibles à Haldimand entre le 30 octobre et le 19 novembre 2012. Les diagraphies permettent de mesurer différentes caractéristiques des aquifères. Certaines sondes donnent ainsi des indications sur la lithologie (gamma naturel, résistivité, susceptibilité magnétique), ce qui permet de définir des unités et de les corréliser d'un puits à l'autre. Les sondes qualifiées d'hydrogéophysiques (conductivité et température du fluide, débitmètre, diamètreur) donnent des indications sur la nature et l'écoulement des fluides dans les puits, notamment sur les fractures dans lesquelles s'écoule de l'eau souterraine. Finalement, la géocaméra acoustique (*acoustic televiewer*; ATV) donne une image des parois du forage, ce qui permet de déterminer le pendage des lits ou des fractures. Une caméra vidéo permettait aussi de filmer les conditions dans les puits, notamment la présence de bulles ou de particules associées aux venues d'eau. Le débitmètre peut être utilisé dans les conditions naturelles d'écoulement dans un puits ou encore en mettant le puits en pompage pour déterminer les venues d'eau dans le puits au niveau des fractures perméables. À Haldimand, des conditions d'écoulement naturelles (vers le haut ou le bas) suffisantes pour la réalisation des levés avec le débitmètre ont été rencontrées dans tous les puits sauf un, PH-02, dans lequel les levés ont été réalisés en mettant le puits en pompage.

Les travaux réalisés et leurs résultats sont documentés dans un dossier public de la CGC (Crow et al., 2014) [rapport disponible à l'annexe 4]. Le tableau 3-1 présente un résumé des sondes qui ont été utilisées dans les différents puits. À cause de l'instabilité des parois de certains puits d'observation, des tubages crépinés en PVC ont été installés dans trois des puits par TechnoRem (2013). Le nombre de sondes utilisables était restreint dans les puits où ces tubages étaient installés.

Comme montré au tableau 3-1, un programme très complet de diagraphies a été réalisé sur la majorité des puits d'observation d'Haldimand. Certains puits n'ont pas fait l'objet de diagraphies, car ils étaient inaccessibles pour le véhicule de diagraphie à cause des conditions météorologiques défavorables (fortes pluies).

L'annexe du rapport de Crow et al. (2014) [voir le rapport complet à l'annexe 4] présente l'ensemble des diagraphies mesurées pour chaque puits individuellement, de même que l'installation du puits et les descriptions des déblais de forage faites par TechnoRem (2013). Puisque le *televiewer* ne fournit qu'une image de la paroi du forage, il est nécessaire d'interpréter la nature des structures qui sont repérées par la sonde. Le tableau 3-1 indique les catégories de structures qui ont été recensées. Les orientations de ces structures sont données par rapport au nord magnétique. Crow et al. (2014) présentent une analyse détaillée des orientations des différentes structures ainsi repérées.

Tableau 3-1 Diagraphies réalisées dans les puits d'Haldimand (d'après Crow et al., 2014)

Numéro du puits	O / PVC	Diagraphies								Vidéo
		Structure	Hydrogéophysique				Lithologie			
		ATV (et diam.)	Débit	Cond.	T	Susc. mag.	Gam. nat.	Rés. ind.	Rés.	
PH-01	O	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PH-02	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PH-04	PVC				✓	✓	✓	✓		✓
POH-11-02	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-03	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-04	PVC				✓	✓	✓	✓		
POH-11-05	O	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-06	O	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-09	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-10	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-12	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-14	O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POH-11-15	PVC				✓	✓	✓	✓		

Abréviations : O : forage ouvert au roc; PVC : forage tubé au roc avec une crépine en PVC; ATV : *Acoustic Televiewer* (géocaméra acoustique); Diam. : diamètre (*caliper*); Débit : débitmètre (*flowmeter*); Cond : conductivité du fluide; T : température du fluide; Susc. mag. : susceptibilité magnétique; Gam. nat. : gamma naturel spectral. Rés. ind. : résistivité par induction électromagnétique; Rés. : résistivité avec électrode à garde; Vidéo : caméra vidéo.

Tableau 3-2 Classification des structures observées par *televiewer* (d'après Crow et al., 2014). 'F' (*flow*) indique que la fracture est coulante et 'NF' (*no-flow*) indique qu'aucun débit n'a été mesuré à partir de la fracture

Type de structure	Sous-type de structure	Exemple	Code structural
Zone brisée	Avec écoulement	Jonction de fractures, zone de faiblesse	BZ-F 
	Sans écoulement		BZ-NF 
Fracture ouverte	Avec écoulement	Joint ouvert, plan ouvert entre des lits	O-F 
	Sans écoulement		O-NF 
Structure fermée	Parallèle	Litage, foliation Joint à grand angle	Cpl 
	Perpendiculaire		Cpr 

3.1.2. Unités hydrogéologiques et fracturation naturelle

Sur la base des diagraphies gamma naturel, résistivité et susceptibilité magnétique, deux horizons marqueurs pouvant être reconnus dans tous les puits d'observation du secteur Haldimand ont été décelés (Crow et al., 2014). Du haut vers le bas, ceci a permis la définition de trois unités lithologiques aux caractères distincts :

- Unité 3 : grès fin à moyen; la nature de sa fracturation ne peut être précisée, car elle n'a été reconnue que dans quatre puits;
- Unité 2 : grès grossier à moyen à sa base, qui devient plus fin dans sa partie supérieure;
- Unité 1 : grès fin à très fin et mudstones, avec des intervalles de grès plus grossier.

La fracturation dans les unités 1 et 2 peut être considérable et semble contrôlée non pas par la lithologie, mais surtout par la profondeur par rapport à la limite supérieure du roc (section 3.2.2.1). La section suivante décrit la structure des unités géologiques et leur fracturation naturelle, près de la surface et en profondeur, à l'aide des données produites par les diagraphies ainsi que d'autres données.

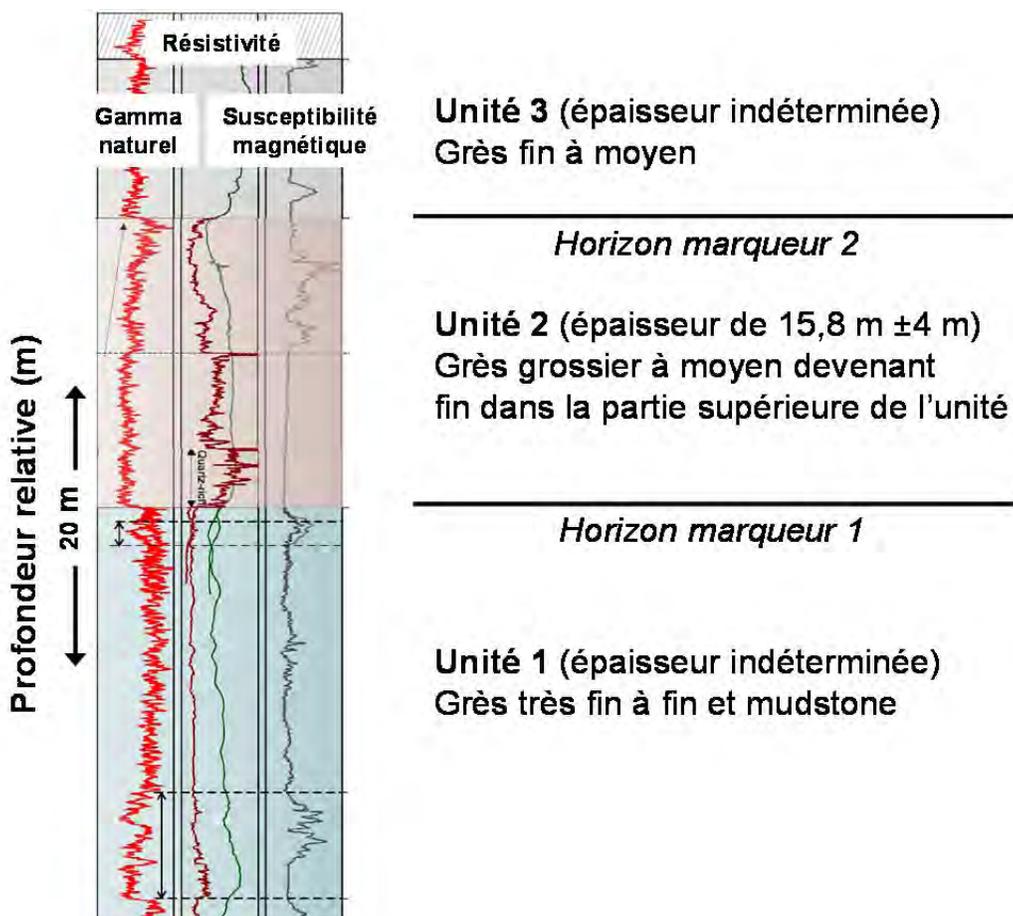


Figure 3.1 Définition des unités géologiques sur la base des diagraphies (modifiée de Crow et al., 2014; voir l'annexe 4)

3.2. Structure et fracturation naturelle à Haldimand

3.2.1. Sources et traitement des données

En plus des données fournies par les diagraphies réalisées par la CGC dans les puits d'observation décrites à la section précédente (Crow et al., 2014; annexe 4), des données structurales ont été mises à notre disposition par la compagnie Pétrolia. Les données comprennent des relevés de structures sur le terrain (stratification, clivage, orientation des plans de fractures mesurés sur ces affleurements) ainsi que des données de fracturation naturelle et de stratification obtenues à partir des diagraphies avec le *Formation Microimager* (FMI) dans le puits Pétrolia Haldimand n° 2. Les données de terrain ont été relevées le long de la rive sud de la baie de Gaspé, à Haldimand et à Tar Point. Quant aux données de FMI, elles couvrent un intervalle comprenant les formations de Battery Point et de York River à des profondeurs comprises entre 220 et 1 200 m environ.

Les données structurales résultant de l'interprétation des diagraphies et celles obtenues lors des relevés effectués par Pétrolia ont été simultanément interprétées. L'objectif de cette analyse est de définir la géométrie et l'hydraulique des fractures dans la zone d'étude, tant dans l'aquifère superficiel qu'en plus grande profondeur. Puisque certains ensembles de fractures peuvent agir comme des zones d'écoulement préférentiel, une compréhension globale de la géométrie et de la connectivité des réseaux de fractures peut apporter des éléments de réponse importants concernant l'existence potentielle de liens hydrauliques verticaux entre le réservoir pétrolier en profondeur et l'aquifère situé près de la surface.

Lors de la mesure de structures le long d'une ligne donnée (un puits ou une ligne de traverse rectilignes), les familles de fractures obliques par rapport à l'orientation du relevé sont interceptées moins souvent que celles qui y sont perpendiculaires. Dans de tels cas, les fréquences mesurées des différentes familles de fractures ne sont que partiellement représentatives de la masse rocheuse examinée. Ce biais directionnel de l'échantillonnage peut partiellement être compensé par la correction de Terzaghi (Terzaghi, 1965). Cette correction permet d'attribuer un poids à chaque fracture en fonction de son orientation par rapport à la direction du relevé afin d'établir une fréquence plus réaliste de chaque famille de fractures rencontrée. Dans le cas d'un relevé d'azimut φ_l (degrés par rapport au nord) et de pendage γ_l , le poids p est proportionnel à l'inverse du cosinus de l'angle δ entre la ligne de traverse et le pôle de la fracture de direction (*strike*) φ et de pendage γ (Terzaghi, 1965) :

$$p = \frac{1}{\cos(\delta)}$$

Avec

$$\cos(\delta) = |\cos(\gamma_l) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\varphi_l - \varphi) - \sin(\gamma_l) \cdot \cos(\gamma)|$$

Dans le cas d'un puits vertical de faible diamètre ($\gamma_l=90^\circ$), l'expression se simplifie et devient :

$$\cos(\delta) = \cos(\gamma) \text{ et ainsi } p = \frac{1}{\cos(\gamma)}$$

L'application de cette correction devient problématique lorsque les fractures sont subparallèles à l'orientation du relevé. Dans un tel cas, le poids attribué à ces fractures peut devenir beaucoup trop important; il est alors nécessaire d'introduire une limite maximale à la correction de Terzaghi (Priest, 1993). Pour la présente étude, la correction a été effectuée selon l'équation présentée ci-dessous jusqu'à un angle δ de 85° , ce qui correspond à un poids maximal $p_{max} = 1/\cos(85^\circ) \approx 11,5$. Les fractures formant un angle δ supérieur à 85° se sont vu attribuer un poids nul.

Dans le cas du relevé de fracturation en surface effectué par Pétrolia, la plupart des données ont été récoltées le long de la rive sud de la baie de Gaspé (nord de la péninsule d'Haldimand). Ainsi, une orientation de ligne de traverse horizontale correspondant à l'orientation moyenne de la rive (N140/00) a été choisie pour la correction de Terzaghi sur ces données. Une ligne verticale ($\gamma_l=90^\circ$) a été utilisée pour la correction des données obtenues à partir des diagraphies dans les puits d'observation. Les données du FMI n'ont pas été corrigées pour l'orientation du puits afin de mieux visualiser les différentes familles de fractures présentes. Les données brutes du FMI sont jointes à l'annexe 5 (fichier : Données FMI.xlsx).

3.2.2. Caractéristiques des structures et fractures

3.2.2.1. Conditions près de la surface

Les figures servant à l'interprétation des données structurales ont été réalisées à l'aide du logiciel Stereo32 (Röller et Trepman, 2013). Des projections à aires égales sur l'hémisphère inférieur sont représentées. Toutes les orientations de plans sont données en azimut de direction du plan (*strike*) et en pendage (*dip*) selon la règle de la main droite, par rapport au nord géographique (Ramsay et Huber, 1983).

Des stéréogrammes représentant l'orientation des pôles des fractures pour chaque puits d'observation obtenus à partir des diagraphies (Crow et al., 2014; annexe 4) et pour les relevés de fracturation de terrain sont représentés à l'annexe 5. Des stéréogrammes représentant toutes les fractures hydrauliquement actives, les fractures ouvertes et toutes les fractures sont également montrées à la figure 3.2.

Les données de stratification récoltées à Haldimand et à Tar Point mettent en évidence deux concentrations de pôles, représentant chacune les flancs d'un pli régional déjeté vers le nord, avec un axe subhorizontal orienté E-O (N089/04). Ces observations sont caractéristiques du grain structural régional, caractérisé par des plis d'orientation E-O à ONO-ESE (voir la section 1.3.2.2).

La projection de toutes les données de fracturation sur des stéréogrammes met en évidence une grande variabilité dans la fracturation rencontrée dans les différents puits. Cependant, les données globales permettent de définir quelques familles principales de fractures dans la zone d'étude (figure 3.2) :

- Une famille de fractures subhorizontales (S1);

- Un ensemble de fractures subverticales à verticales d'orientation NE-SO, représenté par les groupes S3 et S5. La famille S3 est subperpendiculaire aux strates du flanc sud du pli régional;
- Un groupe de fractures subverticales d'orientation NO-SE, représenté par les groupes S2a, S2b et S4.

Les fractures subhorizontales de la famille S1 sont possiblement des fractures de décompression superficielle, qui sont des fractures d'extension formées par relâchement de la contrainte verticale (lithostatique) lors de l'exhumation des roches, ou encore suivant une déglaciation (Blès et Feuga, 1981; Goodman, 1993). La famille S3 est perpendiculaire aux strates et pourrait représenter des fractures d'extension qui se seraient formées lors de l'enfouissement des roches (Ramsay et Huber, 1983), précédant donc toute phase de plissement acadien. Les fractures subverticales des groupes S2, S4 et S5 peuvent quant à elles être des fractures associées au raccourcissement N-S lors du plissement. Le tableau 3-3 présente l'orientation des différentes familles de fractures définies à partir des relevés de terrain et des diagraphies dans les puits d'observation.

Les fractures hydrauliquement actives sont en majorité subhorizontales et appartiennent au groupe S1. Cependant, il est important de noter que les groupes principaux à pendage élevé S3 et S5 comptent également un certain nombre de ces fractures. En plus, deux familles accessoires H1 et H2 peuvent être définies si seules les données de fractures coulantes sont considérées (figure 3.3).

Tableau 3-3 Orientations des différentes familles de fractures définies à partir des relevés de terrain et des diagraphies dans les puits d'observation

<i>Famille</i>	<i>Direction φ (°)</i>	<i>Pendage γ (°)</i>
S1	Horizontal	0
S2a	312	87
S2b	337	77
S3	033	79
S4	129	87
S5	235	75
H1	085	55
H2	340	60

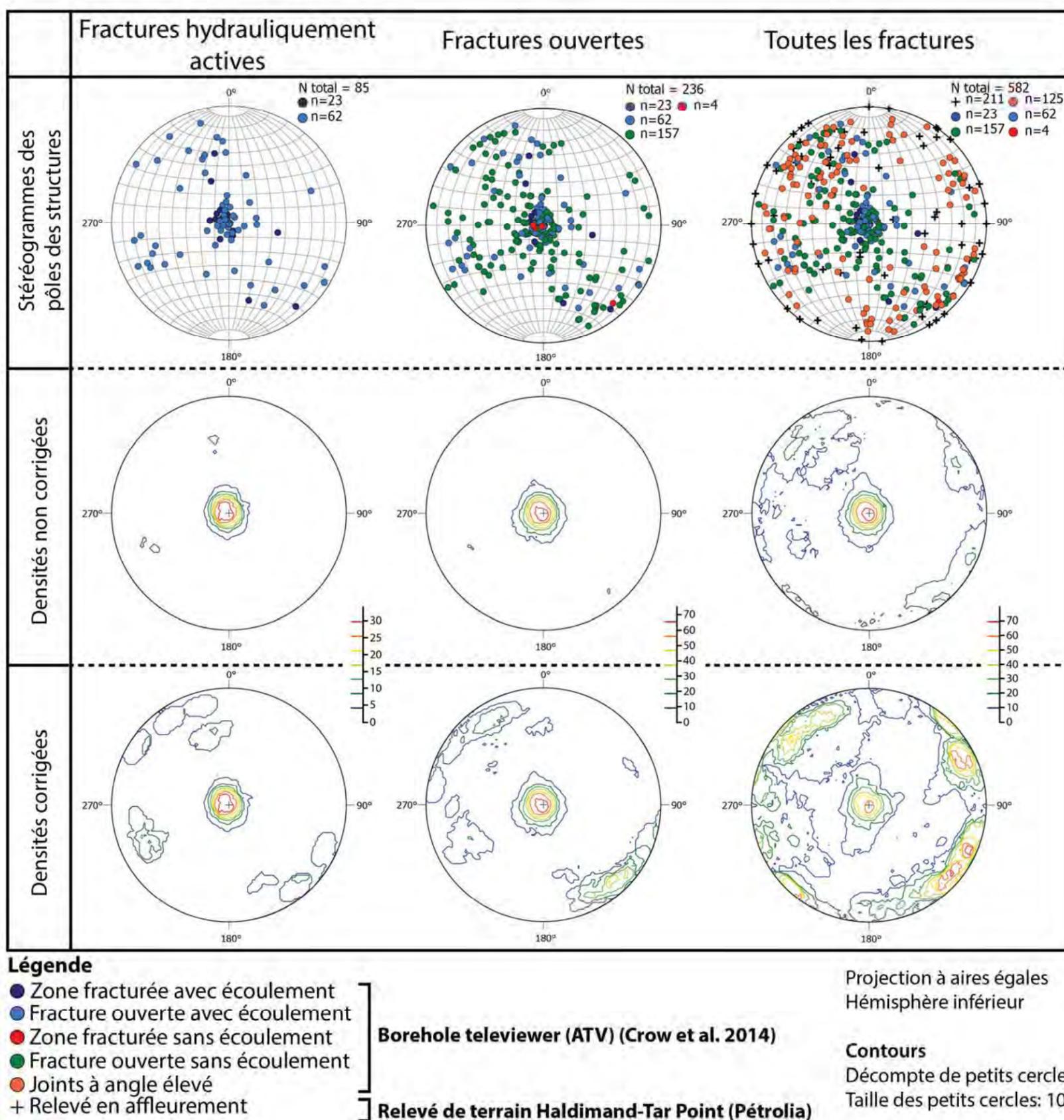


Figure 3.2 Stéréogrammes des structures géologiques superficielles observées dans la région d'Haldimand

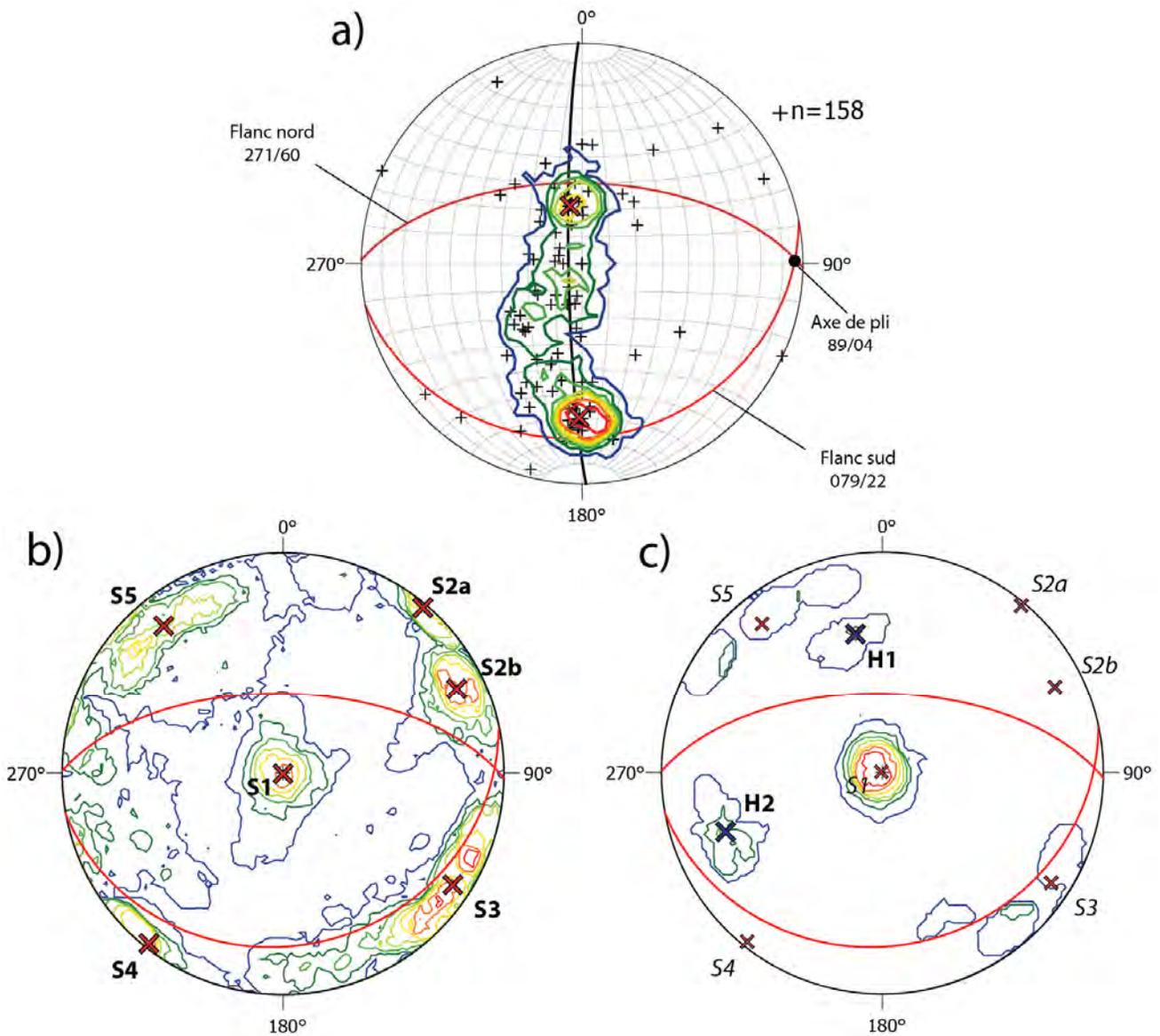


Figure 3.3 a) Projection des données non corrigées de stratification (S_0) obtenues sur le terrain à Haldimand et à Tar Point définissant l'orientation d'un pli et de ses flancs; b) Définition des familles de fractures S1 à S5 à partir des pôles de densité de toutes les structures observées dans les puits d'observation et sur le terrain; c) Définition des familles H1 et H2 à partir des pôles de densité des fractures hydrauliquement actives. Les traces des deux flancs du pli défini par la stratification sont superposées aux données de densité. Les densités ont été calculées à partir des données corrigées pour l'orientation.

Des intensités de fracturation, non corrigées pour l'orientation des structures, ont été calculées en fonction de la profondeur sous la surface du roc à partir des données obtenues dans tous les puits d'observation à l'aide des diagraphies ATV (Crow et al., 2014) afin de mettre en évidence la distribution de la fracturation dans les premiers mètres de l'aquifère rocheux fracturé. Ces intensités sont calculées par le décompte du nombre de fractures dans une fenêtre mobile de 10 m de hauteur, et calculées à chaque mètre. Les intensités sont également normalisées par rapport au nombre de puits présents dans l'intervalle de profondeur étudié.

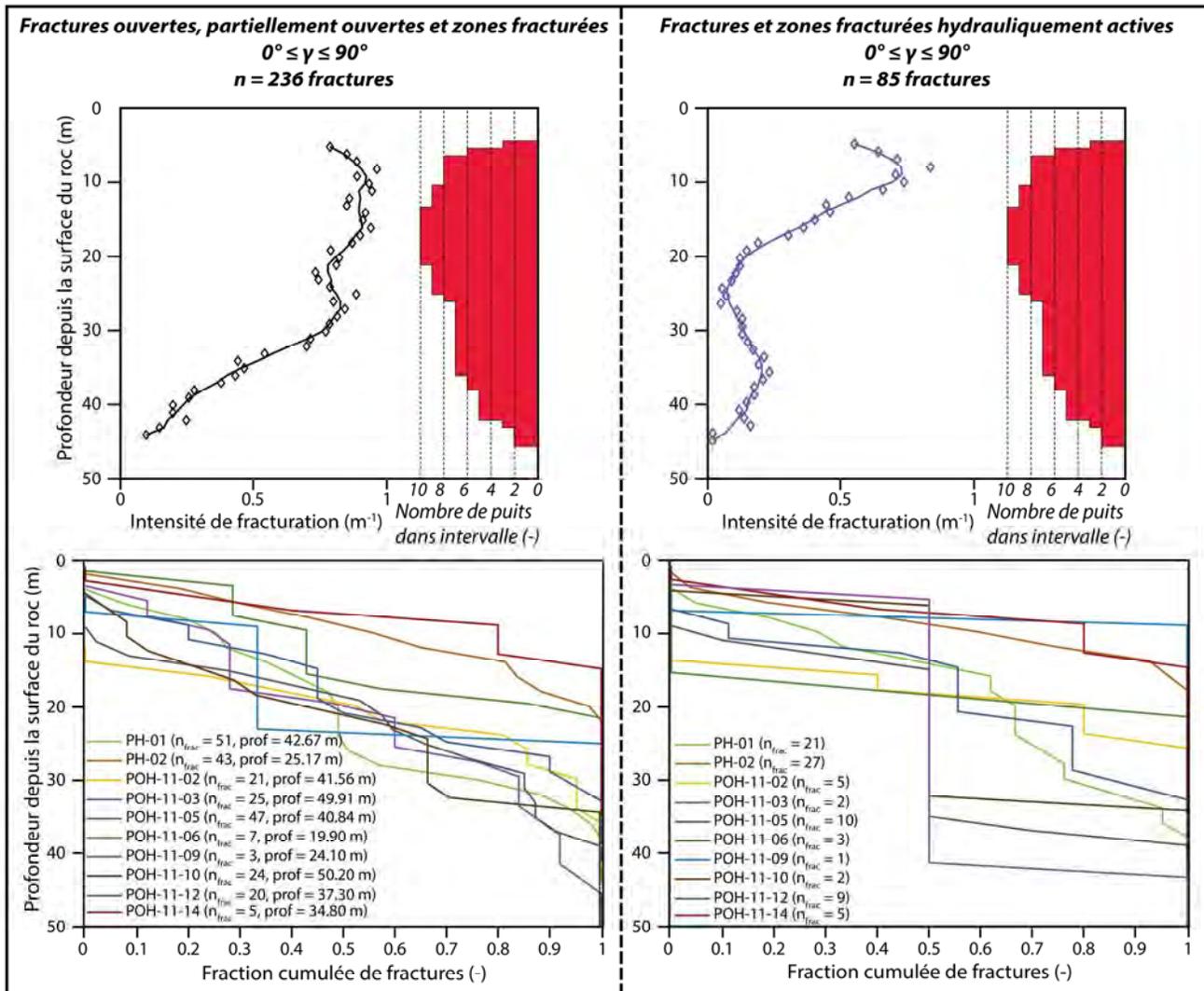


Figure 3.4 Intensités de fracturation et fractions cumulées des fractures en fonction de la profondeur obtenues des diagraphies ATV. Les densités de fracturation sont calculées pour tous les puits et normalisées par rapport au nombre de puits dans chaque intervalle.

Comme l'illustre la figure 3.4, l'intensité de fracturation pour les fractures ouvertes et les zones fracturées de toute orientation reste globalement constante jusqu'à environ 30 m de profondeur, suivi d'une baisse de l'intensité en dessous de ce niveau. Quant aux

structures hydrauliquement actives, l'intensité de fracturation est la plus forte dans les 15 m supérieurs du roc. Bien qu'il y ait une légère augmentation de l'intensité entre 30 et 40 m de profondeur, essentiellement due aux fractures dans le puits PH-01, la majorité (environ 75 %) de ces fractures se situe dans les 20 premiers mètres de profondeur sous la surface du roc.

Si seules les structures ouvertes et/ou hydrauliquement actives subhorizontales ($\gamma < 30^\circ$) sont considérées, une baisse générale de l'intensité de la fracturation avec la profondeur est également observée (figure 3.5). Il est cependant important de noter que les patrons de fracturation (intensité, expression des différentes familles observées, etc.) sont très variables d'un puits à l'autre et que les données d'intensité globales présentées ici ne sont qu'indicatives. Il est néanmoins clair que la plupart des puits exhibent une plus grande intensité de fracturation dans les premiers mètres et une intensité moindre en profondeur.

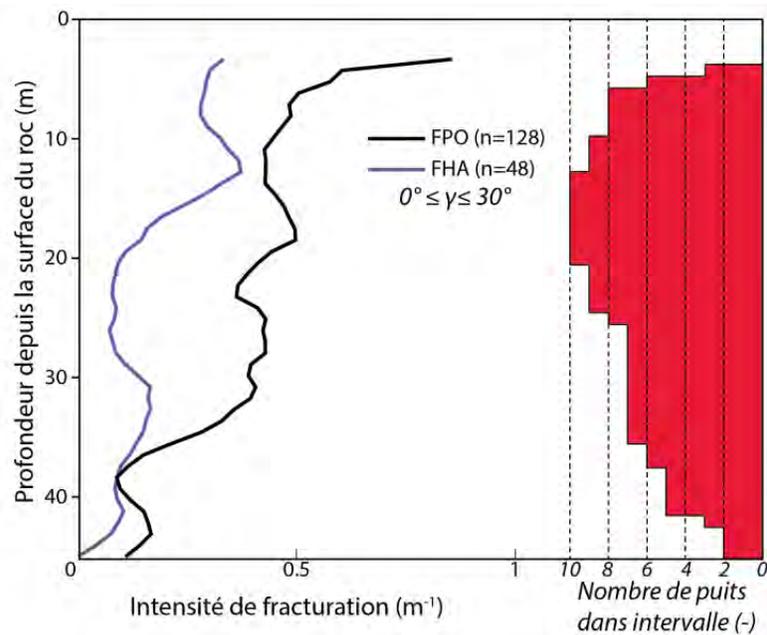


Figure 3.5 Intensités de fracturation des fractures subhorizontales ($\gamma < 30^\circ$) ouvertes, partiellement ouvertes et hydrauliquement actives observées avec les diagraphies ATV. FPO : Fractures ouvertes et partiellement ouvertes; FHA : Fractures hydrauliquement actives

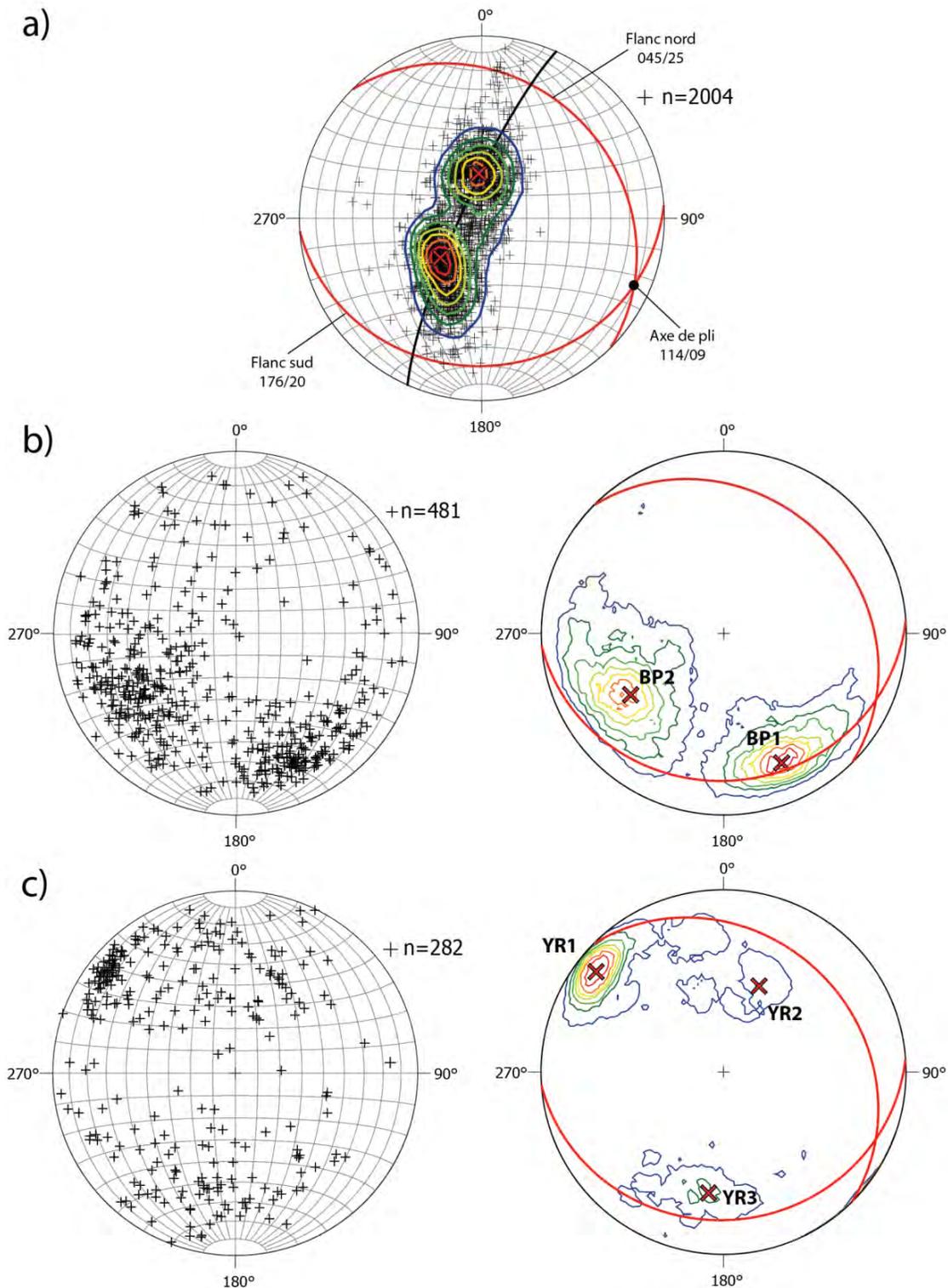


Figure 3.6 Projections stéréographiques des données structurales obtenues à partir du FMI dans le forage Haldimand n° 2. a) Données de stratification (S_0) dans le Battery Point et le York River; b) Données de fracturation dans le Battery Point; c) Données de fracturation dans le York River. La correction de Terzaghi n'a pas été appliquée lors du calcul des lignes de contour.

3.2.2.2. Conditions en profondeur

Les données de stratification obtenues à partir du FMI sur l'ensemble du puits Haldimand n° 2 montrent deux amas principaux de pôles de stratification représentant les flancs d'un pli avec un axe orienté ONO-ESE, légèrement plongeant vers l'ESE (N114/09). Ces données reflètent encore une fois la structure régionale, caractérisée par des plis d'orientation E-O à ONO-ESE.

Les données de fracturation sont présentées séparément pour le Battery Point et pour le York River. Dans la formation du Battery Point, deux ensembles principaux de fractures, nommés ici B1 et B2, peuvent être distingués (tableau 3-4). Ces familles de fractures orthogonales sont subperpendiculaires aux strates du Battery Point. Comme les fractures des groupes S2a et S2b dans le roc superficiel, ces structures seraient des fractures d'extension formées avant tout plissement.

Tableau 3-4 Orientations des familles de fractures du Battery Point définies à partir des données de FMI

<i>Famille</i>	<i>Direction φ (°)</i>	<i>Pendage γ (°)</i>
B1	243	67
B2	333	62

Dans le York River, une famille principale (YR1) et deux familles accessoires (YR2 et YR3) sont présentes (tableau 3-5). La famille YR1 est subverticale et pourrait représenter des fractures formées lors de la formation du pli ONO-ESE. Les familles YR2 et YR3 sont subperpendiculaires aux flancs nord et sud, respectivement, du pli défini par les données de stratification dans le puits. Comme les fractures des familles B1 et B2 dans le Battery Point, ces fractures peuvent représenter des fractures d'extension formées avant toute phase de plissement.

Tableau 3-5 Orientations des familles de fractures du York River définies à partir des données de FMI

<i>Famille</i>	<i>Direction φ (°)</i>	<i>Pendage γ (°)</i>
YR1	037	78
YR2	112	48
YR3	277	59

3.2.2.3. Implications des conditions de fracturation

Les données structurales récoltées dans la région d'étude révèlent un système caractérisé par une géométrie de fracturation complexe et variable avec la profondeur. Néanmoins, la majorité des familles de fractures rencontrées appartient à trois grands ensembles définis par rapport à leur origine tectono-structurale :

- Des fractures d'exhumation superficielle subhorizontales, rencontrées uniquement dans l'aquifère rocheux superficiel;

- Des fractures d'extension perpendiculaires aux strates, vraisemblablement formées avant tout plissement;
- Des fractures subverticales recoupant le pli, formées pendant ou après le raccourcissement relié au plissement.

Le roc superficiel est essentiellement caractérisé par des fractures subhorizontales et des fractures à pendage élevé d'orientation NO-SE et NE-SO. Bien que majoritairement subhorizontales, un certain nombre des fractures hydrauliquement actives appartient à des familles de fractures à pendage élevé. Les données du FMI montrent que la géométrie de la fracturation en profondeur diffère de celle observée en surface. Seules les familles de fractures subverticales et celles qui sont perpendiculaires aux strates sont présentes à plus de 200 m de profondeur. La disparition de la fracturation subhorizontale observée dans les formations profondes est attendue, dans la mesure où les fractures d'exhumation superficielles sont généralement présentes seulement à moins de 100 m de profondeur (Goodman, 1993).

Les données structurales permettent de formuler des hypothèses sur l'existence de voies de cheminement préférentiel entre les zones profondes et l'aquifère superficiel par le réseau de fractures présent à Haldimand. Dans l'aquifère superficiel, les données hydrauliques indiquent que la majorité des familles de fractures observées sur le terrain transmet activement des fluides. Cependant, cette partie du roc est caractérisée par un réseau de fractures complexe et très développé, où l'intersection des structures d'orientations et de pendages variables engendre une connectivité importante des différentes familles de fractures observées. La diminution de l'intensité de la fracturation, notamment subhorizontale, avec la profondeur pourrait se refléter par une décroissance de la connectivité du réseau de fractures et donc de la perméabilité globale du roc. L'absence presque totale de fracturation subhorizontale en profondeur peut avoir un effet sur la connectivité des fractures qui s'y retrouvent. En effet, puisque la grande majorité des fractures présentes en profondeur a des pendages élevés, il est peu probable qu'une connectivité significative des différentes familles puisse se développer sur de grandes distances verticales.

Ainsi, la variabilité observée de la géométrie de la fracturation avec la profondeur tend à montrer que le réseau de fractures seul constitue difficilement une voie de cheminement préférentiel entre les formations profondes et les zones superficielles. La présence probable de quantités potentiellement économiques d'hydrocarbures dans le réservoir fracturé sur des échelles de temps géologiques ainsi que les pressions de fluide élevées rencontrées dans le réservoir (voir la section 3.8.3) tendent à appuyer de telles conclusions.

Cependant, les structures de plus grandes dimensions, telles les failles de décrochement présentes dans la zone d'étude sur de grandes distances verticales (faille Haldimand, faille du Bras Nord-Ouest; figure 1.2), pourraient agir comme des conduits verticaux perméables. En effet, ces structures ont été associées à des suintements d'hydrocarbures et parfois à des venues d'eaux salées (Parks, 1929; McGerrigle, 1950), témoignant d'un apport possible de zones plus profondes. Néanmoins, ces informations seules ne permettent pas de se prononcer sur la profondeur à laquelle ces failles peuvent agir comme des zones perméables. En effet,

des indices de pétrole en place et d'eaux salées ont déjà été retrouvés à des profondeurs relativement faibles (< 100 m) à Haldimand (p. ex., puits Conant, SB1, SB2) [Théroux, 1987]. Ainsi, les fluides retrouvés à proximité des failles de décrochement acadiennes peuvent provenir de zones relativement peu profondes et ne sont pas nécessairement des indicateurs de l'existence de liens hydrauliques avec les formations géologiques plus en profondeur.

Une interaction entre le système de fracturation développé dans l'aquifère rocheux superficiel et les failles majeures est envisageable. Dans le cas où les failles agiraient comme des zones d'écoulement préférentiel, d'éventuels contaminants migrants par celles-ci pourraient se retrouver dans des zones qui ne sont pas immédiatement adjacentes à de telles structures si des gradients hydrauliques latéraux existent en proche surface. Ainsi, dans un tel scénario, l'aire de vulnérabilité des eaux souterraines ne serait pas restreinte aux secteurs à proximité de failles majeures. Cependant, il est important de noter que les données structurales et hydrauliques récoltées dans le cadre du présent projet ne permettent pas d'évaluer clairement les caractéristiques hydrauliques des failles retrouvées à Haldimand en profondeur.

3.3. Propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux

Les propriétés hydrauliques globales de l'aquifère rocheux ont été estimées à partir d'essais de pompage *in situ* réalisés par TechnoRem dans les puits d'observation. Des analyses de porosité et de perméabilité réalisées sur des carottes prises lors du forage de deux puits d'observation ont aussi permis d'évaluer les propriétés hydrauliques de la matrice poreuse du milieu poreux et fracturé que constitue l'aquifère rocheux.

3.3.1. Essais hydrauliques dans les puits d'observation

TechnoRem (2013) a réalisé différents types d'essais hydrauliques afin de caractériser les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux fracturé du secteur Haldimand : un essai de perméabilité (POH-11-10), 15 essais de pompage de courte durée généralement de l'ordre d'une heure (PH-01, PH-02 et PH-04, POH-11-02 à POH-11-05, POH-11-07 à POH-11-09, POH-11-11 à POH-11-15) et un essai de pompage de longue durée d'environ 73 heures dans un puits (POH-11-06). Puisque le puits POH-11-06 est coulant, l'essai n'a pas nécessité de pompage, mais un contrôle du débit naturel de ce puits, qui a été en moyenne de 175 m³/jour (32,1 gal US/min) durant l'essai. Au cours de cet essai, le niveau d'eau a été suivi dans le POH-11-06 ainsi que dans 16 puits d'observation, mais TechnoRem conclut que les niveaux d'eau dans les puits d'observation n'ont pas réagi au pompage.

Les essais de pompage de courte durée réalisés par TechnoRem (2013) ont donné une moyenne géométrique des valeurs estimées de conductivité hydraulique de l'ordre de 1×10^{-6} m/s (détails au tableau 4-2 de TechnoRem, 2013; voir l'annexe 2). L'interprétation de l'essai de pompage de longue durée avec les méthodes de Jacob-Lohman et Cooper-Jacob ont donné, respectivement, des valeurs de transmissivité de $7,1 \times 10^{-4}$ m²/s et de $1,4 \times 10^{-4}$ m²/s et des conductivités hydrauliques équivalentes de $2,2 \times 10^{-5}$ m/s et de $4,3 \times 10^{-6}$ m/s. Le puits POH-11-06 apparaissait exceptionnellement

productif par rapport aux autres puits d'observation et l'essai réalisé à ce puits donne possiblement la limite supérieure de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux fracturé dans le secteur Haldimand.

3.3.2. Essais de porosité et perméabilité sur des carottes

Respectivement, six et sept échantillons des carottes prélevées lors du forage par carottage des puits POH-11-03 et POH-11-10 ont été transmis à Core Lab (Calgary) pour y faire réaliser des essais de porosité et perméabilité ainsi que monter des lames minces pour observations microscopiques. Des sous-échantillons cylindriques (*plugs*) ont été prélevés perpendiculairement à l'élongation des carottes, nettoyés et séchés. Un perméamètre à l'air a été utilisé pour la mesure de la perméabilité horizontale à l'air. La porosité a été mesurée avec un porosimètre à l'hélium sur le principe de la loi de Boyle. La mesure de la masse et de la dimension des échantillons a aussi permis l'estimation de la densité globale des échantillons de même que de la densité des solides. Les échantillons ont aussi été décrits visuellement. Les profondeurs des échantillons provenant des deux puits et les résultats des analyses sont présentés à l'annexe 2.

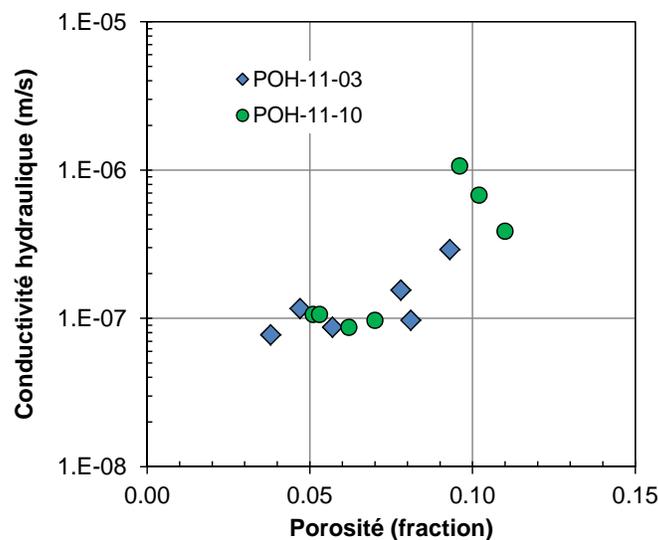


Figure 3.7 Relations entre la porosité et la conductivité hydraulique pour la matrice de l'aquifère rocheux fracturé à partir des analyses de carottes (résultats à l'annexe 2)

Les résultats de ces mesures sont illustrés à la figure 3.7. Cette figure a nécessité la conversion des perméabilités à l'air en conductivité hydraulique. Il n'y a pas eu de corrections aux mesures de perméabilité à l'air pour l'effet Klinkenberg, ce qui implique que les valeurs de conductivité hydraulique peuvent être surestimées. La figure montre que la porosité est relativement élevée dans la matrice du roc, qui est de l'ordre de 5 à 10 %. La porosité de fracture n'est pas susceptible d'ajouter beaucoup à la porosité totale de l'aquifère rocheux, mais ce sont ces fractures qui vont contrôler l'écoulement, tel que le démontrent les diagraphies réalisées dans les puits. Cependant, une porosité aussi importante signifie que les temps de résidence de l'eau souterraine pourraient être relativement longs, malgré la taille modérée du secteur Haldimand. Ceci est confirmé par le niveau d'évolution géochimique important de certains types d'eau et

surtout par les âges ^{14}C importants de l'eau souterraine, bien que les corrections applicables à ces âges puissent en diminuer la magnitude (Clark et Fritz, 1997) [section 4.3.2]. Pour ce qui est de la perméabilité, les valeurs pour la matrice sont importantes, mais la très faible dimension des pores devrait induire de très fortes capacités de rétention.

3.4. Cartes et coupes hydrogéologiques

Plusieurs cartes ont été réalisées afin d'établir un portrait du contexte hydrogéologique du secteur Haldimand. La présente section décrit la méthodologie utilisée pour la production de chacune de ces cartes, lesquelles sont incluses à la fin du rapport.

3.4.1. Épaisseur des dépôts quaternaires et topographie du roc

La carte d'épaisseur des sédiments quaternaires (carte 6) a été interpolée par krigeage ordinaire à l'aide du logiciel SGeMS (Boucher, 2013) sur la base des descriptions de forage indiquant la profondeur du roc sous les dépôts meubles. Les paramètres d'interpolation ont été optimisés par validation croisée afin que l'estimation soit sans biais (moyenne des erreurs de 0,02 m), tout en minimisant la moyenne des erreurs au carré. Les points noirs sur les cartes 6, 7 et 8 correspondent aux données de profondeur au roc qui ont été utilisées pour estimer l'épaisseur des dépôts. Ces données comprennent les données de profondeur de tous les forages utilisés (17 puits d'observation, 34 ouvrages municipaux, 6 puits résidentiels (LNA, 2008), 107 forages SIH, 36 forages pétroliers du SIGPEG et 50 forages au diamant du SIGÉOM), les données de 53 affleurements localisés par Brisebois (2001) ainsi que trois données d'affleurements de McGerrigle (1950). Trois forages ont été éliminés pour lesquels les données ne pouvaient pas être validées. Le puits pétrolier POT2 (SIGPEG_C036) foré en 1890 ainsi que deux puits SIH (SIH_10 et SIH_38) ne concordaient pas avec les données quaternaires disponibles. Afin de combler l'absence de données dans des zones sans information, des points correspondant aux données quaternaires ont été ajoutés, soit des valeurs de 0 m dans les zones de roc altéré et de 1 m dans les zones de till mince. Les données d'épaisseur ont été corrigées pour éliminer les épaisseurs interpolées négatives. La carte 7 présente les points de contrôle sur les épaisseurs qui ont permis de valider les épaisseurs obtenues par interpolation. Ces contrôles comprennent les affleurements inventoriés par Brisebois (2001) et McGerrigle (1950) ainsi que les zones de dépôts de moins de 1 m d'épaisseur extraites de la carte de la géologie des formations en surface de Veillette et Cloutier (1993).

Sur l'ensemble de la région d'étude, les secteurs présentant des dépôts meubles épais se trouvent généralement près des vallées et des rivières. Les dépôts les plus épais se situent au sud, à l'embouchure de la rivière St-Jean, avec une épaisseur pouvant atteindre plus de 20 m. Les secteurs de dépôts minces sont majoritairement localisés près des hauts topographiques au centre de la péninsule. Ces hauts constituent potentiellement des zones de recharge préférentielle (voir la section 3.6).

La carte 8 présente l'élévation de la surface du roc par rapport au niveau moyen de la mer. Cette carte a été réalisée à partir de la soustraction de la topographie du terrain

donnée par le modèle numérique de terrain (MNT; cartes 1 et 5) et de l'épaisseur des dépôts quaternaires (carte 6). Cette opération a été réalisée dans ArcGIS à l'aide de la calculatrice *Raster*. La carte a été corrigée pour s'assurer que la surface du roc obtenue de ces opérations ne dépasse pas la topographie du terrain.

La topographie du roc est assez semblable à celle de la surface du sol, mais elle est un peu plus accentuée parce que les principales dépressions dans la surface du roc sont comblées de dépôts meubles. On retrouve trois crêtes élevées aux surfaces irrégulières d'orientation générale nord-ouest/sud-est, séparées par des dépressions où se retrouvent les cours d'eau.

3.4.2. Piézométrie et conditions de confinement

La piézométrie a été définie à partir des mesures de niveau d'eau relevées dans 17 puits d'observation en septembre 2013, ainsi que des 108 mesures tirées du SIH, des mesures prises dans 34 ouvrages de la municipalité de Gaspé comprenant quatre puits d'alimentation (Arrakis, 2011) et des mesures prises en 2008 dans 89 puits résidentiels par la firme Laforest NovaAqua (LNA, 2008). Une contrainte manuelle a été ajoutée au système de krigeage par analogie avec le haut topographique afin de limiter les effets de ce haut dans le centre de la péninsule où il n'y a pas de données. Toutes les valeurs ont été ajustées à partir du MNT avec une précision au 10 m. Compte tenu de la forte corrélation de la charge hydraulique et du MNT ($r = 0,99$), la piézométrie a été calculée par krigeage avec dérive externe sur la topographie avec le logiciel SGeMS (Boucher, 2013). L'analyse de la validation croisée a permis d'optimiser les paramètres afin de minimiser la moyenne des erreurs et des erreurs au carré à 0,06 et 22, respectivement. L'estimation permet de reproduire les mesures de niveau d'eau au droit des puits avec une précision d'environ 2 m.

La carte 9 présente la piézométrie de l'aquifère rocheux fracturé dans le secteur Haldimand. On note que la charge hydraulique est élevée au centre de la péninsule (zone de recharge) et qu'elle diminue radialement vers la mer (zone d'émergence). La piézométrie montre également que les rivières influencent l'écoulement en agissant comme des exutoires de l'eau souterraine. Des flèches, vers le haut (\uparrow) et vers le bas (\downarrow), indiquent le sens de l'écoulement vertical observé dans certains puits lors des travaux de diagraphie avec le débitmètre (section 3.1.1) [Crow et al., 2014].

Les lignes de partage des eaux souterraines sont représentées en lignes pointillées sur la carte piézométrique. L'emplacement de ces lignes est approximatif et basé à la fois sur la carte piézométrique et sur la topographie dont les dénivelés importants font en sorte que les bassins hydrologiques et hydrogéologiques concordent. On distingue quatre principaux sous-bassins. Pour le sous-bassin le plus au nord, l'eau souterraine s'écoule au nord vers la mer, tandis que pour les autres sous-bassins, l'écoulement de l'eau souterraine se fait vers les cours d'eau. L'écoulement de l'eau souterraine au site Haldimand n° 1 se dirige vers le ruisseau 02M60000 situé à 370 m vers le sud-est, tandis qu'aux sites Haldimand n° 2 et Haldimand n° 4, l'écoulement va vers le ruisseau Dean, qui se trouve à une distance de 140 m et 270 m de ces sites, respectivement.

La carte 10 montre la profondeur de la nappe en septembre 2013. Cette carte a été obtenue par soustraction de la topographie du terrain donnée par le MNT et de la

piézométrie (carte 9) dans les zones en condition de nappe libre. Dans les zones en conditions captives, l'élévation du roc a été soustraite à la topographie du terrain. Cette opération a été réalisée dans ArcGIS. L'hydrogramme disponible pour le puits d'observation POH-11-09 permet de constater que le niveau de la nappe est presque à son plus bas à cette période de l'année. De plus, lors des travaux d'échantillonnage de septembre 2013, le ruisseau Dean était à sec. Il est donc important de souligner que la carte 10 de la profondeur de la nappe montre l'aquifère en période d'étiage à la fin de l'été et que la profondeur de la nappe peut remonter de plus de 20 m dans les hauts topographiques au centre de la péninsule (figure 3.9).

Les zones de confinement de l'aquifère au roc sont illustrées à la carte 11. Cette carte a été obtenue par une soustraction de l'élévation du roc à la piézométrie. Cette opération a également été réalisée dans ArcGIS à l'aide de la calculatrice *Raster*. Cette carte présente les endroits où l'eau souterraine est en conditions libres (régions en bleu) et ceux où elle est en conditions captives (régions en gris).

Les régions en bleu correspondent à des zones moins recouvertes de till, où l'aquifère est relativement libre et donc où la recharge est plus élevée. Ces zones correspondent, entre autres, aux hauts topographiques. Les régions en tons de gris indiquent des zones de confinement plus important qui correspondent en partie aux zones où l'épaisseur de sédiments quaternaires est plus importante (carte 6). Notons, entre autres, la présence de conditions captives autour de POH-11-03 et de POH-11-06, qui sont des puits jaillissants.

La carte des zones de confinement a été validée en superposant les conditions de confinement des puits indiquées par les hydrogrammes de puits. Les puits ont été classés en trois groupes, soit captif (rouge), semi-captif (violet) et libre (bleu). Le tableau 3-9 présente ce classement ainsi que la justification qui a permis d'établir la condition de confinement pour chaque puits. On observe que les puits en conditions libres se trouvent généralement dans les zones de recharge, les puits captifs, dans la zone captive et les puits semi-captifs, dans la zone intermédiaire entre les deux autres zones, ce qui démontre la validité de la carte 11.

La carte du confinement permet aussi d'établir la nature du lien hydraulique entre les cours d'eau et l'aquifère. Lorsqu'un cours d'eau traverse un secteur en conditions captives, le lien hydraulique entre le cours d'eau et l'aquifère sera « diffus ». Lorsqu'il recoupe une zone en conditions libres, le lien hydraulique est considéré comme étant « direct ». Sur la carte 11, ces liens sont représentés en rouge lorsqu'ils sont diffus et en vert lorsqu'ils sont directs. Pour les ruisseaux Aug et Kennedy, le lien direct s'étend dans la zone captive en aval pour tenir compte de la présence des affleurements en bordure de ces cours d'eau.

3.4.3. Coupe hydrogéologique

La coupe AB de la figure 3.8 illustre le modèle conceptuel hydrogéologique de la péninsule d'Haldimand. La localisation de cette coupe est tracée sur les cartes 1 et 9. Cette coupe s'étend de la baie de Gaspé au nord (A) à la vallée de la rivière St-Jean au sud (B). Elle a été élaborée à partir du MNT (carte 5), de la carte piézométrique (carte 9) et de la topographie du roc (carte 8).

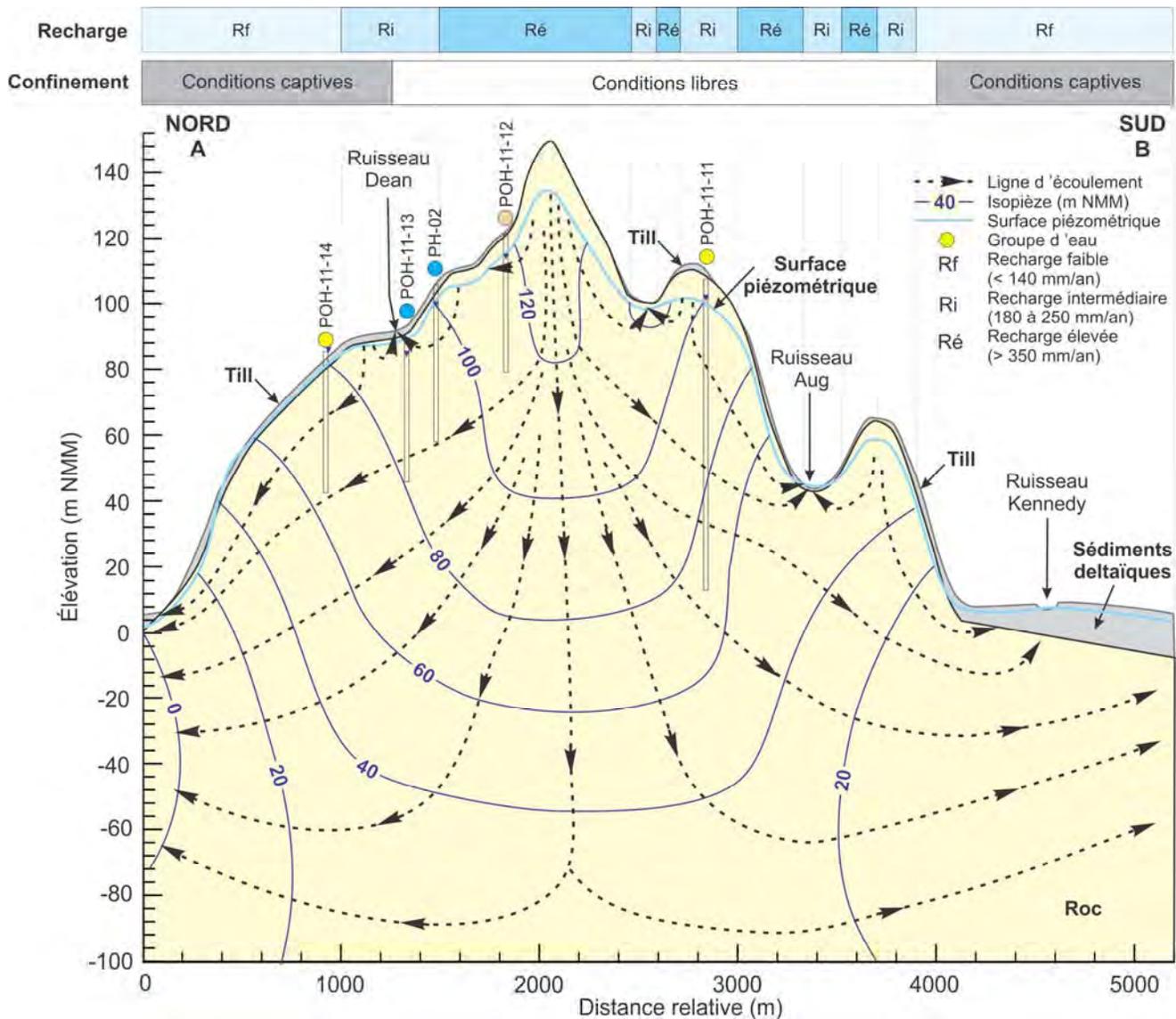


Figure 3.8 Modèle conceptuel hydrogéologique, coupe nord-sud le long de la ligne AB (cartes 1 et 9). Exagération verticale ~20x

Les dépôts meubles représentés le long de la coupe sont composés majoritairement de till et de sédiments deltaïques peu perméables, alors que le roc fracturé constitue l'aquifère principal du secteur d'étude. La surface piézométrique (ligne bleue claire) indique que les hauts topographiques agissent comme zones de recharge et que l'eau souterraine émerge dans les cours d'eau. La nappe est plus profonde sous les hauts topographiques. Les valeurs de recharge au roc sont indiquées au-dessus de la coupe. Les zones de recharge élevée (> 350 mm/an) correspondent aux endroits où la couverture de sédiments est mince ou absente. La recharge diminue au pourtour de la péninsule où l'épaisseur de dépôts augmente à l'approche de la mer (zone d'émergence principale). Les endroits où la surface piézométrique se trouve au-dessus du socle rocheux correspondent à des zones de confinement plus importantes. Les

conditions de confinement captives ou libres tirées de la carte 11 sont représentées en haut de la coupe. Les conditions captives sont localisées autour de la péninsule, où la recharge est plus faible.

Les lignes pointillées représentent les lignes de courant et les flèches montrent les voies générales d'écoulement à l'échelle locale et régionale. Les écoulements locaux sont superficiels et montrent un temps de résidence plus court par rapport aux écoulements régionaux plus profonds qui présentent des temps de résidence beaucoup plus importants. Les lignes bleues foncées représentent les équipotentielles des charges hydrauliques dont les valeurs sont indiquées en mètres.

Les symboles colorés apparaissant au-dessus des forages font référence aux groupes d'eau décrits à la section 4.2.3. L'analyse des groupes d'eau suggère que les eaux retrouvées au niveau des puits représentés sont constituées d'un mélange d'eau provenant d'écoulement local et régional dans des proportions différentes. Le fait que les puits d'observation interceptent à la fois des voies d'écoulement locales et plus régionales pourrait en partie expliquer ces mélanges de types d'eau de degrés d'évolution divers et la présence de tritium, indiquant la présence d'eau jeune dans pratiquement tous les puits, même lorsque la faible proportion de ^{14}C moderne indique que ces eaux ont eu un long temps de résidence (section 4.3).

3.5. Suivi de nappe

3.5.1. Suivi de nappe et relevés de niveau d'eau

Le suivi de la nappe a commencé par l'installation de capteurs de pression, entre le 15 et le 18 février 2012. Des capteurs de pression d'eau *Levelogger* de *Solinst* ainsi que des enregistreurs de la pression atmosphérique *Barologger* ont été installés dans la plupart des puits d'observation (TechnoRem, 2013). Les données ont été enregistrées jusqu'à la fin du mois de septembre 2013 et ont été prélevées à trois reprises (juin 2012, octobre 2012 et septembre 2013). Du 29 octobre au 2 novembre 2012, un essai de pompage de 72 heures a été réalisé par TechnoRem (2013) au puits d'observation POH-11-06 en contrôlant le débit sortant de ce puits qui est en conditions artésiennes (coulant librement). Les fichiers électroniques des données brutes enregistrées par les sondes (*.xle et *.lev) ainsi que le fichier de travail du suivi de la nappe (A2-SuiviNappe-RapportMAI2014.xlsx) sont joints à l'annexe 2.

Le tableau 3-6 présente les puits d'observation qui ont été munis d'une sonde ainsi que leur période de suivi. Les données extraites des capteurs de pression sont jointes à l'annexe 2. Les données brutes des sondes ont été corrigées pour enlever l'effet barométrique du niveau d'eau dans le puits. Les données ont été calées d'après les mesures manuelles de niveau d'eau afin d'ajuster les élévations absolues des niveaux d'eau. Ces données sont présentées sous forme d'hydrogrammes à la section 3.5.2.

Tableau 3-6 Suivi long terme pour les puits d'observation instrumentés (février 2012 à septembre 2013)

Nom du puits d'observation	Numéro de la sonde	2012												2013								
		Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	
POH-11-02	2001415																					
POH-11-03	-																					
POH-11-04	2004031																					
POH-11-05	2004771																					
POH-11-06	2005072																					
POH-11-07	2001390																					
POH-11-08	2001370																					
POH-11-09	2004770																					
POH-11-10	-																					
POH-11-11	2001379																					
POH-11-12	2001385																					
POH-11-13	2002281																					
POH-11-14	2004564																					
POH-11-15	-																					
PH-01	2004771																					
PH-02	2001388																					
PH-04	-																					
Baro-POH-11-02	2005025																					
Baro-POH-11-05	2005030																					
Baro-POH-11-09	2005029																					

Après l'essai de pompage au puits POH-11-06 en novembre 2012, le suivi à long terme a repris pour les puits POH-11-05, POH-11-06 et POH-11-09 avec la remise en place des capteurs de pression. En septembre 2013, la sonde du puits POH-11-06 a dû être remplacée, car elle était défectueuse. Le tableau 3-7 indique quels puits sont instrumentés depuis septembre 2013.

Le tableau 3-8 présente le relevé manuel du niveau d'eau mesuré pour les puits d'observation depuis février 2012. Une variation importante du niveau de l'eau dans les puits est observée en fonction des saisons. Ce phénomène est encore mieux illustré par les hydrogrammes de puits qui sont présentés à la section suivante.

Tableau 3-7 Sondes mises en place en septembre 2013

<i>Puits suivis</i>	<i>Numéro de la sonde de pression d'eau</i>	<i>Numéro de la sonde barométrique</i>	<i>Notes</i>
POH-11-05	2004771	2005030	
POH-11-04	-	2005025	Pour compenser la sonde du POH-11-06
POH-11-06	2004779	-	Nouvelle sonde
POH-11-09	2004770	2005029	

Tableau 3-8 Relevés manuels du niveau d'eau (en mètres) pour les puits d'observation

<i>Date</i>	<i>TechnoRem</i>			<i>MDDEFP</i>	
	<i>26 oct. 2012</i>	<i>15-18 févr. 2012</i>	<i>26 oct. 2012</i>	<i>9-13 sept. 2013</i>	<i>9-13 sept. 2013</i>
<i>Nom du puits d'observation</i>	<i>Margelle*</i>	<i>Profondeur niveau eau</i>	<i>Profondeur niveau eau</i>	<i>Margelle*</i>	<i>Profondeur niveau eau</i>
POH-11-02	0,65	15,58	12,58	0,68	13,81
POH-11-03	1,18	-	-0,97	1,25	1,03
POH-11-04	0,75	7,34	3,21	-	4,22
POH-11-05	0,6	-	11,55	0,75	10,45
POH-11-06	0,5	-	-3,00	0,85	-
POH-11-07	0,66	23,53	16,19	0,58	20,98
POH-11-08	0,59	23,51	13,26	0,50	19,02
POH-11-09	0,47	7,465	3,49	0,50	5,66
POH-11-10	0,6	-	1,35	0,67	2,48
POH-11-11	0,66	11,465	2,93	0,71	6,34
POH-11-12	0,48	6,99	5,07	0,44	6,03
POH-11-13	0,925	3,635	3,01	0,88	3,23
POH-11-14	0,77	3	1,91	0,73	2,33
POH-11-15	0,51	-	4,02	0,50	5,32
PH-01	0,58	9,51	6,55	0,55	6,94
PH-02	0,485	5,88	3,93	0,46	4,69
PH-04	0,56	-	1,65	0,51	2,06

*Les profondeurs du niveau d'eau sont mesurées à partir de la margelle.

3.5.2. Hydrogrammes de puits et conditions de recharge et confinement

Les hydrogrammes de puits montrent l'enregistrement de l'élévation du niveau de l'eau souterraine en fonction du temps dans les puits d'observation. Les hydrogrammes ont permis d'établir les conditions de confinement au droit de chaque puits. Les hydrogrammes de cinq puits localisés le long d'une coupe permettent aussi de

comparer les variations du niveau d'eau pour les puits ayant différentes conditions de confinement, soit des puits captifs, semi-captifs et libres.

3.5.2.1. Hydrogrammes et conditions de recharge et confinement

Les hydrogrammes ont été regroupés par condition de confinement. La figure 3.9 présente les hydrogrammes pour les puits qui sont considérés en conditions libres et la figure 3.10 montre les hydrogrammes pour lesquels les puits semblent être en conditions semi-captives ou captives. Des puits captifs non instrumentés ont aussi pu être classés compte tenu de leurs conditions artésiennes jaillissantes. Le tableau 3-9 regroupe les informations qui ont permis de classer les puits selon leur condition de confinement ainsi que les justifications qui ont permis d'établir ces conditions. Ces résultats sont représentés sur la carte des zones de confinement (carte 11).

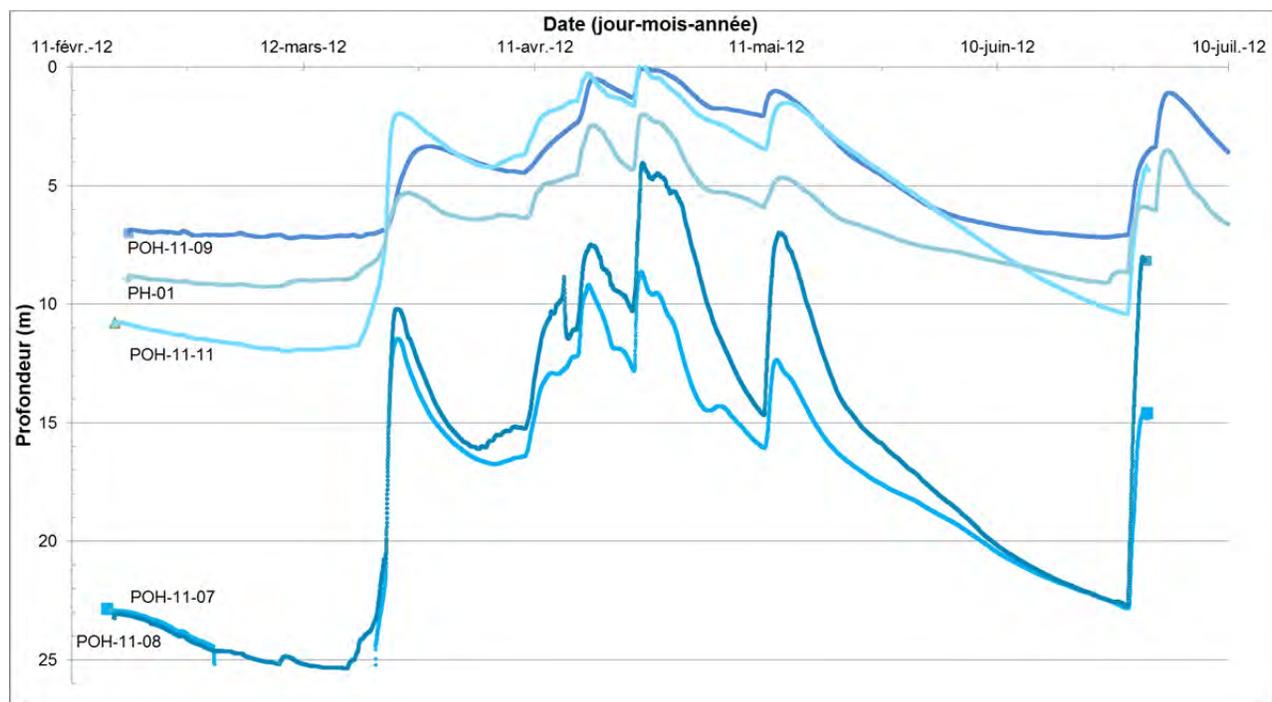


Figure 3.9 Hydrogrammes des puits en conditions libres

Aux endroits où les conditions sont libres, la figure 3.9 montre que les niveaux d'eau peuvent être à de grandes profondeurs sous la surface du sol, surtout en condition d'étiage (fin d'hiver ou d'été). Dans le cas des puits d'observation POH-11-07 et POH-11-8, les niveaux d'eau vont à plus de 25 m sous la surface du sol. Cependant, les endroits où les conditions sont libres reçoivent beaucoup de recharge; chaque événement de recharge induisant d'importants changements des niveaux d'eau. Ces très grands changements des niveaux d'eau sont présumés être causés par la très faible porosité de drainage de la matrice de l'aquifère au roc (section 3.3.2). On note aussi que les puits situés aux endroits où les conditions sont libres réagissent aux mêmes événements de recharge, mais avec des magnitudes différentes. Aux endroits où les conditions de l'aquifère au roc sont semi-captives ou captives, la figure 3.10 montre que les variations de niveau d'eau ont une amplitude beaucoup moins grande.

Les puits qui réagissent le moins sont en conditions captives ou situés près de zones d'émergence où le niveau d'eau est pratiquement fixé par l'élévation de l'exutoire (ruisseau).



Figure 3.10 Hydrogrammes des puits en conditions semi-captives et captives

La section suivante discute plus en détail de la comparaison des conditions entre les zones en conditions libres par rapport aux zones en conditions semi-captives ou captives en décrivant les hydrogrammes mesurés à des puits situés le long d'une même section hydrogéologique.

3.5.2.2. Hydrogrammes le long de la coupe AB

La figure 3.11 présente les hydrogrammes de puits pour les puits d'observation situés le long de la coupe AB (localisation montrée à la carte 9) qui ont été instrumentés de février à juin 2012. Les enregistrements montrent la variation des niveaux d'eau souterraine mesurée dans les puits (trait plein) en fonction du temps. Les niveaux d'eau sont représentés en élévation par rapport au niveau de la mer. Le trait pointillé indique l'élévation du sol au droit de chaque puits de la même couleur. La partie supérieure de la figure 3.11 montre des courbes correspondant à la température moyenne de l'air et aux précipitations totales. Ces courbes permettent de déterminer les périodes de fonte de la neige ou de fortes précipitations et de vérifier si ces événements sont reliés à des changements de niveau d'eau, ce qui signifie qu'il y a alors eu recharge de l'aquifère.

Les niveaux d'eau enregistrés au printemps sont très près de la surface du sol, soit à quelques centimètres de profondeur et donc sous l'influence de la recharge printanière liée à la fonte de la neige. Les hydrogrammes indiquent une grande variation des niveaux d'eau au cours de l'année, notamment en ce qui concerne les puits en plus haute altitude, soit près des zones de recharge. Une variation saisonnière du niveau

d'eau de plus de 20 m a été enregistrée dans les puits POH-11-07 et POH-11-08 et de 10 m pour le POH-11-11, ce qui indique que ces puits sont très sensibles à la recharge. Ces fortes variations de niveau d'eau à la suite d'événements de recharge sont présumées être causées par une très faible porosité de drainage (section 3.3.2). En effet, même si la porosité totale de la matrice est relativement élevée, comme le montrent les analyses de carotte, les pores sont très fins et demeurent probablement saturés lorsque le niveau piézométrique baisse dans les fractures. La porosité de drainage est donc présumée dépendre uniquement de la désaturation des fractures, dont la porosité de drainage doit être très faible. On remarque également une diminution de l'amplitude des variations avec une diminution de l'altitude des puits dans la direction d'écoulement nord. L'amplitude des variations de niveau d'eau est plus faible dans les zones confinées et en aval hydraulique, où il y a donc peu de recharge.

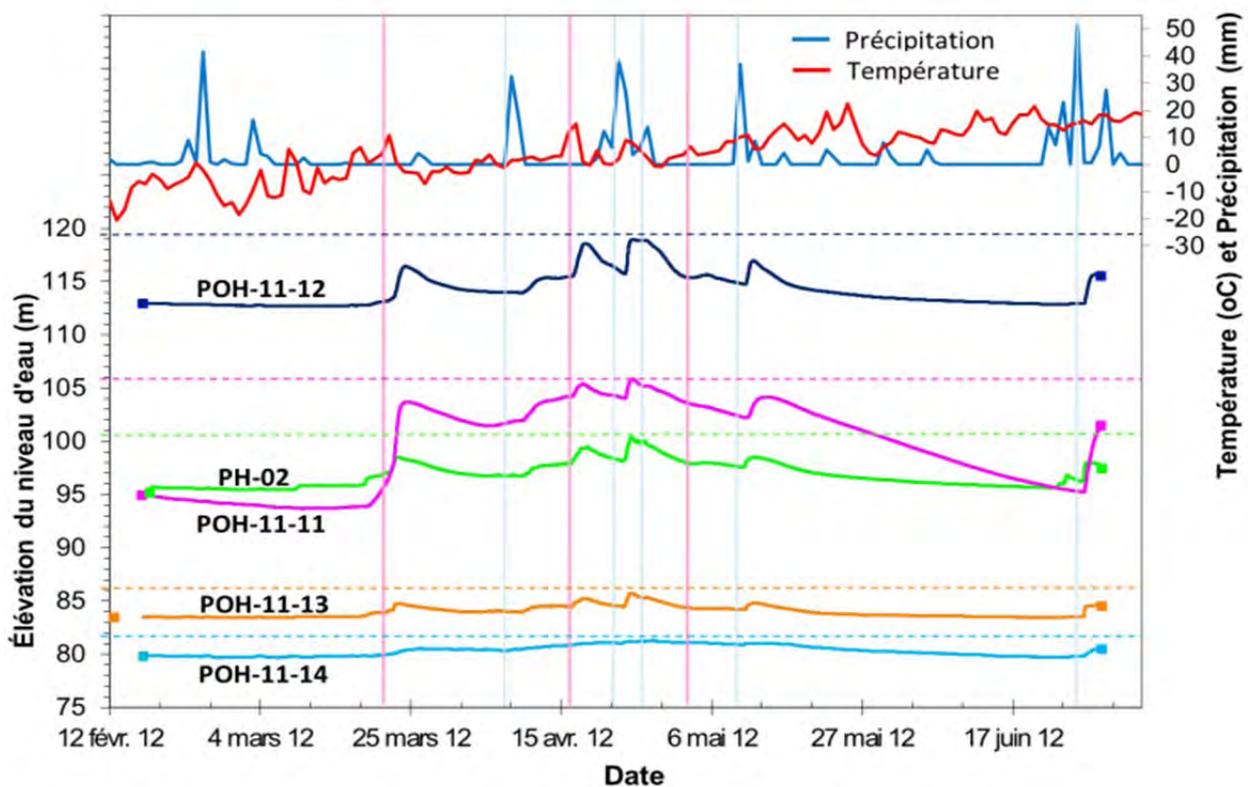


Figure 3.11 Hydrogrammes des puits d'observation du 16 février au 29 juin 2012 pour les puits d'observation situés le long de la coupe AB (figure 3.8; localisation à la carte 9)

À partir du printemps, chaque période de précipitation s'associe avec un rehaussement de la nappe qui s'amorce quelques heures après le début des précipitations. Sur la figure 3.11, les lignes verticales roses mettent en évidence les rehaussements de la nappe associés à une période de dégel qui provoque la fonte de la neige et les lignes bleues illustrent les rehaussements attribués aux épisodes de précipitation. Cette recharge rapide de l'aquifère indique des liens hydrauliques avec la surface. De plus, l'amplitude élevée du rehaussement de la nappe indique une très faible porosité de drainage de l'aquifère rocheux. En période estivale, lorsque la température moyenne est supérieure à 10 °C, la quantité d'eau d'une précipitation doit être plus élevée pour

entraîner un rehaussement du niveau de la nappe dû à l'évapotranspiration qui est plus importante à cause de l'effet de la végétation.

L'hydrogramme du puits POH-11-14 n'enregistre pas de variation aussi marquée de la nappe à la suite des précipitations contrairement aux autres puits de la coupe, ce qui pourrait indiquer l'absence de lien hydraulique direct avec la surface dans le secteur de ce forage. L'analyse de cet hydrogramme sur une échelle d'élévation de l'ordre de quelques mètres montre l'oscillation du niveau d'eau due à l'effet barométrique. Cet effet est caractéristique d'un puits en conditions captives. La coupe illustre d'ailleurs que ce puits d'observation est en zone de confinement plus important (voir les cartes 6 et 11).

La figure 3.11 permet également d'observer les différentes variations des hydrogrammes en fonction du confinement. Le puits en conditions libres (POH-11-11) montre une plus grande amplitude de la variation du niveau d'eau par rapport au puits captif (POH-11-14) qui ne varie presque pas.

La section 4.3.1 présente les estimations de la température de recharge de l'eau souterraine dérivée des concentrations en gaz nobles. Ces températures sont plus faibles à plus grande élévation. La section 4.3.3 décrit comment cette observation est compatible avec le comportement des hydrogrammes, c'est-à-dire qu'une forte recharge se fait dans les zones de recharge préférentielle que constituent les hauts topographiques. La recharge printanière étant la plus importante, cela amène de l'eau froide dans les secteurs à plus forte élévation. La recharge plus diffuse qui se produit à plus faible élévation n'induit pas de températures aussi froides de l'eau souterraine. Cette recharge diffuse est confirmée par la présence de tritium ainsi que de CFC et SF₆ dans presque tous les puits d'observation, ce qui est une indication de la présence d'eau jeune témoignant d'une recharge active (moins de 60 ans) [voir la section 4.3.2].

Tableau 3-9 Classement des puits selon leurs conditions de confinement

<i>Nom du puits</i>	<i>Niveau d'eau atteint p/r sol</i>		<i>Variation du niveau d'eau</i>	<i>Conditions de confinement</i>	<i>Justifications des conditions de confinement</i>
	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>			
POH-11-02	9,11	15,32	6,21	Semi-captif	Grandes variations du niveau d'eau des hydrogrammes Effet barométrique observé dans l'hydrogramme
POH-11-03	-	-	-	Captif	Puits jaillissant à certaines périodes de l'année
POH-11-04	1,05	7,45	6,39	Semi-captif	Grandes variations du niveau d'eau des hydrogrammes Effet barométrique observé dans l'hydrogramme
POH-11-05	7,40	12,91	5,51	Semi-captif	Grandes variations du niveau d'eau des hydrogrammes Effet barométrique observé dans l'hydrogramme
POH-11-06	-	-	-	Captif	Puits jaillissant de plus de 4 m au-dessus du sol
POH-11-07	8,64	25,24	16,60	Libre	Réponse rapide suite aux événements de recharge et grandes variations du niveau d'eau de l'hydrogramme
POH-11-08	4,05	25,39	21,34	Libre	Réponse rapide suite aux événements de recharge et grandes variations du niveau d'eau de l'hydrogramme (capteur dénoyé)
POH-11-09	-0,13	12,25	12,38	Libre	Réponse rapide suite aux événements de recharge et grandes variations du niveau d'eau de l'hydrogramme
POH-11-10	-	-	-	?	Pas d'hydrogramme
POH-11-11	-0,17	12,00	12,16	Libre	Réponse rapide suite aux événements de recharge et grandes variations du niveau d'eau de l'hydrogramme
POH-11-12	0,47	6,77	6,30	Semi-captif	Grandes variations du niveau d'eau des hydrogrammes Effet barométrique observé dans l'hydrogramme
POH-11-13	0,38	2,70	2,33	Semi-captif	Grandes variations du niveau d'eau des hydrogrammes Effet barométrique observé dans l'hydrogramme
POH-11-14	0,51	2,13	1,62	Captif	Réponse très atténuée de l'hydrogramme Effet barométrique observé dans l'hydrogramme
POH-11-15	-	-	-	?	Pas d'hydrogramme
PH-01	-0,55	9,82	10,37	Libre	Réponse rapide suite aux événements de recharge et grandes variations du niveau d'eau de l'hydrogramme
PH-02	0,18	5,13	4,95	Semi-captif	Grandes variations du niveau d'eau de l'hydrogramme Effet barométrique observé dans l'hydrogramme

3.6. Évaluation de la recharge de l'aquifère rocheux

L'évaluation de la recharge est basée sur l'interprétation d'un hydrogramme de puits et sur le calcul d'un bilan hydrologique. L'hydrogramme de puits qui a été sélectionné a une relativement longue séquence de mesures et il est situé dans une partie de l'aquifère au roc qui est en conditions libres et représente une zone préférentielle de recharge. Son interprétation avait pour but de fournir une estimation, à l'aide d'une méthode indépendante, de la valeur maximale dans les zones de recharge préférentielle. Un bilan hydrologique calculé sur des cellules sur l'ensemble de la région d'étude a quant à lui permis d'obtenir la distribution spatiale de la recharge, ce qui était requis pour le modèle numérique et aussi pour évaluer la vulnérabilité (section 3.7).

3.6.1. Interprétation d'un hydrogramme de puits en zone de recharge

Baalousha (2005) a montré qu'un bilan quotidien pouvait être calculé au moyen de données météorologiques facilement accessibles et transformé en changement de niveau d'eau à l'aide de la porosité de drainage et en considérant la récession des hydrogrammes. Les résultats du calcul du bilan peuvent ainsi être validés en les comparant aux changements de niveau d'eau d'un hydrogramme de puits réellement mesurés. Lefebvre et al. (2011) ont adapté cette approche aux conditions climatiques canadiennes, notamment en considérant l'accumulation d'eau sous forme de neige jusqu'à la fonte printanière. Les données météorologiques brutes utilisées pour le calcul du bilan hydrologique ainsi que le fichier de travail (BilanHydrologique-POH-11-09.xls) sont regroupés dans le dossier A5-2-BilanHydrologique de l'annexe 5.

La figure 3.12 montre l'hydrogramme de puits mesuré au puits d'observation POH-11-09 qui est situé dans une zone où l'aquifère au roc est en conditions libres (carte 11). Cette figure compare cet hydrogramme au niveau d'eau synthétique obtenu du calcul du bilan quotidien. Le tableau 3-10 montre les paramètres hydrologiques qui ont été utilisés pour calculer le bilan et produire un hydrogramme synthétique. Pour le calcul du bilan, des données météorologiques mensuelles et quotidiennes de 2001 à 2012 (Environnement Canada, 2013) de la station météorologique de Gaspé ont été utilisées.

Bien que les détails et le caractère de l'hydrogramme mesuré ne soient pas exactement reproduits par l'hydrogramme synthétique obtenu du bilan hydrologique, les événements de recharge sont presque tous reproduits et l'amplitude des changements de niveau d'eau est aussi bien représentée. Les paramètres du tableau 3-10 utilisés pour le calcul du bilan nous informent aussi sur les conditions présentes dans la région d'étude. Une très faible valeur de l'eau disponible accumulée dans le sol (*Readily Available Supply*, RAS) de 1 mm a dû être utilisée, alors que normalement le RAS est de l'ordre de 100 mm. Ceci montre que le sol reste presque saturé et que l'eau est fortement retenue par le sol, ce qui est plausible pour un sol dérivé d'un till ou du roc altéré présent dans les zones de recharge préférentielle. Le coefficient de ruissellement est relativement élevé, ce qui est aussi cohérent avec un sol peu perméable et la présence de fortes pentes. La porosité de drainage dans les fractures de 1,15 % utilisée dans le bilan confirme la très faible désaturation de la porosité du roc en période

d'étiage et explique les très importants changements de niveau d'eau enregistrés lors d'événements de recharge dans les zones en conditions libres.

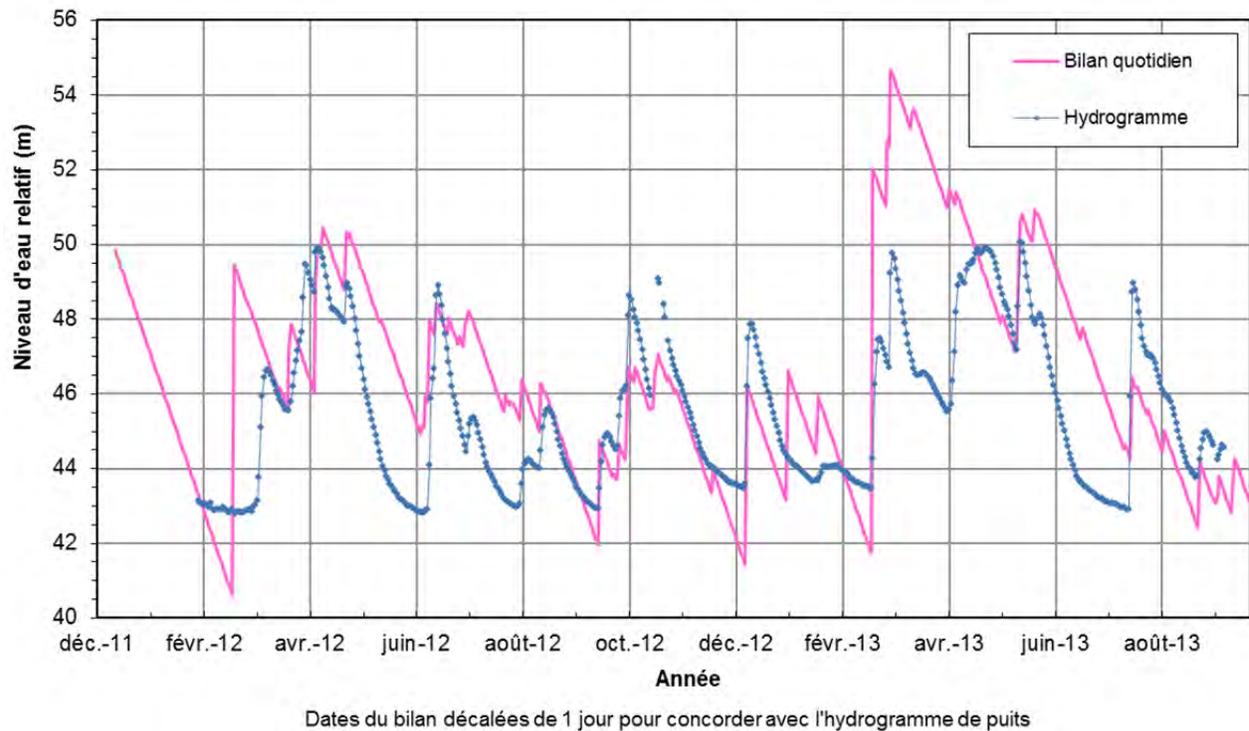


Figure 3.12 Niveau d'eau estimé par un bilan hydrologique quotidien comparé à l'hydrogramme du puits POH-11-09 pour la période de février 2012 à septembre 2013

Tableau 3-10 Paramètres d'ajustement du niveau d'eau calculé par bilan quotidien

<i>Bilan quotidien</i>	
RASmax (mm)	1
Coefficient de ruissellement	0,39
Porosité de drainage	0,0115
Récession (m/j)	140
Température seuil d'infiltration (fonte) [°C]	1,3
<i>Ajustement des courbes</i>	
Élévation d'eau initiale du bilan (m)	50
Décalage de l'hydrogramme de puits (j)	-1
Référence d'élévation de l'hydrogramme (m)	50
Eau accumulée au départ en janvier 2012 (mm)	0

La méthode du bilan hydrologique mensuel avec les mêmes paramètres hydrologiques qu'au tableau 3-10 a permis d'obtenir une estimation de la recharge de 547 mm/an pour les 11 dernières années (2001 à 2012). Le bilan hydrologique quotidien a été calculé pour l'année 2012 et a donné une recharge de 480 mm/an par rapport à 449 mm/an

pour le bilan mensuel. Une recharge de l'ordre de 500 mm/an a donc été retenue dans les zones de recharge préférentielle aux fins de la modélisation.

3.6.2. Bilan hydrologique sur l'ensemble de la région d'étude

Pour faire l'évaluation de la vulnérabilité et aussi guider le choix des paramètres à utiliser pour la modélisation numérique, la recharge distribuée sur l'ensemble du territoire a été obtenue sur la base d'un bilan hydrologique. Ce bilan a été calculé en estimant les paramètres hydrologiques sur des cellules de 100 m sur 100 m sur l'ensemble de la péninsule d'Haldimand. Le calcul du bilan a nécessité l'utilisation des données météorologiques disponibles pour les dix dernières années, soit de 2002 à 2012 (Environnement Canada, 2014; station météorologique de Gaspé). Les cartes 12 à 15 présentent ainsi les paramètres qui ont dû être estimés pour chaque cellule afin de calculer le bilan, tandis que la carte 16 présente la distribution spatiale de la recharge estimée (discutée aussi à la section 3.7 portant sur la vulnérabilité).

Le premier paramètre qui a été estimé est le coefficient de ruissellement C_R qui a été défini pour chaque cellule en tenant compte de l'utilisation du sol, de la topographie et du groupe hydrologique du matériau d'après le tableau 3-11 tiré de Croteau (2006). Ces opérations ont été réalisées dans ArcGIS à l'aide la calculatrice *Raster* (cette matrice est présentée à l'annexe 5).

La carte 12 montre que l'utilisation du sol est dominée par un couvert forestier. La carte 13 montre la pente dérivée de la topographie (modèle numérique de terrain), indiquant que de grandes portions de territoire ont des pentes supérieures à 3 %. La carte 14 présente la distribution des groupes hydrologiques qui ont été définis principalement sur la base de l'épaisseur des dépôts quaternaires (carte 6) qui sont surtout constitués de till peu perméable. Ainsi, les groupes hydrologiques A, B, C et D ont été attribués, respectivement, aux intervalles ayant des épaisseurs de dépôts meubles entre 0 et 1 m, 1 et 2 m, 2 et 4 m et supérieures à 4 m. La carte 15 montre ainsi le coefficient de ruissellement établi sur la base des cartes précédentes selon les catégories définies au tableau 3-11. Les précipitations efficaces (précipitations totales moins le ruissellement) ont donc été obtenues du produit des précipitations totales et du coefficient de ruissellement. Comme pour le calcul du bilan hydrologique quotidien (section 3.6.1), la même approche utilisée par Lefebvre et al. (2011) a permis le calcul de l'évapotranspiration potentielle ET_P à partir de la méthode de Thornthwaite. La méthode Thornthwaite permet de calculer l' ET_P à partir uniquement des données climatiques et de la latitude du site à l'étude (De Marsily, 1986). Un bilan de l'eau disponible accumulée dans le sol (*Readily Available Supply*, RAS), de l'infiltration (ou précipitations efficaces) et de l' ET_P a permis d'obtenir l'évapotranspiration réelle (ET_R). L'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe est obtenue en soustrayant l'évapotranspiration réelle et la quantité d'eau disponible dans le sol à l'infiltration.

Pour chaque valeur de coefficient de ruissellement obtenue à la carte 15, une valeur de l'infiltration de l'eau jusqu'à la nappe a été calculée. Ces valeurs de recharge à la nappe ont été attribuées aux cellules correspondantes pour obtenir la carte 16 de la recharge. Cette méthode a permis d'évaluer la recharge au roc pour chaque cellule en tenant compte du ruissellement et de l'évapotranspiration.

Tableau 3-11 Coefficient de ruissellement pour des conditions hydrologiques moyennes en fonction de l'utilisation du sol, de la pente et de la classe hydrologique. Modifié de Monfet (1979) par Croteau (2006)

Utilisation du sol	Pente	Groupe hydrologique			
		A	B	C	D
Culture intensive	< 3 %	62	72	79	82
	3 à 8 %	64	76	84	88
	> 8 %	70	80	87	90
Culture extensive	< 3 %	32	51	72	79
	3-8 %	44	65	77	82
	> 8 %	59	74	83	87
Boisé	< 3 %	24	54	68	76
	3 à 8 %	33	59	73	79
	> 8 %	44	66	78	83
Résidentiel, commercial	Dense	73	83	88	90
	Peu dense	59	74	82	86

La carte 16 montre la distribution spatiale de la recharge estimée à partir du bilan hydrologique décrit dans la présente section. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 500 mm/an et elles se trouvent dans les zones de recharge préférentielle situées dans les hauts topographiques. Ailleurs dans le secteur, la magnitude de la recharge dépend de l'épaisseur du couvert de till, mais elle est généralement inférieure à 200 mm/an ou même à 100 mm/an. La recharge estimée dans la présente section a aussi servi à l'évaluation de la vulnérabilité décrite à la section suivante.

3.7. Vulnérabilité des aquifères

3.7.1. Description et application de la méthode DRASTIC

La vulnérabilité des aquifères à la contamination par rapport aux activités de surface a été établie sur la base de l'indice DRASTIC (Aller et al., 1987). L'aquifère rocheux constitue le principal aquifère de la région à l'étude. On retrouve aussi un aquifère granulaire au sud d'Haldimand, sur la rive sud de la rivière St-Jean. Cet aquifère distinct est constitué de dépôts granulaires et de la partie supérieure du roc. Les futurs puits d'alimentation de la ville de Gaspé captent l'eau souterraine de cet aquifère granulaire. Pour évaluer la vulnérabilité de ces deux différents aquifères, l'indice DRASTIC a été calculé séparément pour l'aquifère au roc et pour l'aquifère granulaire. La vulnérabilité n'a pas été évaluée sur la partie de la ville de Gaspé qui apparaît à l'extrémité nord-ouest des cartes.

3.7.2. Cartes intermédiaires

Les cartes de vulnérabilité ont été préparées à l'aide du logiciel ArcGIS d'après le protocole rédigé par Carrier et al. (2012) pour les projets PACES du Québec. La zone

d'étude a été découpée selon une matrice discrétisée en cellules carrées de 100 m sur 100 m. La méthode DRASTIC comprend sept paramètres : D (*depth*), profondeur de la nappe; R (*recharge*); A (*aquifer*), type d'aquifère; S (*soil*), type de sol; T (*topography*), pente de la topographie; I (*impact*), impact de la zone vadose; C (*conductivity*), conductivité hydraulique. L'indice DRASTIC est obtenu de la somme des paramètres multipliés par leurs poids respectifs. Le tableau 3-12 présente les cotes et poids des paramètres. Pour chaque paramètre, une matrice a été créée à laquelle une cote a été attribuée pour chaque cellule d'après les classes établies pour les paramètres DRASTIC. Les cartes 17 à 30 montrent les paramètres DRASTIC estimés pour les deux aquifères. Sur les cartes de l'aquifère au roc, la zone hachurée représente l'aquifère granulaire présent au-dessus du roc. Sur les cartes représentant les paramètres de l'aquifère granulaire, les limites de cet aquifère sont illustrées. Les sections qui suivent décrivent la production des cartes de chacun des paramètres DRASTIC.

3.7.2.1. Profondeur de la nappe (D)

Pour l'aquifère au roc, la carte de la profondeur de la nappe a été dérivée de la carte 10 décrite à la section 3.4. Les données de cette carte ont été reclassées selon le tableau 3-12 afin d'obtenir la cote prédéfinie par la méthode DRASTIC. Une cote de profondeur a ainsi été assignée à chaque cellule de la matrice. La carte 17 présente les cotes de la profondeur de la nappe pour l'aquifère au roc. La profondeur de la nappe varie de 0 à plus de 30 m pour cet aquifère, mais la nappe se retrouve généralement à une profondeur allant de 4,6 à 9,1 m pour la majeure partie du territoire à l'étude. Pour l'aquifère granulaire, les cotes de la profondeur de la nappe sont illustrées à la carte 18. La profondeur de la nappe a été fixée à la cote 9, qui correspond à une profondeur de nappe variant de 1,5 à 4,6 m. Cette valeur est tirée du calcul de l'indice DRASTIC réalisé par Arrakis (2011).

3.7.2.2. Recharge (R)

La carte 16 de la recharge totale a été utilisée pour le calcul de l'indice DRASTIC. La production de cette carte est expliquée à la section 3.6.2. Dans le cas de la recharge au roc, la carte de la recharge totale a dû être adaptée pour tenir compte de l'aquifère granulaire qui surmonte le roc dans la partie sud du secteur d'étude. Sous l'aquifère granulaire, la recharge au roc a été établie à moins de 50 mm/an, soit une cote DRASTIC de 1. Le reste de cette carte correspond aux valeurs de la recharge totale de la carte 16 reclassées selon les cotes DRASTIC du tableau 3-12. La carte 19 montre les cotes de la recharge au roc. Les cotes varient de 1 à 10 pour l'aquifère rocheux. La recharge est plus importante en altitude où l'épaisseur des dépôts est plus faible. Les sites des puits pétroliers se trouvent près de la principale zone de recharge du secteur Haldimand.

La recharge pour l'aquifère granulaire correspond directement aux valeurs de la carte 16 de la recharge totale qui ont été reclassées pour obtenir les cotes DRASTIC. La carte 20 montre la distribution des cotes de la recharge pour l'aquifère granulaire. Les cotes varient de 6 à 10 pour cet aquifère, mais la majeure partie de l'aquifère granulaire a une recharge importante qui est généralement supérieure à 254 mm/an.

Tableau 3-12 Cotes et poids des paramètres de la méthode DRASTIC (traduit d'Aller et al., 1987)

	D	R	A	S	T	I	C
Cote	Profondeur de la nappe (m)	Recharge (mm/a)	Type d'aquifère	Type de sol	Topographie (% pente)	Impact de la zone vadose	Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/s)
1	30,5 et plus	0 à 50	Shale massif (1 à 3)	Argile sans retrait et agrégats	18 et plus	Aquifère confiné	$4,72 \times 10^{-7}$ à $4,72 \times 10^{-5}$
2	22,8 à 30,5		Métamorphique / ignée (2 à 5)	Remblais		Silt / Argile (2 à 6)	$4,72 \times 10^{-5}$ à $1,41 \times 10^{-4}$
3	15,2 à 22,8	50 à 102	Métamorphique / ignée altérée (3 à 5)	Loam argileux	12 à 18	Shale (2 à 5)	
4			Till glaciaire (4 à 6)	Loam silteux		Métamorphique / ignée (2 à 8)	
5	9,1 à 15,2		Grès massif (4 à 9)	Loam	6 à 12	Calcaire (2 à 7)	$1,41 \times 10^{-4}$ à $3,30 \times 10^{-4}$
6		102 à 178	Calcaire massif (4 à 9)	Loam sableux		Grès (4 à 8)	
7	4,6 à 9,1		Grès lité, Séquences de calcaire et shale (5 à 9)	Argile avec retrait et agrégats		Calcaire lité, grès, shale (4 à 8)	
8		178 à 254	Sable et gravier (4 à 9)	Tourbière		Sable et gravier avec proportion importante de silt et d'argile (4 à 8)	$3,30 \times 10^{-4}$ à $4,72 \times 10^{-4}$
9	1,5 à 4,6		Basalte (2 à 10)	Sable	2 à 6	Sable et gravier (6 à 9)	
10	0 à 1,5	254 et plus		Gravier, mince ou absent	0 à 2	Basalte (2 à 10)	$4,72 \times 10^{-4}$ à $9,43 \times 10^{-4}$
						Calcaire karstique (8 à 10)	
Poids	5	4	3	2	1	5	3

3.7.2.3. Type d'aquifère (A)

L'aquifère au roc recouvre complètement la zone d'étude. Cet aquifère est constitué d'un grès fracturé. La cote de 6 a été donnée pour le représenter (carte 21).

L'aquifère granulaire où se situent les puits de la ville de Gaspé correspond à des dépôts d'alluvions et de sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique. Une matrice de cet aquifère a été obtenue à partir des polygones de la carte quaternaire qui correspondent à ces dépôts (carte 2). Les cotes attribuées à l'aquifère granulaire sont tirées de l'évaluation de l'indice DRASTIC réalisée par Arrakis (2011) et sont présentées dans le tableau 3-13 et sur la carte 22.

Tableau 3-13 Attribution des cotes DRASTIC pour le type d'aquifère pour l'aquifère granulaire

<i>Code quaternaire</i>	<i>Type d'aquifère</i>	<i>Cote DRASTIC</i>
A	Loam*	7*
Gs	Loam sableux*	8*

*Tiré du rapport d'Arrakis (2011)

3.7.2.4. Type de sol (S)

La carte des types de sols a été déduite de la carte du Quaternaire de Veillette et Cloutier (1993) [carte 2] ainsi que de l'information pédologique cartographiée par l'IRDA. L'identification des dépôts inscrite dans les rapports de forage (annexe 3 – Informations sur les puits d'observation), l'interprétation de la carte quaternaire et des informations pédologiques ont permis de classer les différents types de sol selon le tableau 3-14. Les cotes ont été attribuées aux cellules de la matrice d'après les polygones de la carte quaternaire. Le tableau 3-14 présente les types de sol assignés à chaque dépôt quaternaire pour déterminer les cotes DRASTIC pour ce paramètre. On distingue cinq types de sol différents qui recouvrent la zone d'étude. Les cartes 23 et 24 présentent les cotes des types de sol pour l'aquifère au roc et l'aquifère granulaire, respectivement. Il s'agit de la même matrice pour les deux aquifères, mais qui a été découpée dans le cas de l'aquifère granulaire puisque le type de sol ne change pas en fonction de l'aquifère.

Tableau 3-14 Attribution des cotes DRASTIC pour le type de sol

<i>Code quaternaire</i>	<i>Type de sol</i>	<i>Cote DRASTIC</i>
Tc	Loam silteux	4
MGd	Loam	5
A-Gs	Loam sableux*	6*
Ot	Tourbière	8
C-R-Q-Tm	Mince ou absent	10

*Arrakis (2011)

3.7.2.5. Topographie (T)

Le paramètre de topographie est classé selon la pente pour chaque cellule. Cette matrice est obtenue directement à l'aide de l'outil *Slope* d'ArcGIS et reclassée selon le paramètre topographie de la méthode DRASTIC du tableau 3-12. Les cartes 25 et 26 correspondent aux pentes pour l'aquifère au roc et l'aquifère granulaire.

3.7.2.6. Impact de la zone vadose (I)

L'indice DRASTIC pour l'impact de la zone vadose a été évalué à partir de la carte de confinement (carte 11). Les cotes ont été attribuées selon le tableau 3-15. L'aquifère au roc est considéré comme étant confiné lorsque le niveau piézométrique est supérieur au toit du roc (confinement négatif) et lorsque le niveau de la nappe se situe à moins de 2,5 m sous le toit du roc (confinement de 2,5 m) [voir la section 3.4.2]. Le confinement allant de 2,5 à 20 m représente une zone vadose correspondant à un till. Le roc fracturé a été attribué à un confinement supérieur à 20 m, ce qui signifie que le niveau de l'eau souterraine se situe à plus de 20 m sous le sommet du roc. Dans le secteur de l'aquifère granulaire, la zone vadose a été définie comme un sable et gravier silteux d'après l'interprétation d'Arrakis (2011) pour ce paramètre. Les cotes pour la zone vadose sont présentées aux cartes 27 et 28 pour chaque aquifère étudié. Les cotes sont les mêmes pour les deux cartes puisque, tout comme le type de sol, l'impact de la zone vadose ne varie pas en fonction de l'aquifère.

Tableau 3-15 Attribution des cotes DRASTIC pour l'impact de la zone vadose

Degré de confinement (m)	Impact de la zone vadose	Cote DRASTIC
< 2,5	Aquifère confiné	1
2,5 à 20	Till	3
> 20	Grès fracturé	6

3.7.2.7. Conductivité hydraulique (C)

La conductivité hydraulique de l'aquifère au roc a été établie à la cote 1 pour toute la zone d'étude, ce qui correspond à une conductivité hydraulique variant de $4,7 \times 10^{-7}$ à $4,7 \times 10^{-5}$ m/s (carte 29). La conductivité hydraulique moyenne de l'aquifère granulaire est de $9,5 \times 10^{-6}$ m/s (110 m/j) [Arrakis, 2011], ce qui correspond à la cote de 10 pour ce paramètre. La carte 30 montre la matrice pour cet aquifère.

3.7.3. Cartes de vulnérabilité DRASTIC

Les cartes de vulnérabilité DRASTIC permettent de déterminer les endroits les plus sensibles par rapport à une éventuelle contamination résultant d'activités en surface. Les cartes de l'indice DRASTIC ont été obtenues par une opération matricielle réalisée à l'aide de la calculatrice *Raster* dans ArcGIS. Cette opération permet l'addition des matrices en attribuant un poids à chaque paramètre comme indiqué au tableau 3-12.

La carte 31 représente la vulnérabilité de l'aquifère au roc. Cette carte montre que la vulnérabilité de l'aquifère rocheux est de moyenne à très élevée dans le secteur des sites pétroliers. Une attention particulière devra donc être apportée à la gestion des activités de surface entourant les sites des forages pétroliers. Le secteur du site Haldimand n° 4 est le site le moins sensible, avec une vulnérabilité moyenne.

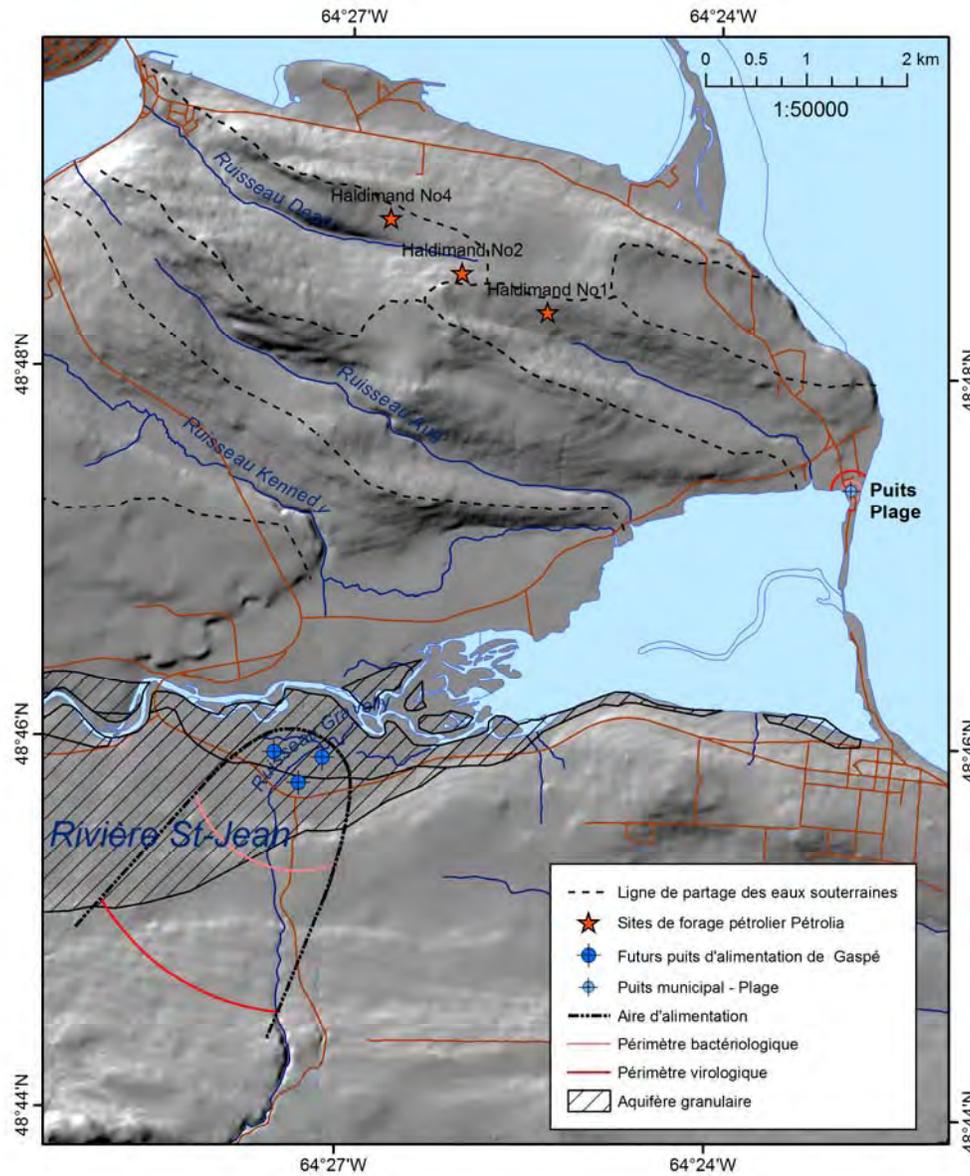


Figure 3.13 Aires d'alimentation des puits de la ville de Gaspé. Modifié d'Arrakis (2011)

La vulnérabilité de l'aquifère granulaire exploité par les puits de la ville de Gaspé est illustrée à la carte 32. La vulnérabilité de cet aquifère par rapport aux activités de surface est très élevée. Cette vulnérabilité très élevée a d'ailleurs été soulignée par Arrakis (2011). Toutefois, l'aire d'alimentation des puits de la ville de Gaspé montre que l'eau captée par ces puits provient du sud. Les aires d'alimentation des puits municipaux calculées par Arrakis (2011) sont reproduites à la figure 3.13.

3.8. Pétrole et fluides profonds

3.8.1. Pétrole

3.8.1.1. Suintements d'hydrocarbures

La figure 3.14 montre la localisation des trois suintements qui ont été échantillonnés pour l'analyse des composés organiques par la CGC, et dont les coordonnées sont indiquées dans le tableau 3-16. Ces suintements forment deux catégories. Le suintement POT2, situé au bout de la rue Forest à l'emplacement d'un ancien forage pétrolier, et les suintements S1 et S2, situés en bordure du ruisseau Dean près de l'ancien forage pétrolier Conant (C027). Ce secteur a été la cible de plusieurs forages pour tenter d'intercepter la source en profondeur de ces suintements naturels.

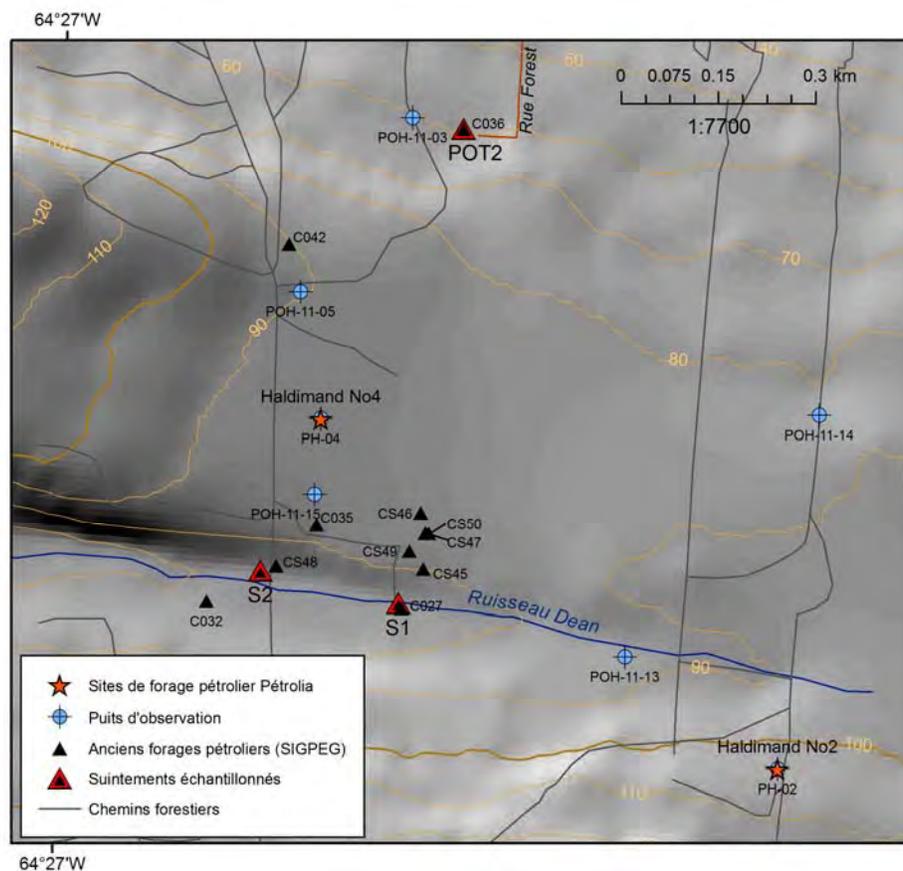


Figure 3.14 Localisation des suintements d'hydrocarbures dans le secteur Haldimand

La figure 3.14 présente l'emplacement des anciens forages pétroliers qui a dû être corrigé par rapport aux coordonnées publiées dans le SIGPEG qui ne correspondaient pas aux mesures sur le terrain avec un GPS (Pétrolia, communication personnelle). Le tableau 3-17 contient les coordonnées d'origine et les coordonnées corrigées des forages pétroliers. La localisation corrigée des anciens forages pétroliers est également montrée sur la carte de la géologie du socle rocheux (carte 3).

Tableau 3-16 Coordonnées des suintements échantillonnés

<i>Suintement</i>	<i>Coordonnées</i>	
	<i>NAD1983 UTM zone 20</i>	
	<i>Est</i>	<i>Nord</i>
S1	394076	5407474
S2	393863	5407524
POT2	394177	5408211

Tableau 3-17 Coordonnées des anciens forages pétroliers

<i>Numéro du forage SIGPEG</i>	<i>Nom du forage</i>	<i>Coordonnées d'origine</i>		<i>Coordonnées corrigées*</i>	
		<i>NAD1983 UTM zone 20</i>		<i>NAD1983 UTM zone 20</i>	
		<i>Est</i>	<i>Nord</i>	<i>Est</i>	<i>Nord</i>
CS45	SB-1	394046	5407606	394116	5407527
CS46	SB-2	394025	5407651	394123	5407582
CS47	SB-3	394025	5407651	394118	5407583
CS48	SB-4	393805	5407654	393886	5407532
CS49	SB-5	393995	5407639	394090	5407556
CS50	SB-6	394025	5407650	394118	5407582
C016	Haldimand n° 1	393938	5406173	-	-
C026	G.B.M. n° 1	396058	5402830	-	-
C027	Conant (Adams)	394075	5407550	394080	5407467
C032	C2	393779	5407477	-	-
C035	P.O.T. n° 1	393994	5407562	393950	5407596
C036	P.O.T. n° 2	394194	5408048	394177	5408211
C037	P.O.T. n° 3	397731	5405113	-	-
C042	P.O.T. n° 8	393907	5408031	-	-
C097	SOQUIP, Douglas n° 1	397605	5406628	-	-

* Pétria, communication personnelle

3.8.1.2. Analyse des hydrocarbures d'Haldimand n° 1 et des suintements

Un échantillon d'huile produit par le puits Pétria Haldimand n° 1 ainsi que trois suintements pétroliers ont été analysés pour certains composés organiques par les laboratoires de la CGC. Pour l'huile d'Haldimand et les suintements POT2 et S1, les analyses comprenaient la détermination de la composition en COV, HAP, OEA ainsi que la distribution des n-alcanes des échantillons. Le suintement S2 a quant à lui seulement été analysé pour des acides organiques. Les résultats détaillés des analyses sont montrés à l'annexe 4.

L'huile d'Haldimand n° 1 est composée à environ 30 % de COV et ces derniers sont essentiellement un mélange d'hydrocarbures ramifiés de composition C6 à C13. La signature en n-alcanes de l'huile est dominée par la présence de chaînes relativement

légères ($C < 19$). De plus, l'huile contient seulement de très faibles quantités de HAP et d'acides organiques.

L'échantillon de suintement S1 contenait environ 2,5 g/L d'huile. La signature des COV est similaire à celle de l'huile d'Haldimand, les concentrations étant nettement plus faibles. Aucun n-alcane n'a pu être détecté, ce qui témoigne d'une dégradation importante de l'huile; néanmoins, l'absence de quantités importantes d'acides naphthéniques indique que la biodégradation de l'huile reste limitée. La disparition des alcanes à chaîne plus courte tend à indiquer que la mise en place des hydrocarbures dans ce suintement peut remonter à une époque très reculée.

Les acides organiques du suintement S2 sont majoritairement composés de phtalates et d'acides linéaires de composition C14-C18, et ils ne contiennent pas de quantités mesurables d'acides naphthéniques. Ces résultats montrent que la biodégradation de l'huile est très limitée. Cependant, ces résultats seuls ne permettent pas d'évaluer ni l'activité ni la source du suintement.

L'échantillon du suintement POT2 contenait environ 0,25 g/L d'huile. La signature des COV est également similaire à celle de l'huile d'Haldimand, bien que les concentrations mesurées dans le suintement soient nettement plus faibles. De plus, la distribution des n-alcane est assez similaire à celle de l'huile, dans la mesure où la distribution est caractérisée par une dominance d'alcane à chaîne plus courte ($C < 19$). Cependant les n-alcane avec $C < 12$ sont absents, à l'opposé de l'huile d'Haldimand. Seules des traces d'acides naphthéniques ont été détectées, témoignant d'une biodégradation limitée de l'huile.

Ainsi, seule la signature des composés organiques du suintement POT2 montre que de l'huile relativement « fraîche » se retrouve en surface. La source et le mécanisme de mise en place du suintement sont cependant difficiles à établir et plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- Le suintement est naturel et inactif, mais il a subi une dégradation moins importante que celle observée dans les suintements S1 et S2;
- Le suintement est relié à l'ancien puits P.O.T. n° 2; il peut être inactif depuis la fermeture du puits en 1999 (Foragaz, 1999) ou il peut encore être actif si le puits continue à fuir;
- Le suintement est naturel et actif, et il n'a jamais été relié au puits P.O.T. n° 2;
- La zone a été contaminée par un déversement d'hydrocarbures (p. ex., diesel).

Comme mentionné précédemment (sections 1.3.2.4 et 3.8.1.1), plusieurs anciens forages avaient été réalisés à proximité de suintements naturels afin d'essayer d'intercepter leurs sources en profondeur. La présence du suintement pourrait donc être antérieure au forage du puits P.O.T. n° 2.

Il serait possible de tester l'hypothèse d'un épanchement d'hydrocarbures en comparant, par exemple, les signatures isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^2\text{H}$) de certains composés organiques (de relativement grande masse) retrouvés dans les suintements à ceux retrouvés dans l'huile d'Haldimand. Si les signatures des deux échantillons diffèrent considérablement, il sera alors possible de conclure à une source non naturelle aux

hydrocarbures retrouvés autour du puits P.O.T. n° 2. Cependant, les données recueillies dans le cadre de la présente étude ne permettent pas de déterminer avec certitude la source et l'activité de ce suintement.

3.8.2. Indices de fluides dans les forages pétroliers

La consultation des données du SIGPEG sur les forages pétroliers réalisés dans le secteur Haldimand démontre la présence de fluides profonds de salinité variable et donc de densité variable. Dans les forages pétroliers Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2, des prélèvements d'eau à différentes profondeurs indiquent la présence d'eaux salines au-dessus du réservoir pétrolier. Ces données ont servi à la conception du modèle d'écoulement à densité variable. Le tableau 3-18 présente une synthèse des analyses des fluides prélevés à différentes profondeurs. On note également la présence de pétrole à 120 m de profondeur au droit du forage Haldimand n° 1.

Tableau 3-18 Synthèse des fluides profonds (données tirées du SIGPEG)

<i>Haldimand n° 1</i>					<i>Haldimand n° 2</i>				
<i>Profondeur (m)</i>		<i>Fluide analysé</i>	<i>SDT (mg/L)</i>	<i>Densité (kg/m³)</i>	<i>Profondeur (m)</i>		<i>Fluide analysé</i>	<i>SDT (mg/L)</i>	<i>Densité (kg/m³)</i>
120		pétrole	-	881,8	715	763	eau de filtrat	67 646	-
206	551	gaz	-	0,9147	722	Toit du réservoir			
-	802	eau de filtrat	7 385	-	849	883	eau de filtrat	74 444	-
-	802	eau de filtrat	140 00	-	849	883	eau de filtrat	72 759	-
-	807	pétrole	-	795,5	910	944	eau de filtrat	76 069	-
830	850	eau de formation	157 000	-	910	944	Gaz	-	-
930	Toit du réservoir				910	944	Pétrole	-	810,8
950	1 080	gaz	-	0,9338	1 099	1 131	eau de filtrat	69 778	-
-	952,5	pétrole	-	820,5	1 099	1 131	eau de filtrat	77 889	-
-	952,5	pétrole	-	835	1 099	1 131	pétrole	-	819,5
1 142,5	1 174,5	eau de filtrat	149 400	-					
1 142,5	1 174,5	eau de filtrat	36 329	-					
1 142,5	1 174,5	eau de formation	245 300	-					
1 188	1 300	eau de filtrat	36 329	-					

3.8.3. Pressions des fluides dans les forages pétroliers

Divers tests ont été effectués par Pétrolia dans les forages Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2 afin de dériver les pressions des fluides dans le réservoir. Un résumé des résultats obtenus est montré au tableau 3-19. Il est important de noter que la pression relativement basse enregistrée dans le réservoir au niveau du forage Haldimand n° 1 en 2011 est probablement due à la production de pétrole dans ce puits (Pétrolia, 2014).

Tableau 3-19 Sommaire des tests effectués et des pressions de réservoir dérivées dans les puits Pétrolia Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2. PT : Test de production; DFIT : Test diagnostique d'injection en fracture (*Diagnostic fracture injection test*); DST : Essai en bout de tige (*Drillstem test*) [Pétrolia, 2014]

<i>Puits</i>	<i>Type de test</i>	<i>Année</i>	<i>Pression de réservoir dérivée (kPa)</i>	<i>Profondeur (mkb)</i>
Haldimand n° 1	PT	2006	11 548	1 042,8
Haldimand n° 1	PT	2009	10 804	950,8
Haldimand n° 1	PT	2010	10 893	950,8
Haldimand n° 1	DFIT	2011	9 380	953,8
Haldimand n° 2	DST	2009	10 068	907,0

La pression des fluides dans le réservoir peut fournir des informations sur la continuité verticale du régime de pression depuis la surface, et ainsi renseigner sur l'expression de liens hydrauliques potentiels entre les zones profondes et superficielles. En effet, une déviation de la pression du réservoir par rapport aux conditions hydrostatiques peut indiquer un isolement hydraulique de ce dernier relativement aux formations géologiques sus-jacentes (Zoback, 2010).

Le calcul de la pression hydrostatique exercée par une colonne d'eau exige la connaissance de sa densité, qui est fonction de la quantité de solides dissous, de la température et de la pression à laquelle elle se trouve. Diverses méthodes théoriques et empiriques existent pour calculer la densité de l'eau en fonction de ces paramètres pour des fluides de différentes compositions (Adams et Bachu, 2002). Dans le cas de la présente étude, la relation empirique de Batzle et Wang (1998) liant la densité de l'eau à la pression, à la température et à la concentration en solides dissous totaux (SDT) a été retenue pour le calcul des pressions hydrostatiques.

Ainsi, afin d'évaluer une éventuelle discontinuité des pressions du réservoir pétrolier par rapport à un régime hydrostatique, les pressions de réservoir déterminées ont été comparées à des courbes hydrostatiques « types » calculées pour quatre scénarios distincts :

- Une eau douce relativement peu chargée (SDT \approx 240 ppm), de composition constante depuis la surface;
- Une eau avec une composition marine constante depuis la surface (SDT \approx 35 000 ppm) [Hem, 1985];
- Un profil calculé à partir des résultats de simulation d'écoulement à densité variable (voir la section 5.2.2). Comme le modèle considère une plage de conductivités hydrauliques relativement élevée, la profondeur de la zone d'écoulement actif est peut-être exagérée par rapport à la réalité. Ainsi, les concentrations en SDT obtenues à partir de la modélisation (et donc les pressions hydrostatiques équivalentes calculées) sont possiblement inférieures à la réalité dans la partie supérieure de l'aquifère;

- Un profil modifié des résultats de simulation d'écoulement à densité variable. Les interfaces eau douce/eau marine et eau marine/eau de formation ont été déplacées d'environ 100 m et 200 m respectivement vers le haut. Cette situation décrit un régime de pression hydrostatique à la limite supérieure de ce qui pourrait être attendu à Haldimand.

Des concentrations en SDT ont été calculées à diverses profondeurs à partir des résultats de la simulation d'écoulement (tableau 3-20). Un gradient de concentration en SDT constant entre les points de mesure a été considéré pour le calcul des pressions hydrostatiques à partir des résultats de la modélisation.

Afin d'estimer la température de l'eau en fonction de la profondeur, le gradient géothermique local a été calculé à partir de la température du réservoir de Haldimand n° 1 (21 °C à 1 368 m de profondeur) [Pétrolia, communication personnelle]. La température au niveau du sol a été estimée à 5 °C à partir des températures atmosphériques moyennes à Gaspé (Environnement Canada, 2014). Ainsi, un gradient géothermique naturel d'environ 11,75 °C/km a été estimé.

Tableau 3-20 Concentrations en solides dissous totaux (SDT) calculées à partir de la simulation d'écoulement à densité variable (voir la section 5.2.2)

Résultats de modélisation		Résultats modifiés	
Profondeur (m)	SDT (ppm)	Profondeur (m)	SDT (ppm)
0	242	0	242
110	242	110	242
220	408	220	408
360	25 255	260	25 255
500	68 719	500	77 296
600	77 296	560	100 653
760	100 653	680	148 228
880	148 228	820	156 997
1 020	156 997	-	-

La figure 3.15 montre les pressions de réservoir au niveau des forages Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2 par rapport aux courbes de pression hydrostatique calculées. Les résultats montrent que les pressions de réservoir sont largement supérieures aux pressions hydrostatiques attendues. Même dans le cas le plus conservateur représentant la présence peu profonde d'eau de mer et d'eau de formation, le pétrole dans le réservoir serait encore en surpression par rapport à la pression hydrostatique, ce qui démontre que le réservoir est bien isolé hydrauliquement de la séquence rocheuse sus-jacente.

Ainsi, les pressions de fluides mesurées dans le réservoir d'Haldimand indiquent que le réservoir pétrolier est clairement en surpression par rapport à un régime hydrostatique depuis la surface. En d'autres termes, la roche couverture du réservoir isole

efficacement celui-ci des lithologies sus-jacentes. Ainsi, le réservoir pétrolier au niveau des forages Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2 semble être isolé hydrauliquement de l'aquifère au roc superficiel.

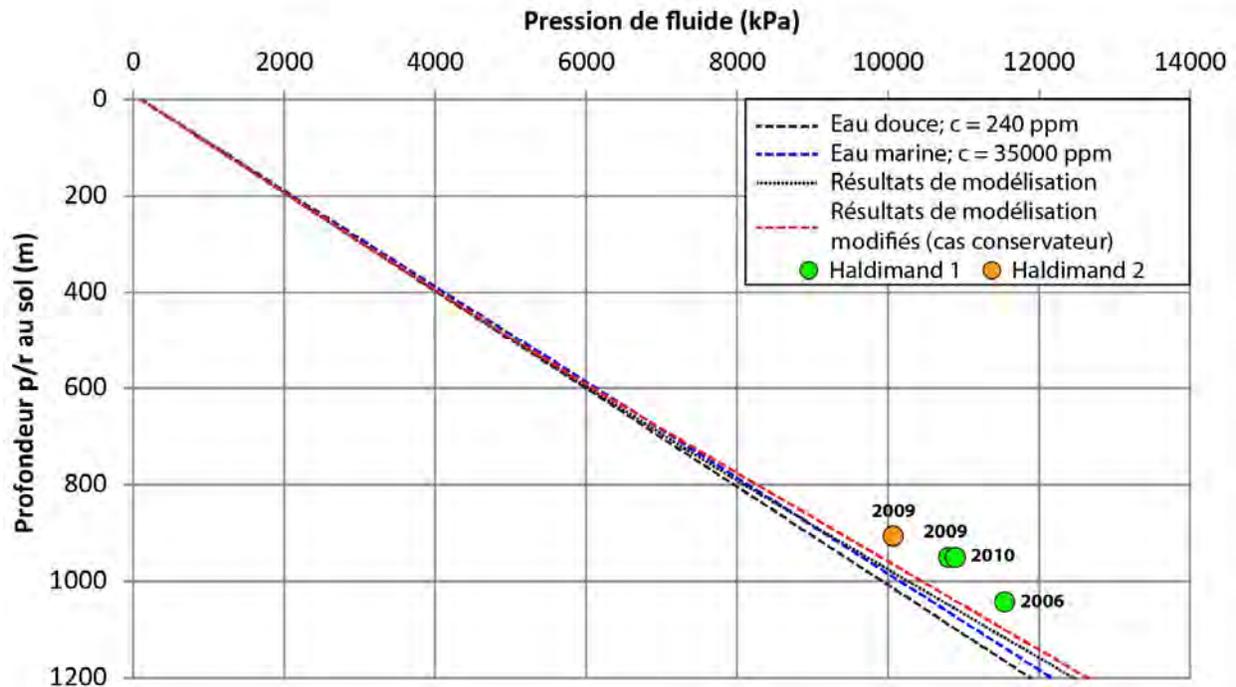


Figure 3.15 Profils de pression hydrostatique calculés et pressions de réservoir au niveau des puits Pétrolia Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2

4. GÉOCHIMIE DE L'EAU SOUTERRAINE

Les analyses chimiques des échantillons d'eau souterraine issues de la caractérisation hydrogéologique du MDDEFP ont permis d'établir un portrait géochimique de l'eau souterraine du secteur Haldimand. Le présent chapitre présente d'abord une comparaison entre les données chimiques de TechnoRem (2013) et celles du MDDEFP lorsque ces données étaient disponibles pour un même puits. Ensuite, une analyse multivariée des résultats analytiques a été faite pour définir des types d'eau qui permettent de comprendre l'évolution géochimique de l'eau souterraine et déterminer leurs implications sur les conditions hydrogéologiques. Des sections traitent ensuite spécifiquement des analyses spécialisées faites sur les radioisotopes, sur les gaz, sur le méthane et sur les composés organiques. Enfin, la qualité d'eau rencontrée dans le secteur Haldimand est décrite dans la dernière section.

4.1. Vérification des données géochimiques du MDDEFP

4.1.1. Calcul du bilan ionique et comparaison des duplicatas

Le bilan ionique a été calculé à l'aide du logiciel PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999 et 2013) sur tous les échantillons prélevés afin de vérifier la cohérence des résultats analytiques. Plus de 85 % des échantillons possèdent un bilan ionique inférieur à 5 %, et plus de 95 % ont un bilan ionique inférieur à 10 % (figure 4.1).

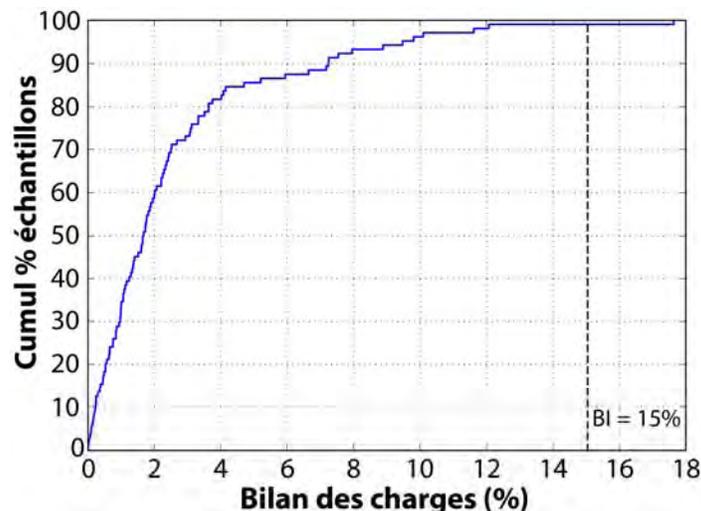


Figure 4.1 Bilan des charges des échantillons analysés lors de la campagne 2013 du MDDEFP

Les six duplicatas prélevés montrent que les résultats analytiques sont similaires et cohérents d'une analyse à l'autre. Ces résultats sont le reflet de données analytiques de très haute qualité.

4.1.2. Comparaison avec les données antérieures (TechnoRem, 2013)

Cinquante-trois échantillons d'eau souterraine et trois échantillons d'eaux de surface qui avaient été analysés lors de la campagne de TechnoRem en 2012 ont de nouveau été prélevés en 2013 dans le cadre de la campagne du MDDEFP. Il était initialement prévu de comparer entre elles ces analyses afin de pouvoir quantifier les variations temporelles de la qualité de l'eau à Haldimand. La comparaison des résultats analytiques pour quelques paramètres principaux est montrée à la figure 4.2.

Bien qu'une grande proportion des paramètres prélevés lors des deux campagnes soit similaire, il existe une quantité importante de valeurs qui divergent significativement. Une certaine dispersion des valeurs des paramètres peut être attendue lors de deux campagnes d'échantillonnage distinctes, notamment dans les eaux souterraines fortement influencées par les eaux de surface. Cependant, certains écarts observés (dépassant parfois un ordre de grandeur) semblent trop importants pour être expliqués uniquement par des variations naturelles de la chimie des eaux.

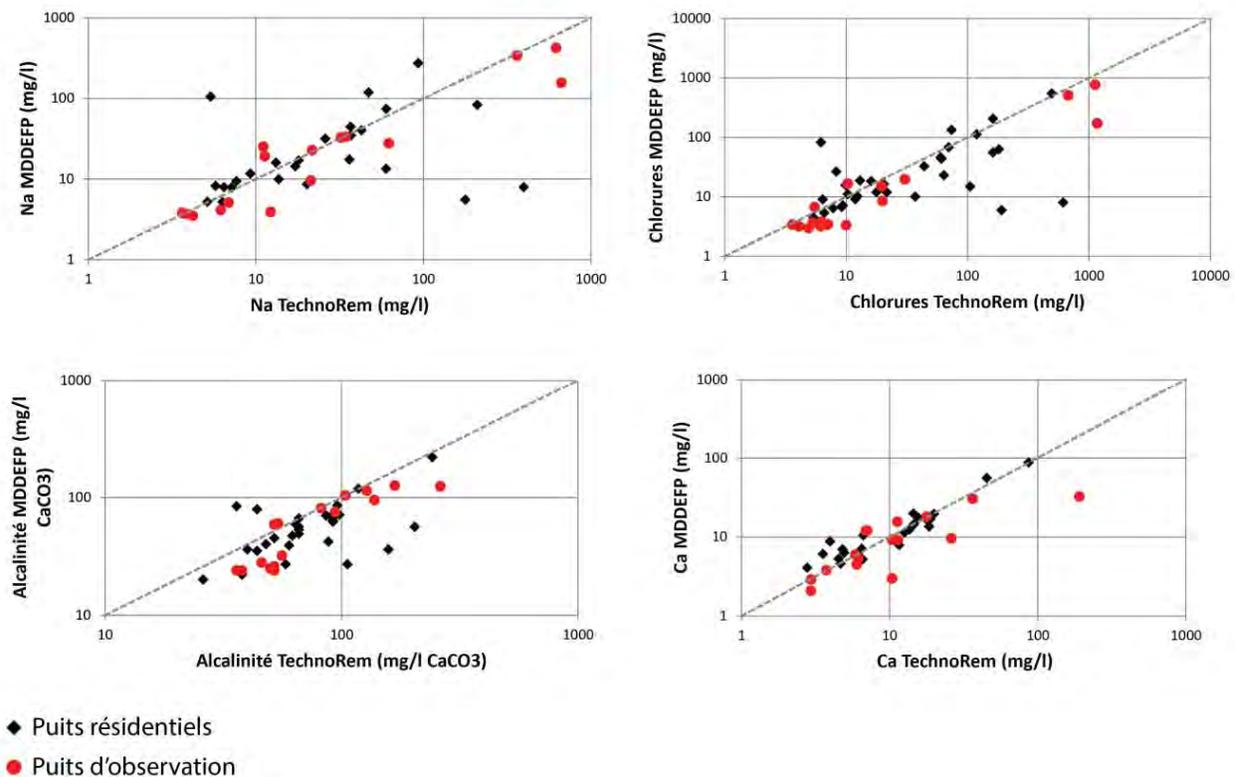


Figure 4.2 Comparaison de certains résultats analytiques des campagnes d'échantillonnage de 2012 (TechnoRem) et de 2013 (MDDEFP)

Il existe quelques hypothèses quant à l'origine des différences observées :

- Une partie des résultats aberrants pourrait s'expliquer par une mauvaise installation de certains puits résidentiels, dont les eaux environnantes seraient plus sensibles à l'infiltration depuis la surface. Les plus grands écarts étant plus

souvent observés dans les puits résidentiels, cette hypothèse pourrait partiellement expliquer les résultats obtenus;

- Un problème d'ordre analytique pourrait avoir affecté la qualité des données recueillies en 2012. En effet, les résultats d'analyse des échantillons récoltés lors de cette première campagne sont de qualité moyenne : près de la moitié des analyses présente un bilan des charges supérieur à 15 % (figure 4.3). Il existe donc un doute concernant la qualité des analyses de 2012.

Ces incohérences, notamment sur le plan analytique, signifient qu'il ne sera pas possible de se prononcer sur l'évolution de la qualité des eaux entre 2012 et 2013. Néanmoins, comme il a été mentionné plus haut, les analyses des échantillons récoltés lors de la campagne d'échantillonnage du MDDEFP en 2013 semblent être d'excellente qualité. Les résultats de cette campagne pourront donc servir à l'établissement d'un portrait initial représentatif des conditions hydrogéochimiques à Haldimand.

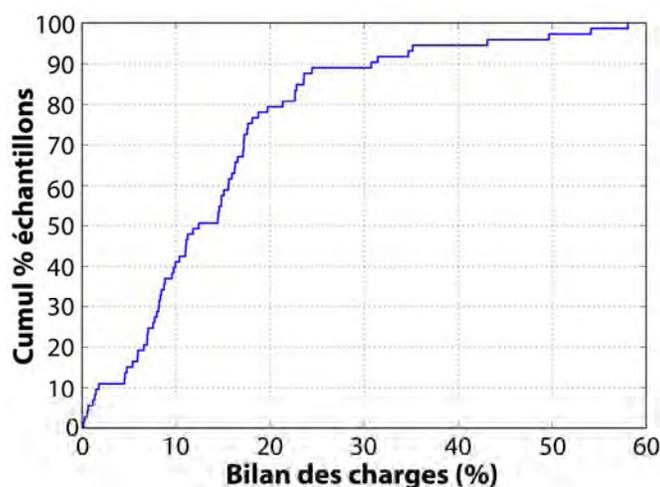


Figure 4.3 Bilan des charges des échantillons récoltés lors de la campagne 2012 de TechnoRem

4.2. Identification des types d'eau souterraine

4.2.1. Principes de l'analyse multivariée

En raison de la grande quantité de données hydrochimiques et du nombre important de variables à interpréter, une analyse statistique multivariée a été effectuée afin de mieux distinguer les relations entre les différents échantillons d'eau souterraine (Cloutier et al., 2008). Les méthodes d'analyse multivariée permettent en effet d'observer et d'analyser la distribution de plusieurs variables simultanément et simplifient la représentation de grands ensembles de données (Davis, 1986). Dans le cas présent, deux méthodes multivariées ont été appliquées : l'analyse hiérarchique regroupée ascendante (*agglomerative hierarchical cluster analysis*, HCA) et l'analyse en composantes principales (ACP).

4.2.1.1. Analyse hiérarchique regroupée ascendante

L'analyse hiérarchique regroupée ascendante (HCA) est une méthode de classification des différentes observations (p. ex., résultats d'analyses d'eau) dans des groupes (*clusters*) en fonction de leurs similitudes relatives (Davis, 1986). Le principe consiste à définir des groupes à l'intérieur desquels les membres sont relativement similaires, tout en étant dissimilaires aux membres des autres groupes (Davis, 1986). La classification hiérarchique regroupée produit un arbre (aussi appelé dendrogramme) qui représente visuellement les liens entre les différentes observations.

La procédure de classification est relativement simple et suit l'algorithme suivant (Härdle et Simar, 2003; Shalizi, 2009) :

1. Initialement, toutes les observations à plusieurs variables forment leur propre groupe;
2. Jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un groupe :
 - a. Trouver les groupes les plus similaires;
 - b. Fusionner (lier) ces deux groupes pour en former un nouveau;
3. Montrer les résultats sous la forme d'un dendrogramme.

La similitude (ou distance) entre deux groupes est définie par une règle d'amalgamation qui peut prendre plusieurs formes (Härdle et Simar, 2003). Lors de l'analyse hiérarchique, des groupes sont ainsi fusionnés successivement à des distances croissantes jusqu'à ce qu'il ne reste qu'un groupe contenant toutes les observations. Les niveaux de similitude (distances) auxquelles les groupes sont liés servent à construire le dendrogramme.

4.2.1.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode multivariée qui vise à réduire la dimension des observations et révéler une structure simple qui peut exister dans l'ensemble des données (Davis, 1986; Härdle et Simar, 2003). L'ACP consiste à trouver des combinaisons linéaires des variables (paramètres) qui permettent de définir de nouvelles variables indépendantes, ou composantes principales, qui capturent au maximum la variance observée dans les données (Härdle et Simar, 2003).

Plus précisément, les composantes principales sont les vecteurs propres de la matrice de variance-covariance des variables originales (Davis, 1986). Ces vecteurs définissent des axes (axes de composantes principales) qui sont orthogonaux entre eux et ainsi non corrélés (Härdle et Simar, 2003).

La première composante explique le plus de variance dans les données, la seconde explique le plus de variance résiduelle, et ainsi de suite jusqu'à la dernière composante (Cloutier 2008; Davis, 1986). Cette méthode permet souvent d'exprimer la majorité de la variance observée dans les données originales par un nombre limité de composantes (Härdle et Simar, 2003). Les nouvelles composantes définies permettent alors de mieux identifier les liens entre les variables originales.

La projection des données des observations sur les différents axes de composantes principales permet de calculer le poids des composantes des observations, qui représente alors la contribution de chaque observation à la variance totale (Davis, 1986). Le poids des composantes pour les variables représente les corrélations des variables originales relatives aux composantes principales (StatSoft, 2004). Ainsi, plus la valeur absolue du poids d'une variable donnée est élevée, plus fortement cette dernière est corrélée à la composante en question.

4.2.2. Application de l'analyse multivariée

Pour la présente étude, l'analyse multivariée a été effectuée selon le plan suivant :

1. Sélection des paramètres chimiques à utiliser pour l'analyse (section 4.2.2.1);
2. Préparation des données (section 4.2.2.2) :
 - 2.1. Exclusion d'échantillons et remplacement de valeurs manquantes;
 - 2.2. Modification des distributions et standardisation des variables;
3. Analyse multivariée :
 - 3.1. Analyse hiérarchique regroupée ascendante (section 4.2.3);
 - 3.2. Analyse en composantes principales (section 4.2.4).

Une fois les paramètres choisis et les données préparées, ces dernières ont été importées pour l'analyse dans le logiciel Statistica 6.1 (StatsSoft Inc, 2004). La même matrice de données a été utilisée pour l'analyse hiérarchique regroupée et pour l'analyse en composantes principales.

4.2.2.1. Sélection des paramètres chimiques

Les paramètres retenus pour l'analyse statistique ont été choisis selon les critères suivants :

- Paramètres majeurs représentant une large gamme de processus hydrochimiques potentiels;
- Disponibilité des mesures pour la majorité des échantillons;
- Mesures supérieures à la limite de détection dans plus de 85 % des échantillons;
- Fiabilité des mesures.

Sur la base de ces critères, les 16 paramètres suivants ont été retenus : Ba, Ca, Mg, K, Si, Na, Sr, alcalinité, Cl, carbone organique total (COT), F, NO₃, SDT, SO₄, pH et oxygène dissous (OD).

4.2.2.2. Préparation des données

Exclusion d'échantillons et remplacement de valeurs manquantes

Les échantillons présentant un bilan des charges supérieur à 10 % ont été exclus de l'analyse. Dans deux cas (échantillons GASP-80 et GASP-84), le bilan ionique semblait

directement relié à une mesure douteuse de l'alcalinité. Les valeurs d'alcalinité ont alors été remplacées par des valeurs estimées qui satisfont l'électroneutralité. Pour quatre échantillons (PH-02, POH-11-06, POH-11-09, POH-11-11), des valeurs d'OD manquaient. Cependant, ces échantillons sont caractérisés par des concentrations significatives de méthane dissous (> 2 mg/L). Dans de tels cas, les concentrations en OD sont généralement faibles et une valeur d'OD a été estimée à partir des données d'autres puits. Une valeur d'OD de 1 mg/L a été choisie, en accord avec les valeurs trouvées dans les échantillons montrant des concentrations en méthane supérieures à 2 mg/L (figure 4.4). Finalement, les résultats analytiques inférieurs à la limite de détection pour les paramètres sélectionnés se sont vu attribuer une valeur de 50 % de cette limite (Sanford et al., 1993).

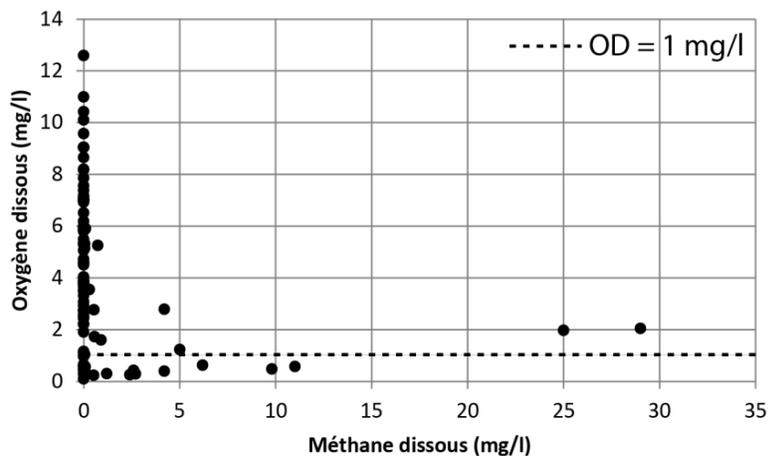


Figure 4.4 Relation entre les concentrations d'oxygène dissous (OD) et de méthane

Au total, 90 échantillons d'eau souterraine ont été choisis pour l'analyse. Six échantillons ont été rejetés en raison d'un bilan ionique insatisfaisant ou de certains paramètres manquants qui n'ont pas pu être estimés raisonnablement. L'ensemble de données sélectionnées comprend 90 sites d'échantillonnage et 16 paramètres hydrochimiques, formant une matrice de données de 90 x 16 éléments.

Transformation des données (Modification des distributions et standardisation)

Bien que les méthodes multivariées utilisées dans le cadre l'étude puissent le plus souvent être appliquées sans suppositions explicites concernant la distribution statistique des variables (c.-à-d. des paramètres hydrochimiques), l'analyse en composantes principales est parfois plus représentative lorsque les données suivent une distribution multivariée normale (c.-à-d. chaque variable suit une distribution normale) [Jolliffe, 2002]. Ainsi, les données de tous les paramètres ont été corrigées afin de suivre la distribution la plus normale possible. Une approximation de la distribution normale peut être réalisée en prenant le logarithme des données hydrochimiques, puisqu'elles ont souvent tendance à suivre des distributions log-normales (Sanford et al., 1993). Cependant, lors de la présente étude, la distribution normale était mieux approximée en prenant la racine carrée des données pour certains paramètres (tableau 4-1).

Les données ont ensuite été standardisées, ce qui consiste à transformer les valeurs

des données pour que la moyenne des valeurs pour chaque paramètre soit de 0 et l'écart-type, de 1. Cette transformation assure que chaque paramètre possède un poids égal et permet d'éviter une distorsion des calculs de proximité lors de l'analyse hiérarchique regroupée (Milligan et Cooper, 1988; Güler, 2002). Pour la présente étude, la standardisation a consisté à centrer et à réduire les variables, selon la formule suivante :

$$s = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Où s est la valeur standardisée, x est la valeur originale, μ est la moyenne de la variable et σ est l'écart-type de la variable. Ces transformations de données hydrochimiques ont déjà été effectuées et utilisées avec succès dans le cadre d'études hydrogéochimiques antérieures (p. ex., Schot et van der Wal, 1992; Güler, 2002; Cloutier et al., 2008).

Tableau 4-1 Corrections effectuées sur les paramètres avant l'analyse multivariée afin d'approximer au mieux une distribution normale

<i>Paramètre</i>	<i>Transformation</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Transformation</i>
Ba	logarithme	Cl	logarithme
Ca	logarithme	COT	logarithme
Mg	racine carrée	F	logarithme
K	logarithme	NO₃	logarithme
Si	racine carrée	SDT	logarithme
Na	logarithme	SO₄	racine carrée
Sr	logarithme	pH	logarithme
Alcalinité	logarithme	OD	racine carrée

4.2.3. Résultats de l'analyse hiérarchique regroupée (clustering)

L'analyse hiérarchique regroupée a permis de calculer les distances euclidiennes pour 90 échantillons, ce qui permet d'évaluer la similitude géochimique des différents échantillons. Le regroupement s'est effectué avec la méthode de Ward (Davis, 1986; Cloutier et al., 2008). Si on place une ligne de distinction (*phenon line*) à une distance de 14, l'analyse hiérarchique permet de définir huit groupes d'eaux distincts (figure 4.5). Les statistiques descriptives des quelques paramètres de chaque groupe sont montrées dans le tableau 4-2 Tableau 4-2.

Cette classification permet de distinguer d'une façon générale les eaux plutôt douces, dont la recharge est présumée récente (représentées par les groupes D1 à D4), des eaux plus salines (groupes S1 à S4), dont le temps de résidence moyen est présumé plus long pour permettre l'évolution géochimique de l'eau.

L'hydrochimie des éléments majeurs pour chaque échantillon compris dans l'analyse est montrée sur un diagramme de Piper (figure 4.6). Il est possible de distinguer deux voies principales d'évolution hydrochimique à partir des eaux caractéristiques de la recharge de type Ca-HCO₃ (représentées par les groupes D1, D2 et D3) :

- Une tendance d'échange ionique Na-Ca (évolution vers les eaux de type Na-HCO₃), visible dans les groupes D3, S1 et S3 (figure 4.7 B);
- Un mélange avec des eaux salines/marines de type Na-Cl (groupe S2). Ce mélange est visible dans les groupes D2, D3 et S4 et affecte tant les eaux de recharge Ca-HCO₃ que les eaux plus évoluées de type Na-HCO₃ (figure 4.7 A).

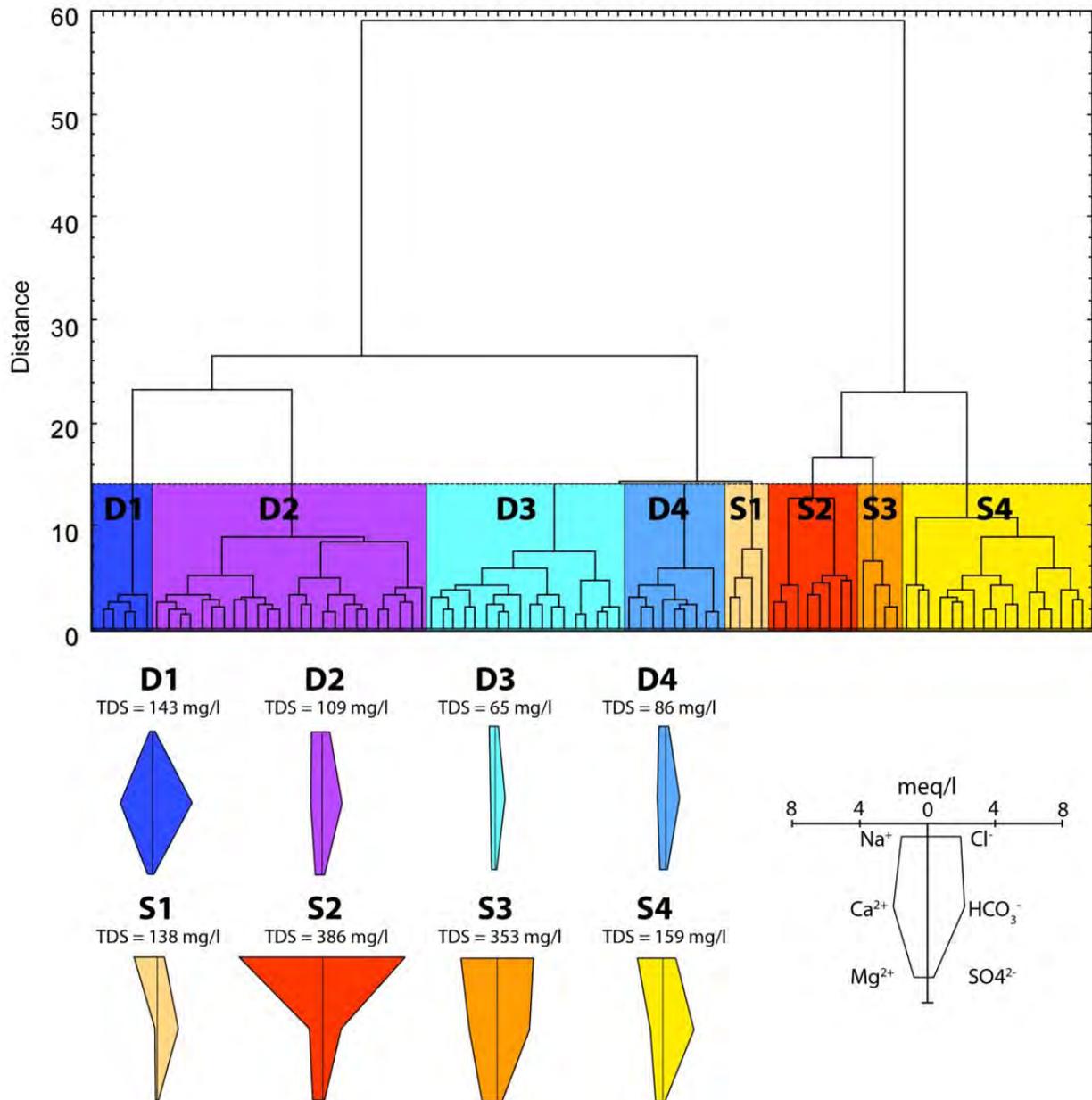


Figure 4.5 Dendrogramme obtenu lors de l'analyse hiérarchique regroupée. Des diagrammes de Stiff représentant les valeurs médianes des concentrations en ions majeurs pour chaque groupe défini par l'analyse sont montrés sous le dendrogramme.

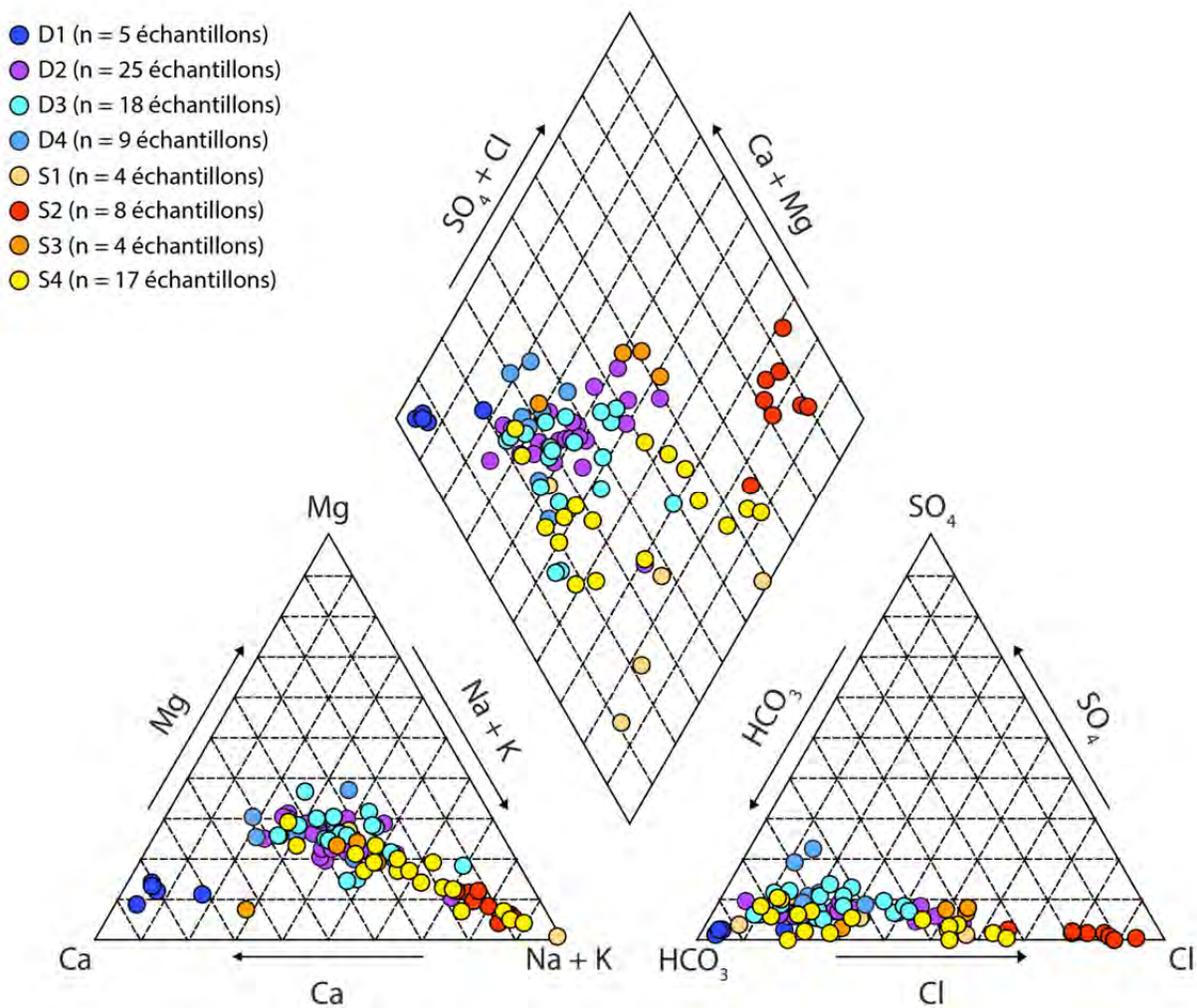


Figure 4.6 Diagramme de Piper montrant les faciès hydrochimiques des différents échantillons

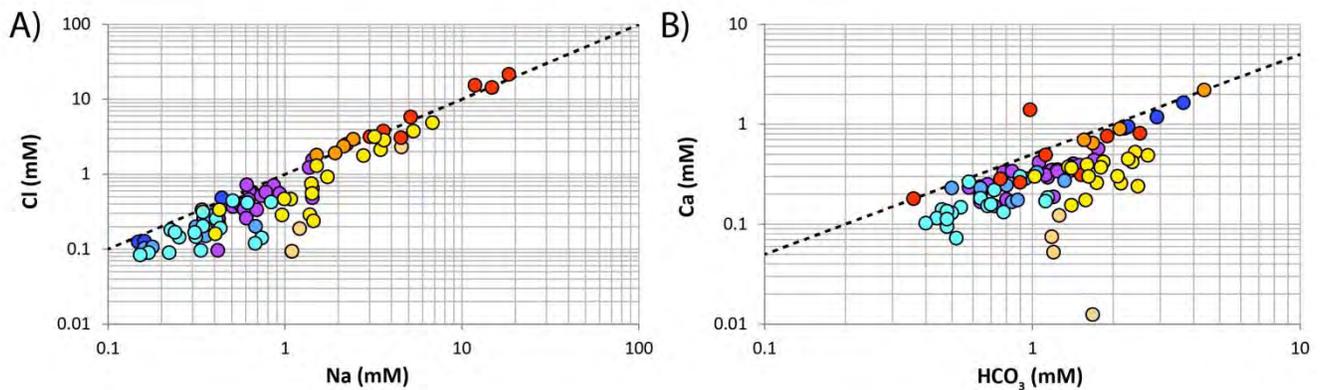


Figure 4.7 A) Concentration des chlorures (Cl) en fonction du sodium (Na); B) Concentration du calcium (Ca) en fonction du bicarbonate (HCO_3). Les lignes en pointillés représentent les lignes de dissolution de l'halite (NaCl) et de la calcite (CaCO_3) respectivement.

La répartition des différents groupes d'eau est montrée à la carte 33. La distribution spatiale des différents groupes d'eaux est complexe. En effet, il est possible de retrouver des eaux chimiquement très distinctes à de faibles distances, tant en bordure de la péninsule (puits résidentiels) qu'au centre de la région d'étude (puits d'observation). Ces observations sont discutées plus en détail à la section 6.1.

Groupes D1 et S3

Le groupe d'eau D1 comprend les quatre puits d'observations et le futur puits d'exploitation de la ville de Gaspé. Comme l'a montré l'analyse hiérarchique, ces eaux sont chimiquement différentes de celles présentes dans la péninsule d'Haldimand, ce qui témoigne de conditions hydrogéologiques et hydrochimiques distinctes à leur emplacement.

Le groupe d'eau S3 montre des signatures chimiques singulières qui ne sont pas clairement compatibles avec des processus naturels. En effet, bien que ce soient des eaux chargées, elles se distinguent clairement des autres eaux évoluées par des concentrations élevées en nitrates, en sulfates et en oxygène dissous, et par des concentrations plus faibles en baryum, strontium et bromures. Ces observations suggèrent que la chimie de ces eaux est influencée par des facteurs anthropiques (fosses septiques, champs d'épuration). Cependant, l'intensité de cette contamination est faible et la qualité des eaux reste bonne à ces endroits (voir la section 4.6).

Tableau 4-2 Statistiques descriptives des paramètres chimiques et physiques des échantillons d'eau appartenant aux groupes définis par l'analyse hiérarchique. Toutes les valeurs sont en mg/L, sauf le pH (sans unités)

Paramètre	Centile	D1		D2		D3		D4		S1		S2		S3		S4	
			Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés		Analysés/ Défectés
Baryum	25	0,01	5 / 5	0,07	25 / 25	0,03	18 / 18	0,02	9 / 9	0,02	4 / 4	0,52	8 / 8	0,04	4 / 4	0,14	17 / 17
	50	0,01		0,09		0,06		0,05		1,09		0,05		0,18			
	75	0,02		0,13		0,10		0,08		1,86		0,09		0,30			
	SD	0,01		0,05		0,05		0,04		0,01		0,03		0,21			
Calcium	25	36,9	5 / 5	9,9	25 / 25	4,6	18 / 18	7,7	9 / 9	1,3	4 / 4	10,9	8 / 8	26,9	4 / 4	10,4	17 / 17
	50	37,9		13,6		5,8		9,2		2,6		16,2		32,0		14,6	
	75	52,0		14,9		7,3		11,0		4,0		31,5		62,1		16,8	
	SD	12,5		3,8		2,3		2,1		1,8		16,4		29,3		4,2	
Cuivre	25	0	5 / 0	0,006	25 / 18	0,007	18 / 10	0,009	9 / 6	0	4 / 0	0,003	8 / 3	0,008	4 / 2	0,003	17 / 1
	50	0		0,016		0,012		0,032		0		0,006		0,015		0,003	
	75	0		0,050		0,050		0,038		0		0,009		0,021		0,003	
	SD	0		0,160		0,030		0,018		0		0,004		0,009		0,000	
Magnésium	25	3,5	5 / 5	4,0	25 / 25	2,5	18 / 18	3,3	9 / 9	0,7	4 / 4	4,4	8 / 8	8,1	4 / 4	3,8	17 / 17
	50	3,6		5,0		2,8		3,8		1,1		7,3		10,4		5,2	
	75	4,4		6,2		3,4		4,1		1,8		13,9		13,6		6,2	
	SD	0,7		1,4		0,7		0,8		0,9		7,5		4,3		2,4	
Potassium	25	0,3	5 / 5	1,0	25 / 25	0,6	18 / 18	0,5	9 / 9	0,8	4 / 4	1,3	8 / 8	1,4	4 / 4	1,3	17 / 17
	50	0,4		1,2		0,7		0,7		1,0		2,3		1,9		1,6	
	75	0,4		1,5		0,8		0,9		1,0		3,1		2,2		2,1	
	SD	0,1		0,3		0,2		0,2		0,1		1,1		0,5		1,2	
Silicium	25	2,2	5 / 5	1,1	25 / 25	1,7	18 / 18	2,4	9 / 9	0,7	4 / 4	1,2	8 / 8	1,1	4 / 4	2,2	17 / 17
	50	2,2		1,8		2,2		3,1		1,4		1,9		2,1		2,7	
	75	2,4		2,6		2,8		3,4		3,3		2,1		2,9		3,2	
	SD	0,1		0,9		0,8		0,7		1,9		0,6		1,4		0,9	
Sodium	25	3,3	5 / 5	11,2	25 / 25	5,5	18 / 18	6,4	9 / 9	26,5	4 / 4	76,2	8 / 8	39,5	4 / 4	24,3	17 / 17
	50	3,7		14,0		7,8		8,0		30,4		111,1		46,8		33,3	
	75	5,3		17,5		11,6		8,9		68,8		306,3		52,7		75,3	
	SD	3,0		7,1		4,6		3,5		38,2		142,0		9,0		40,5	
Strontium	25	0,16	5 / 5	0,07	25 / 25	0,03	18 / 18	0,05	9 / 9	0,02	4 / 4	0,25	8 / 8	0,05	4 / 4	0,16	17 / 17
	50	0,16		0,10		0,04		0,08		0,04		0,54		0,07		0,18	
	75	0,30		0,15		0,06		0,10		0,05		1,07		0,22		0,37	
	SD	0,08		0,06		0,02		0,04		0,02		0,60		0,15		0,14	
Alcalinité totale	25	112	5 / 5	40	25 / 25	24	18 / 18	32	9 / 9	60	4 / 4	42	8 / 8	81	4 / 4	77	17 / 17
	50	114		57		28		42		62		53		95		90	
	75	155		68		36		48		74		86		163		115	
	SD	32		17		11		12		12		35		66		24	
Bromures	25	0,00	5 / 0	0,11	25 / 2	0,00	18 / 0	0,00	9 / 0	0,27	4 / 1	0,35	8 / 8	0,00	4 / 0	0,16	17 / 8
	50	0,00		0,14		0,00		0,00		0,27		0,53		0,00		0,24	
	75	0,00		0,16		0,00		0,00		0,27		1,65		0,00		0,39	
	SD	0,00		0,04		0,00		0,00		0,00		0,81		0,00		0,15	

Paramètre	Centile	D1		D2		D3		D4		S1		S2		S3		S4	
			Analysés/ Déteçtés		Analysés/ Déteçtés		Analysés/ Déteçtés		Analysés/ Déteçtés								
Chlorures	25	3,4	5 / 5	9,9	25 / 25	4,2	18 / 0	4,9	9 / 9	5,0	4 / 4	110,5	8 / 8	65,7	4 / 4	11,5	17 / 17
	50	4,4		14,8		5,9		7,2		14,8		169,0		75,5		26,4	
	75	7,7		20,4		9,0		9,4		52,4		526,0		93,7		81,7	
	SD	6,0		11,2		4,2		2,8		36,5		258,8		18,3		50,9	
Carbone organique total	25	0,5	5 / 5	0,8	25 / 25	0,8	18 / 18	0,4	9 / 9	0,6	4 / 3	0,7	8 / 8	0,8	4 / 4	0,3	17 / 17
	50	0,7		0,9		1,3		0,4		1,0		0,8		1,2		0,6	
	75	1,2		1,1		1,9		0,5		1,9		1,1		1,4		1,0	
	SD	0,4		0,5		0,7		0,2		0,9		1,3		0,4		0,7	
Fluorures	25	0,04	5 / 5	0,03	25 / 22	0,06	18 / 18	0,05	9 / 9	0,16	4 / 4	0,06	8 / 6	0,04	4 / 4	0,11	17 / 17
	50	0,04		0,05		0,09		0,05		0,24		0,07		0,05		0,15	
	75	0,06		0,06		0,11		0,13		0,41		0,12		0,09		0,24	
	SD	0,02		0,02		0,04		0,05		0,18		0,03		0,04		0,11	
Nitrate et nitrite (mg/L N)	25	0,08	5 / 5	0,31	25 / 25	0,05	18 / 16	0,04	9 / 9	0,02	4 / 3	0,06	8 / 8	1,53	4 / 4	0,03	17 / 9
	50	0,15		0,42		0,09		0,16		0,02		0,08		2,76		0,04	
	75	0,21		0,66		0,19		0,30		0,06		0,10		3,16		0,08	
	SD	0,09		0,48		0,10		0,31		0,03		0,03		1,17		0,05	
Solides dissous séchés à 105 °C	25	127	5 / 5	93	25 / 25	60	18 / 18	67	9 / 9	115	4 / 4	264	8 / 8	302	4 / 4	142	17 / 17
	50	143		109		65		86		138		386		353		159	
	75	179		129		82		92		226		1 074		390		269	
	SD	36		30		15		1		95		497		55		101	
Sulfates	25	2,7	5 / 5	4,7	25 / 25	3,1	18 / 18	5,1	9 / 9	2,6	4 / 4	2,7	8 / 8	11,0	4 / 4	4,4	17 / 15
	50	2,9		5,6		3,5		6,3		3,9		3,9		14,8		6,3	
	75	3,3		6,2		4,1		7,9		6,0		5,6		17,0		7,2	
	SD	0,6		1,2		1,0		1,4		2,1		1,7		3,8		2,8	
Méthane MDDEFP	25	0,10	5 / 1	0,06	25 / 1	0,39	18 / 4	0,00	9 / 0	0,52	4 / 3	0,06	8 / 6	0,00	4 / 0	0,53	17 / 12
	50	0,10		0,06		2,47		0,00		1,20		0,74		0,00		3,85	
	75	0,10		0,06		4,20		0,00		2,10		14,00		0,00		10,40	
	SD	0,00		0,00		2,22		0,00		1,06		10,46		0,00		10,28	
Méthane CGC	25	0,10	5 / 1	0,02	25 / 6	0,07	18 / 6	0,00	9 / 0	0,91	4 / 3	0,04	8 / 6	0,00	4 / 0	0,42	17 / 10
	50	0,10		0,03		1,32		0,00		2,61		0,35		0,00		2,52	
	75	0,10		0,03		3,61		0,00		2,69		22,46		0,00		10,88	
	SD	0,00		0,01		2,09		0,00		1,35		12,66		0,00		12,65	
Oxygène dissous	25	6,5	5 / 5	2,7	25 / 25	1,5	18 / 18	5,5	9 / 9	0,3	4 / 4	1,0	8 / 8	6,2	4 / 4	0,5	17 / 17
	50	8,2		3,9		4,1		7,4		0,4		1,7		7,5		0,6	
	75	9,0		5,9		5,7		8,7		1,2		2,2		8,6		1,0	
	SD	2,6		2,2		2,3		2,4		1,6		0,9		3,0		0,7	
pH	25	7,66	5 / 5	6,31	25 / 25	6,05	18 / 18	6,67	9 / 9	7,41	4 / 4	6,02	8 / 8	6,12	4 / 4	7,22	17 / 17
	50	7,86		6,56		6,21		6,93		7,84		6,32		6,38		8,05	
	75	7,89		6,81		6,38		7,37		8,05		7,50		6,79		8,51	
	SD	0,19		0,49		0,31		0,42		0,64		0,87		0,65		0,86	

4.2.4. Résultats de l'analyse en composantes principales

Les résultats de l'analyse en composantes principales sont montrés à la figure 4.18 et au tableau 4-3.

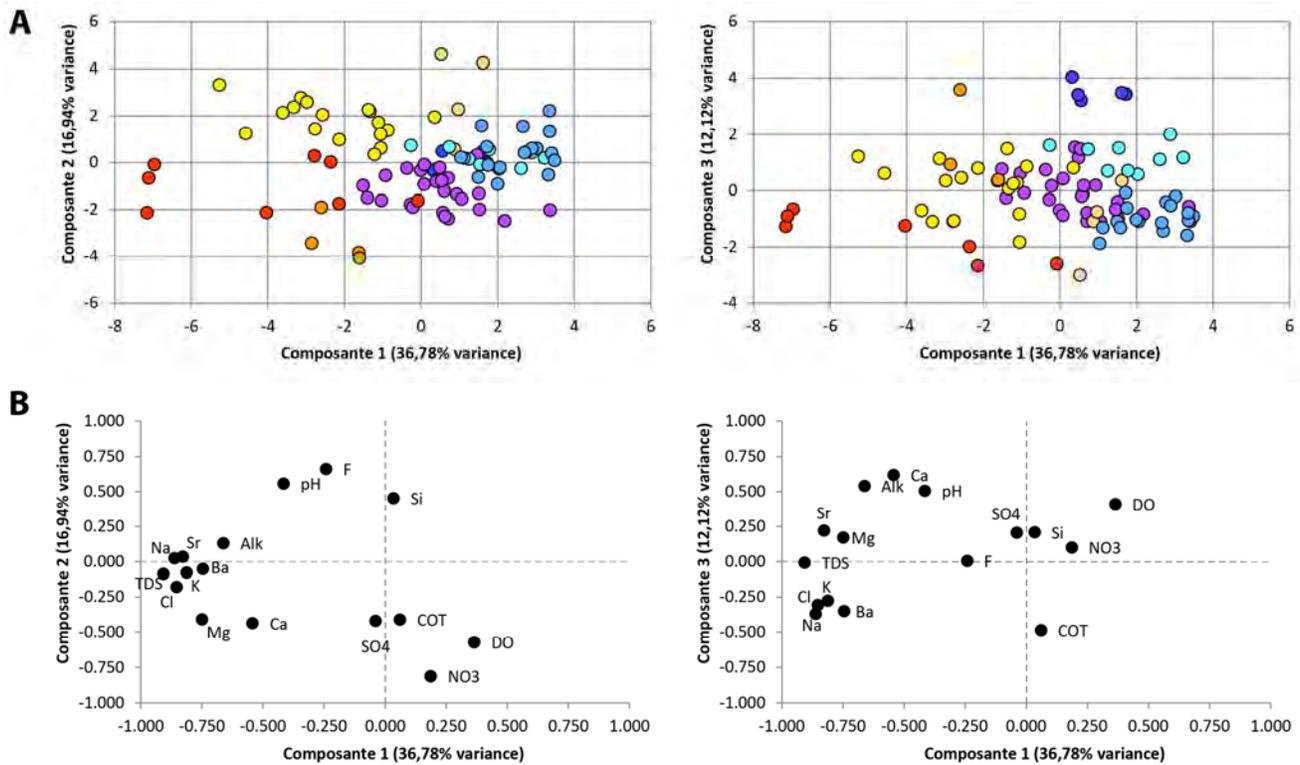


Figure 4.8 Résultats de l'analyse en composantes principales : A) Poids des composantes pour les 90 échantillons sélectionnés; B) Poids des composantes pour les 16 paramètres retenus

Les résultats sont montrés en fonction des huit groupes d'eau définis lors de l'analyse hiérarchique regroupée (figure 4.8 A). La première composante, qui explique plus d'un tiers de la variance observée, est reliée aux paramètres de salinité, alors que la seconde composante est reliée à des paramètres physicochimiques. Les trois premières composantes expliquent à elles seules près de deux tiers de la variance totale.

Les différents poids des composantes pour les groupes d'eau définis par l'analyse hiérarchique sont distincts d'un groupe à l'autre (figure 4.8 B). Ceci indique que les différents groupes d'eaux sont caractérisés par des signatures géochimiques particulières, confirmant la pertinence de la classification proposée par l'analyse hiérarchique.

Tableau 4-3 Poids des cinq premières composantes pour les 16 paramètres analysés (les poids maximaux pour chaque paramètre sont en gras)

Paramètre	Composante 1	Composante 2	Composante 3	Composante 4	Composante 5
Ba	-0,745	-0,053	-0,351	-0,214	0,195
Ca	-0,542	-0,437	0,618	-0,207	-0,062
Mg	-0,749	-0,409	0,170	-0,128	0,142
K	-0,811	-0,078	-0,277	0,066	0,139
Si	0,035	0,452	0,208	-0,235	-0,007
Na	-0,861	0,024	-0,371	0,191	-0,050
Sr	-0,827	0,034	0,220	-0,354	0,052
Alcalinité	-0,662	0,130	0,540	0,209	-0,261
Cl	-0,852	-0,180	-0,307	0,050	-0,070
COT	0,061	-0,411	-0,487	0,068	-0,646
F	-0,241	0,661	0,003	0,406	-0,241
NO ₃	0,187	-0,812	0,100	0,139	0,014
TDS	-0,906	-0,088	-0,008	0,078	-0,187
SO ₄	-0,039	-0,421	0,205	0,704	0,396
pH	-0,415	0,556	0,505	0,172	-0,102
OD	0,364	-0,572	0,410	-0,046	-0,329
% Variance	36,78	16,94	12,12	6,85	5,91
Cumul % variance	36,78	53,72	65,84	72,69	78,60

4.3. Provenance et temps de résidence des eaux souterraines

Divers traceurs permettant de caractériser la provenance et les temps de résidence des eaux ont été récoltés dans le cadre de la campagne du MDDEFP. Plusieurs échantillons ont été analysés pour les isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$), les gaz nobles (Ne, Ar), les CFC (CFC-11, CFC-12, CFC-113), le SF₆, le tritium (^3H) et le carbone-14 (^{14}C). Tous les résultats d'analyse sont compilés à l'annexe 2.

4.3.1. Provenance des eaux souterraines : isotopes stables et gaz nobles

Les isotopes stables de l'eau ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) et les concentrations de gaz nobles dissous peuvent fournir des renseignements sur l'origine des eaux souterraines en ce qui concerne le climat et l'altitude de recharge (Clark et Fritz, 1997; Aeschbach-Hertig et Solomon, 2013). Pour la présente étude, des analyses d'isotopes stables de l'eau ont été effectuées sur 27 échantillons au total (23 échantillons d'eau souterraine et 4 échantillons d'eau de surface). Les concentrations de gaz nobles (Ne, Ar) ont été déterminées pour 20 échantillons au total (15 puits d'observation d'Haldimand ainsi que les quatre puits d'observation et un futur puits d'exploitation de la ville de Gaspé).

4.3.1.1. Thermométrie avec les gaz nobles

La concentration des gaz nobles dans les eaux souterraines renseigne sur les conditions qui étaient présentes lors de la recharge des eaux, notamment sur la température de recharge (Aeschbach-Hertig et Solomon, 2013).

Deux facteurs principaux déterminent la composition d'une eau souterraine en gaz nobles : 1) la solubilité à l'équilibre de ces gaz dans l'eau à une température donnée, déterminée par la loi de Henry; 2) l'excès d'air, causé par de petites bulles de gaz atmosphérique qui sont entraînées vers le bas lors de la recharge, puis dissoutes sous l'effet de la pression hydrostatique croissante (Heaton et Vogel, 1981). La sursaturation causée par l'excès d'air doit être corrigée afin de déterminer plus précisément les concentrations à l'équilibre lors de la recharge qui renseignent sur la température. Plusieurs modèles de correction pour l'excès d'air existent (p. ex., Aeschbach-Hertig et Solomon, 2013). Dans le cas de la présente étude, l'excès d'air a été déterminé avec un modèle de dissolution totale avec les données de gaz nobles (Aeschbach-Hertig et al., 1999).

Il est supposé que les concentrations corrigées pour l'excès d'air représentent la solubilité à l'équilibre des gaz nobles lors de la recharge, dont le transfert entre l'atmosphère et l'eau dépend de la température; la température de recharge est alors calculée à partir de la loi de Henry (Aeschbach-Hertig et Solomon, 2013).

4.3.1.2. Résultats

Isotopes stables de l'eau

Les résultats des analyses des isotopes stables de l'eau sont montrés à la figure 4.9.

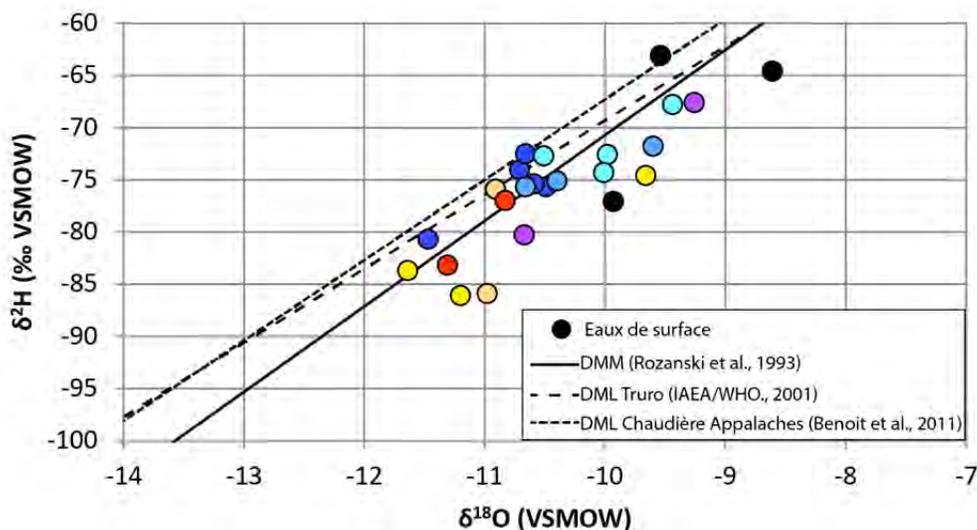


Figure 4.9 Isotopes stables des eaux souterraines et de surface. DMM : droite météorique mondiale (Rozanski et al., 1993); DML Truro : droite météorique locale de la station de Truro, Nouvelle-Écosse (IAEA/WHO, 2001); DML Chaudières-Appalaches : droite météorique locale du bassin de la rivière Chaudière (Benoit et al., 2011)

Ces résultats indiquent que les eaux souterraines rencontrées à Haldimand montrent une composition isotopique compatible avec celles de la droite météorique mondiale (DMM, Rozanski et al. 1993). En d'autres termes, les eaux échantillonnées semblent être d'origine météorique. Le léger enrichissement du $\delta^{18}\text{O}$ par rapport aux droites météoriques peut être dû à des phénomènes d'évaporation de l'eau qui s'infiltré, ou encore de sublimation de la couverture neigeuse avant sa fonte (Clark et Fritz, 1997). Cependant, la déviation est faible et la signature isotopique des eaux souterraines reste très proche de celle des droites météoriques montrées à la figure 4.9.

Gaz nobles

Les résultats d'analyses de gaz nobles montrent que les températures apparentes des eaux lors de la recharge sont comprises entre 5 °C et 15 °C (tableau 4-4).

Tableau 4-4 Températures de recharge estimées à partir des analyses de gaz nobles

<i>Puits échantillonné</i>	<i>Altitude du puits (m NMM)</i>	<i>T recharge (°C)</i>	<i>Puits échantillonné</i>	<i>Altitude du puits (m NMM)</i>	<i>T recharge (°C)</i>
PH-01	80	9	POH-11-11	106	5,5
PH-02	100	5,5	POH-11-12	119	8
PH-04	85	9	POH-11-13	86	12
POH-11-02	94	6,5	POH-11-14	82	8
POH-11-03	60	12	POH-11-15	84	6,5
POH-11-04	77	8	SJ-19	8	9
POH-11-05	91	7,5	SJ-27	9	12
POH-11-06	48	12	SJ-7	9	15
POH-11-09	84	8	SJ-8	6	14
POH-11-10	76	8	SJ/PE-02	6	10

Pour les puits se trouvant dans la péninsule d'Haldimand (série de puits PH- et POH-), il existe une corrélation négative entre la température de recharge estimée et l'altitude des puits d'observation (figure 4.10). L'ampleur de la variation de la température avec l'altitude est supérieure à celle attendue pour un gradient thermique atmosphérique naturel typique d'environ 6,5 °C/km (Stone et Carlson, 1979). Les implications de cette observation sur la compréhension du système hydrogéologique sont discutées à la section 4.3.3.

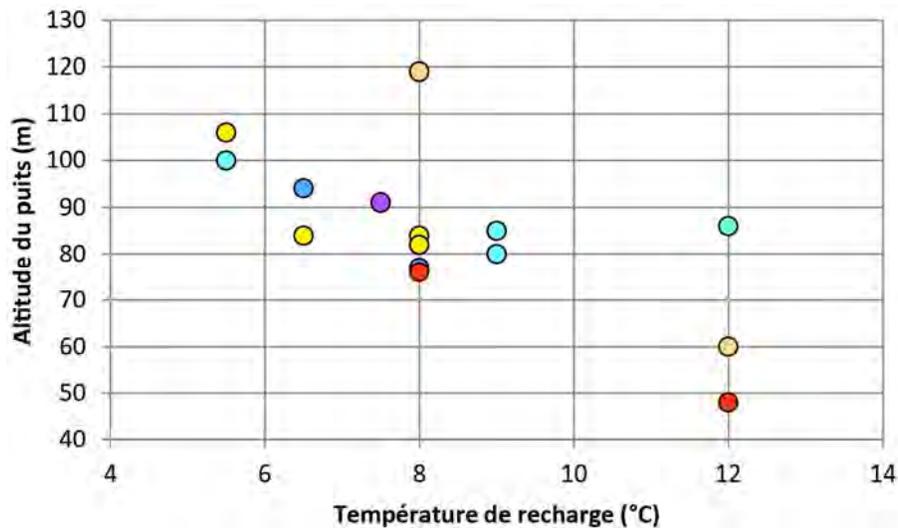


Figure 4.10 Température de recharge estimée à partir des données de gaz nobles par rapport à l'élévation des puits desquels proviennent les échantillons d'eau

4.3.2. Indicateurs de temps de résidence

Divers composés chimiques analysés peuvent être utilisés comme des indicateurs des temps de résidence des eaux souterraines échantillonnées. Ces marqueurs peuvent être des traceurs stables et peu réactifs (CFC, SF₆) ou encore des traceurs radioactifs (³H, ¹⁴C). Les CFC, le SF₆ et le ³H permettent de dater des eaux rechargées récemment (c.-à-d. après 1950 environ), alors que le ¹⁴C permet d'évaluer la présence d'eaux beaucoup plus anciennes (jusqu'à 30 000 ans environ) [Kazemi et al., 2006]. Des analyses de ³H et de ¹⁴C ont été effectuées sur 24 échantillons, dont 20 prélèvements des puits d'observation d'Haldimand et de la ville de Gaspé et 4 dans les ruisseaux. Des analyses de CFC (CFC-11, CFC-12, CFC-113) et de SF₆ ont été effectuées sur 20 échantillons au total, soit 15 des puits d'observation d'Haldimand ainsi que les quatre puits d'observation et le futur puits d'exploitation de la ville de Gaspé.

4.3.2.1. Datation avec CFC et SF₆

Les CFC et le SF₆ sont des molécules anthropogéniques dont la production est reliée à diverses activités industrielles. La production à grande échelle de CFC a débuté à la fin des années 1940, et leur concentration atmosphérique a augmenté de façon constante jusqu'aux années 1990, où la production a été limitée en raison de leurs effets néfastes sur la couche d'ozone (IAEA, 2006). La production industrielle de SF₆ a quant à elle débuté au milieu des années 1950, et la concentration atmosphérique de ce gaz n'a cessé d'augmenter depuis (IAEA, 2006). La figure 4.11 montre les concentrations représentatives de ces différents traceurs dans l'hémisphère nord depuis 1940 (USGS, 2014).

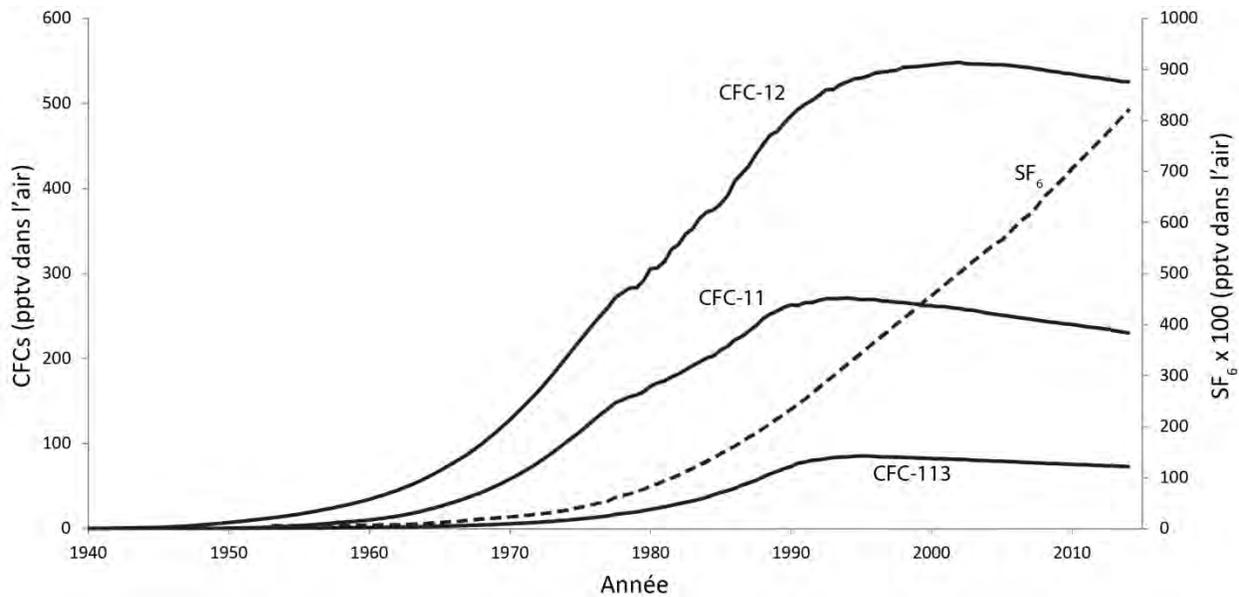


Figure 4.11 Concentrations atmosphériques représentatives de divers CFC et du SF₆ dans l'hémisphère nord depuis 1940 (modifié de USGS, 2014)

Les concentrations de CFC et de SF₆ qui sont incorporées dans le cycle hydrologique sont directement reliées aux concentrations atmosphériques de ces gaz (IAEA, 2006). Comme pour les gaz nobles, les concentrations de ces traceurs retrouvées dans les eaux souterraines dépendent de la solubilité à l'équilibre et de l'excès d'air (IAEA, 2006). Les CFC sont relativement peu sensibles à l'excès d'air et des corrections ne sont généralement pas nécessaires lorsque ce dernier est modéré (Darling et al., 2012). Cependant, le SF₆ est très sensible à ce phénomène, de sorte que des corrections sont nécessaires afin d'estimer raisonnablement la concentration du traceur à l'équilibre lors de la recharge (Plummer et Busenberg, 1999). Dans le cas de la présente étude, l'excès d'air du SF₆ a été déterminé directement à partir de l'excès d'air estimé pour les gaz nobles.

Une fois estimées les concentrations initiales à l'équilibre, des âges approximatifs des eaux souterraines peuvent être évalués à partir des courbes historiques de concentration atmosphérique des différents traceurs. Bien que la dérivation des âges soit compliquée par des phénomènes de mélange (section 4.3.2.3), la présence de ces traceurs permet d'établir l'existence d'une composante de recharge moderne dans les eaux souterraines.

4.3.2.2. Datation avec ³H et ¹⁴C

Le tritium (³H) est un radioisotope naturel produit dans la haute atmosphère et possède une relativement faible demi-vie (environ 12,43 ans) [Kazemi et al., 2006]. Les essais thermonucléaires réalisés entre les années 1950 et 1980 ont longtemps été la source principale de tritium atmosphérique; cependant, les quantités actuelles trouvées dans les eaux de précipitation reflètent les conditions naturelles (Clark et Fritz, 1997). Cet isotope est incorporé directement à la molécule d'eau et sa présence dans les eaux souterraines permet d'établir la présence d'une composante de recharge moderne.

Le carbone-14 (^{14}C) est également produit naturellement dans la haute atmosphère et a une demi-vie de 5 730 ans; il sert notamment à dater des eaux relativement anciennes (< 30 000 ans environ) [Kazemi et al., 2006]. Il est incorporé dans les eaux souterraines sous forme de carbone inorganique dissous (CID) principalement lors de leur passage dans les sols riches en matière organique (Clark et Fritz, 1997). L'utilisation du ^{14}C comme indicateur de temps de résidence est compliquée par la multitude de processus affectant le carbone dissous dans les eaux souterraines, qui comprennent notamment (Clark et Fritz, 1997) : la dissolution de carbonates, l'échange avec la matrice de l'aquifère, l'oxydation de composés organiques anciens, la méthanogenèse microbienne, etc. Pour cette étude, les activités mesurées n'ont pas été corrigées pour tenir compte de ces différents processus et ont servi telles qu'analysées à l'identification de la présence potentielle d'eaux anciennes.

4.3.2.3. Phénomènes de mélange

Le mouvement de l'eau dans un milieu poreux ou fracturé est complexe et est affecté par des phénomènes de dispersion, de diffusion moléculaire, d'écoulement croisé transformationnel ou encore de convergence de lignes de flux, qui vont tous donner lieu à un mélange d'eaux d'âges et d'origines différents (Castro et Goblet, 2005; Etcheverry, 2001; Kazemi et al., 2006). Ainsi, un échantillon d'eau n'a pas un âge précis, mais est caractérisé par une distribution statistique des âges. Cette distribution peut être complexe et multimodale, et elle est souvent difficile à mettre en relation avec l'âge moyen déterminé à partir des concentrations des traceurs (Cornaton et al., 2011; Cornaton et Perrochet, 2006; Etcheverry, 2001). Plusieurs modèles de mélange existent et permettent de tenir partiellement compte de ces phénomènes dans quelques conditions hydrogéologiques particulières (Maloszewski, 2000; McCallum et al., 2014). Cependant, le choix d'un modèle pertinent s'avère souvent difficile à justifier. Ainsi, sans l'utilisation d'un modèle de mélange représentant adéquatement la complexité des processus hydrogéologiques qui affectent les eaux échantillonnées, les données de traceurs d'âge ne peuvent pas décrire quantitativement les âges des eaux dans l'aquifère étudié (Kazemi et al., 2006; Maloszewski, 2000; Zuber et al., 2010). Dans le cadre de la présente étude, l'applicabilité de différents modèles de mélange n'a pas été évaluée, et seuls les résultats bruts sont utilisés directement afin de comprendre de façon globale les processus principaux actifs dans l'aquifère étudié.

4.3.2.4. Résultats

Les résultats de CFC et de SF_6 permettent de mettre en lumière une grande variabilité dans la concentration des traceurs dans les eaux souterraines (figure 4.12). Les eaux évoluées des groupes S1, S2 et S4 sont généralement caractérisées par de plus faibles concentrations de CFC et de SF_6 , alors que les eaux de recharge des groupes D1 à D4 présentent des concentrations plus élevées. Ceci reflète l'apport d'eaux majoritairement modernes dans les eaux de recharge et la présence d'eaux plus anciennes dans les eaux évoluées. Cependant, les concentrations des traceurs varient de façon continue et reflètent la présence et le mélange d'eaux d'âges différents.

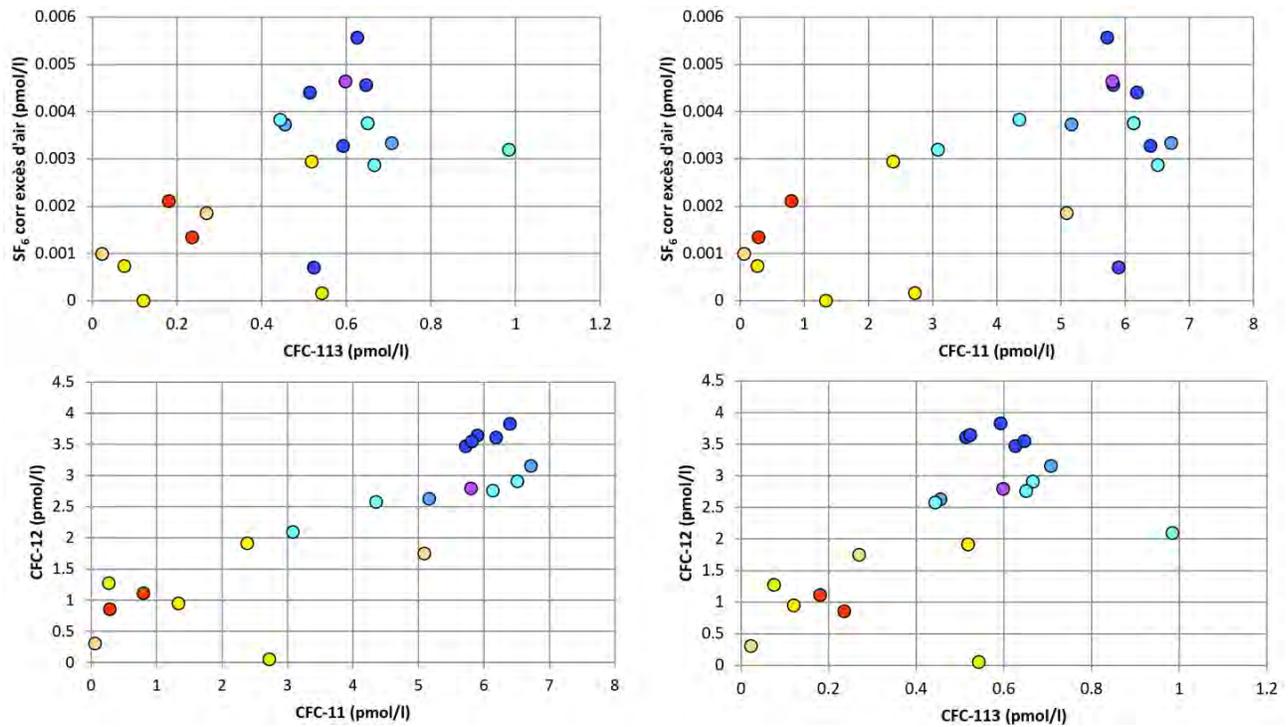


Figure 4.12 Graphiques montrant les concentrations de divers CFC et du SF₆. Seules les valeurs du SF₆ ont été corrigées pour l'excès d'air.

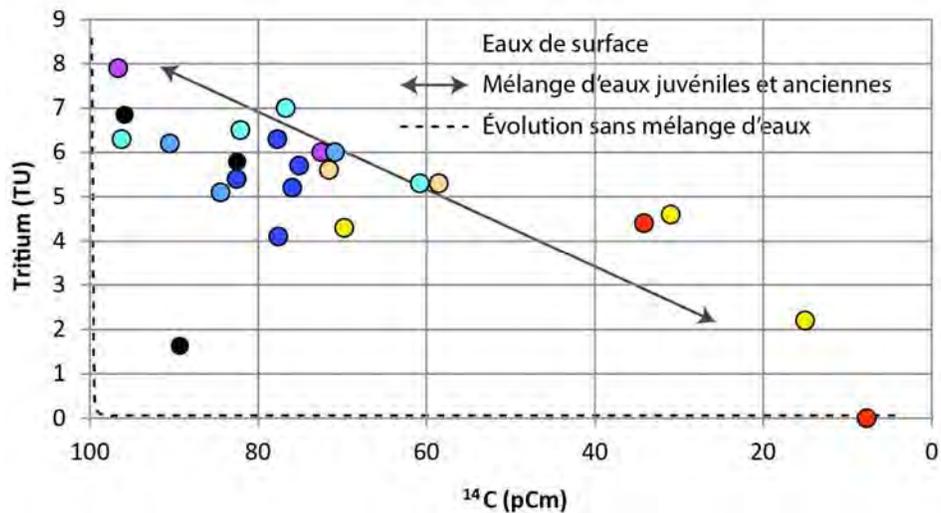


Figure 4.13 Concentration en tritium (en TU) par rapport au % de carbone moderne du ¹⁴C (pCm) du carbone inorganique dissous (CID)

Les données radioisotopiques montrent également un étalement des signatures entre les eaux plus anciennes et évoluées (groupes S1, S2 et S4) et les eaux de recharge modernes (groupes D1 à D4) [figure 4.13]. Contrairement aux données de CFC et de SF₆, les données de ¹⁴C permettent d'établir la présence d'eaux anciennes et le mélange avec des eaux anciennes, pour lesquelles l'activité du ¹⁴C est relativement faible ($a^{14}\text{C} < 40\%$ pmC) [figure 4.13]. Même si le signal du ¹⁴C peut être affecté par

une large gamme de processus (section 4.3.2.2), certaines eaux exhibent des temps de résidence moyens vraisemblablement très longs (plusieurs millénaires).

4.3.3. Discussion et implications sur le système aquifère

La synthèse des résultats présentés dans le présent chapitre peut fournir quelques indications concernant la dynamique du système hydrogéologique à Haldimand.

Comme indiqué à la section 4.3.1.2, les températures de recharge calculées à partir des données de gaz nobles et leur corrélation avec la topographie ne peuvent être expliquées par le gradient thermique topographique naturel. Ainsi, d'autres facteurs sont vraisemblablement responsables de la recharge d'eaux plus froides dans les hauts topographiques. Plusieurs indications montrent que les hauts topographiques sont des zones de recharge préférentielle, où la couverture de till est relativement mince par rapport aux zones plus basses (section 3.4.1). Les hydrogrammes de puits indiquent également que dans ces zones la recharge printanière due à la fonte des neiges est très importante et responsable de rehaussements considérables du niveau piézométrique (section 3.5.2). À l'opposé, les zones plus basses et confinées exhibent généralement une connectivité moins directe avec la surface et enregistrent des variations moins marquées du niveau piézométrique lors d'évènements de recharge. Ainsi, au printemps, les hauts topographiques reçoivent directement les eaux froides de fonte, alors que la recharge est plus diffuse dans les zones plus basses et confinées. Dans le second cas, les eaux de recharge seront plus chaudes puisqu'elles auront le temps de s'équilibrer avec la température du sol avant d'atteindre le toit de la nappe. Ces phénomènes expliqueraient alors le profil de température de recharge observé dans la péninsule d'Haldimand.

Malgré les grandes incertitudes inhérentes à leur utilisation, les indicateurs de temps de résidence (CFC, SF₆, ³H, ¹⁴C) fournissent des informations importantes concernant le système hydrogéologique à Haldimand. Ces traceurs montrent notamment que l'âge apparent des eaux échantillonnées est très variable dans le secteur d'étude. Comme attendu, les eaux les plus évoluées de type Na-HCO₃ et Na-Cl sont généralement caractérisées par de plus faibles concentrations ou activités de traceurs d'eau ayant un âge plus jeune (CFC, SF₆, ³H) que les eaux de recharge de type Ca-HCO₃. Cependant, des concentrations non négligeables de traceurs modernes sont retrouvées même dans les eaux les plus évoluées, indiquant qu'une certaine recharge se produit même en dehors des zones de recharge préférentielle. Le continuum de signatures géochimiques observé entre les eaux plus évoluées et vieilles et les eaux juvéniles témoigne d'un mélange variable d'eaux modernes et anciennes. Ainsi, le système hydrogéologique est caractérisé par des apports d'eau de recharge moderne sur tout le territoire, qui sont mélangés à diverses proportions à des eaux plus anciennes et vraisemblablement plus profondes qui font résurgence localement. Ce mélange d'eaux modernes et anciennes dans les eaux souterraines échantillonnées est aussi favorisé par l'utilisation de puits d'observation ouverts au roc sur de longs intervalles qui vont intercepter des eaux ayant des parcours superficiels ainsi que des eaux évoluées plus profondes dont les temps de résidence sont plus longs (voir coupe hydrogéologique à la figure 3.8).

4.4. Méthane et gaz associés

4.4.1. Méthane dans les environnements naturels et formation du méthane

4.4.1.1. Méthane dans les environnements naturels

Le méthane est un gaz qui est une composante naturelle des eaux souterraines dans une grande variété de contextes hydrogéologiques (Barker et Fritz, 1981; Clark et Fritz, 1997). Le méthane retrouvé dans les eaux souterraines peut provenir de l'action microbienne *in situ* sur des composés organiques et inorganiques, ou il peut trouver son origine dans la migration à partir de sources non natives de gaz (Barker et Fritz, 1981; Aravena et al., 1995; Pinti et al., 2013).

Dans un contexte d'exploitation pétrolière, il existe des craintes concernant la contamination des eaux souterraines des puits résidentiels par des hydrocarbures fugitifs, notamment le méthane. Bien que ce gaz ne soit pas toxique pour les humains, il peut présenter un risque d'explosion ou d'asphyxie lorsqu'il s'accumule dans des espaces clos (Gorody, 2012; Jackson et al., 2013). De plus, des bulles de méthane dans les puits peuvent mobiliser des particules fines qui pourront interférer avec le fonctionnement de la pompe et ainsi avoir un impact négatif sur la turbidité, la couleur, le goût et l'odeur de l'eau (Gorody, 2012).

Au Québec, aucun règlement n'existe encore concernant la présence de méthane dans les puits résidentiels. Cependant, un seuil d'alerte à 7 mg/L a été proposé dans un projet de règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection, publié le 29 mai 2013 dans la *Gazette officielle du Québec* (MDDEFP, 2013). Aux États-Unis, seules des situations où les concentrations de méthane dissous sont supérieures à 28 mg/L sont considérées comme critiques et nécessitent une intervention immédiate (ventilation, changement du système d'approvisionnement en eau) [DOI, 2001]. Lorsque les concentrations sont comprises entre 10 mg/L et 28 mg/L, la situation n'est pas considérée comme immédiatement dangereuse, mais une surveillance rapprochée de l'évolution de la concentration du méthane dans l'eau des puits est néanmoins recommandée (DOI, 2001).

4.4.1.2. Formation du méthane

Deux voies principales de formation du méthane sont reconnues : la formation thermocatalytique et la méthanogenèse microbienne (Bernard et al., 1978; Schoell, 1980). La première est active à des températures et profondeurs généralement élevées, alors que la seconde est typique d'environnements plutôt superficiels (Bernard et al., 1978). Puisque les gaz d'origine thermocatalytique et microbienne sont formés dans des environnements différents, l'établissement du processus de formation du méthane retrouvé dans les eaux souterraines peut apporter quelques indications concernant l'existence de liens hydrauliques potentiels entre l'aquifère de proche surface et les zones pétrolifères plus profondes.

4.4.1.3. Méthane biogénique

Le méthane biogénique est formé par des archées méthanogènes anaérobies dans des environnements généralement superficiels caractérisés par des conditions anoxiques et réductrices (Whiticar, 1999). La méthanogenèse microbienne dans les eaux souterraines est un phénomène très répandu, au point où la majorité des aquifères superficiels caractérisés par des eaux peu oxygénées contiennent des quantités mesurables de méthane dissous en raison de l'activité microbienne (Gorody, 2012).

Deux processus principaux de méthanogenèse microbienne sont admis (Schoell, 1983; Whiticar, 1999) : 1) la fermentation de matière organique; 2) la réduction des carbonates. La fermentation de substrats méthylés est généralement le processus de méthanogenèse dominant dans des environnements d'eau douce, alors que la réduction des carbonates est plus typique des eaux marines et salines (Clark et Fritz, 1997). Cependant, ces deux mécanismes peuvent opérer successivement, voire simultanément, à un endroit donné dans une grande variété de conditions environnementales (Whiticar, 1999).

Le méthane produit par fermentation de composés méthylés est caractérisé par une signature isotopique en hydrogène très légère ($-400\text{‰} < \delta^2\text{H}_{\text{CH}_4} < -250\text{‰}$) et une valeur du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ comprise entre -50‰ et -70‰ (Schoell, 1988; Whiticar, 1999). Le CO_2 produit lors de la fermentation de matière organique est isotopiquement enrichi en ^{13}C , ce qui se traduit par une augmentation du $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous dans l'eau (CID).

La méthanogenèse par réduction des carbonates génère du méthane avec un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ très faible ($-110\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} < -60\text{‰}$) et un $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ compris entre -250‰ et -150‰ (Whiticar, 1999). Le méthane produit par ce processus est isotopiquement plus léger que le carbonate réduit ($40\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} < 55\text{‰}$); ainsi, le carbonate résiduel dans l'eau est progressivement enrichi en ^{13}C lors de la méthanogenèse (Whiticar, 1999).

Les gaz biogéniques sont généralement composés presque exclusivement de méthane (gaz secs), bien que des traces d'éthane soient occasionnellement retrouvées (Bernard et al., 1978; Schoell, 1980; Taylor et al., 2000). En général le rapport molaire méthane/éthane+propane ($\text{C}_1/\text{C}_2+\text{C}_3$) est supérieur à 100 (Bernard et al., 1978; Taylor et al., 2000)

4.4.1.4. Méthane thermogénique

Le méthane thermogénique est formé en profondeur par craquage thermique du kérogène ou de l'huile à des températures supérieures à 120°C (Barker, 1990). Bien que formé en profondeur, le gaz thermogénique peut parfois se retrouver naturellement dans des aquifères superficiels (p. ex., Davis, 1992; Wilson, 2014). La migration verticale lente d'hydrocarbures à travers les couches géologiques peu perméables, la remontée par des cheminements préférentiels (fractures, failles, lithologies perméables, etc.) ou encore l'érosion et l'exhumation des lithologies gazéifères plus profondes peuvent conduire à la présence de quantités significatives de méthane thermogénique et d'autres hydrocarbures associés à de relativement faibles profondeurs (Davis, 1992; Schumacher, 2000).

Généralement, le méthane thermogénique est caractérisé par un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ plus élevé ($-60\text{‰} < \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} < -20\text{‰}$) et un $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ compris entre -300‰ et -150‰ (Schoell, 1988). La genèse thermocatalytique d'hydrocarbures à partir de matière organique est aussi caractérisée par la formation d'une variété de composés à chaîne plus longue que le méthane (C_{2+}), notamment l'éthane (C_2) et le propane (C_3) [Schoell, 1983]. Les gaz thermogéniques contiennent donc généralement des quantités significatives d'éthane et de propane et ont un rapport molaire $\text{C}_1/\text{C}_2+\text{C}_3$ inférieur à 100 (Bernard et al., 1978; Taylor et al., 2000).

4.4.1.5. Migration, mélange et oxydation des gaz

Un résumé général des caractéristiques chimiques et isotopiques du méthane biogénique et thermogénique décrites ci-dessus est donné au tableau 4-5. Cependant, divers processus secondaires peuvent avoir un effet sur les signatures isotopiques et compositionnelles des gaz après leur formation. La migration latérale ou verticale des gaz thermogéniques, l'oxydation bactérienne du méthane ou encore le mélange de gaz d'origines différentes vont tous avoir une incidence sur la composition des gaz échantillonnés.

Tableau 4-5 Signatures isotopiques et chimiques typiques des gaz thermogéniques et biogéniques

	<i>Gaz biogénique</i>	<i>Gaz thermogénique</i>
$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$	-110 ‰ à -50 ‰	-60 ‰ à -20 ‰
$\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$	-400 ‰ à -150 ‰	-300 ‰ à -150 ‰
$\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$	>> 100	< 100

La migration du gaz thermogénique vers des zones superficielles peut appauvrir le gaz en hydrocarbures à chaîne plus longue (C_{2+}), qui seront ségrégués préférentiellement lors de leur passage dans des lithologies moins perméables (Schoell, 1983). Ceci aura pour effet d'augmenter le rapport $\text{C}_1/(\text{C}_2+\text{C}_3)$, alors que la signature isotopique du méthane reste inchangée.

Le mélange de gaz d'origines différentes (par exemple de gaz biogéniques et thermogéniques lors de la migration verticale de ce dernier dans des zones superficielles) va produire un gaz avec une signature isotopique et compositionnelle intermédiaire, représentative des proportions des différents gaz mélangés.

L'oxydation du méthane par des bactéries méthanotrophes se produit dans des environnements oxygénés et anoxiques dans les zones superficielles, ce qui représente un processus majeur de consommation du méthane dans la géosphère (Whiticar, 1999). Les bactéries méthanotrophes vont oxyder préférentiellement du méthane isotopiquement léger, ce qui va entraîner une augmentation du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ et du $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4}$ du méthane résiduel et une baisse relative de la concentration de méthane par rapport aux hydrocarbures à chaîne plus longue (C_{2+}). La décomposition du méthane en CO_2 (ou HCO_3^-) lors de l'oxydation du méthane a pour effet de diminuer le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous dans l'eau (Clark et Fritz, 1997).

Les transformations décrites ci-dessous peuvent rendre difficile la détermination de l'origine du méthane puisque plusieurs processus peuvent mener à une composition isotopique et chimique donnée d'un échantillon de gaz. Ainsi, la détermination des processus actifs dans le système étudié est capitale dans l'interprétation des analyses isotopiques et chimiques des gaz dissous.

4.4.2. Caractéristiques des gaz à Haldimand

4.4.2.1. Gaz de Haldimand n° 1

Les résultats d'analyses chimiques de deux échantillons de gaz récupérés dans le puits Pétrolia Haldimand n° 1 sont compilés au tableau 4-6 (SIGPEG, 2014). Aucune analyse isotopique n'a été effectuée sur ces échantillons. Ces deux échantillons de gaz montrent des signatures compositionnelles thermogéniques évidentes (rapport $C_1/C_{2+} < 10$). Il est important de noter qu'un de ces échantillons a été prélevé dans l'intervalle entre 205 et 551 m de profondeur, soit quelques centaines de mètres au-dessus du toit du réservoir pétrolier, qui se situe à environ 830 m à cet endroit (SIGPEG, 2014).

Tableau 4-6 Analyses chimiques de deux échantillons de gaz récoltés dans le puits Pétrolia Haldimand n° 1 (SIGPEG, 2014)

Composé	% molaire	
	205 à 551 m	950 à 1 080 m
Méthane	83,1098	82,0471
Éthane	6,4879	7,5754
Propane	3,9417	4,9957
N-butane	1,1369	1,4579
I-butane	1,3932	1,5823
Néo-pentane	0,022	0,0301
I-pentane	0,6306	0,5867
N-pentane	0,5419	0,4546
I-hexane	0,1861	0,1139
N-hexane	0,229	0,1851
Cyclohexane	0,0378	0,0267
N-heptane	0,0309	0,0351
N-octane	0,0103	0,0085
N-nonane	0,0016	0,0031
Azote	2,2247	0,4291
CO ₂	0,0156	0,4687

4.4.2.2. Concentrations et isotopes du C₁, C₂ et C₃ dans les eaux souterraines

L'analyse de la concentration de gaz dissous (méthane C₁, éthane C₂ et propane C₃) a été effectuée pour tous les échantillons prélevés lors de la campagne 2013 du MDDEFP par les laboratoires de la CGC et du MDDEFP. Lorsque les concentrations de

gaz dissous étaient suffisamment élevées ($> 0,1$ mg/L selon les analyses de la CGC), des analyses d'isotopes stables des gaz ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^2\text{H}$) ont pu être réalisées par les laboratoires de l'Université d'Ottawa. Lorsque les échantillons ont été envoyés pour analyse isotopique, le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous total a également été mesuré sur les échantillons non filtrés.

Du méthane a été détecté dans 23 puits résidentiels, dans 13 puits d'observation d'Haldimand et dans un puits d'observation de la ville de Gaspé (carte 34). La concentration moyenne du méthane dans les puits résidentiels où du méthane a été détecté est d'environ 2 mg/L. Cependant, la concentration de méthane dépasse 1 mg/L dans seulement six puits résidentiels (GASP-02 : 1,7 mg/L, GASP-04 : 8,3 mg/L, GASP-05 : 10,9 mg/L, GASP-78 : 8,9 mg/L, GASP-84 : 4,1 mg/L, GASP-85 : 1,5 mg/L, selon les analyses de la CGC). Les statistiques descriptives des concentrations en méthane sont données au tableau 4-7. Les isotopes stables du méthane ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^2\text{H}$) ont été mesurés sur 20 échantillons au total (9 puits résidentiels et 11 puits d'observation); les résultats sont montrés au tableau 4-8.

Tableau 4-7 Statistiques descriptives des analyses de gaz dissous C_1 , C_2 et C_3 (mg/L)

Composé		Puits résidentiels		Puits d'observation Haldimand				Puits d'observation Ville de Gaspé (SJ-07)	
		MDDEFP	CGC	MDDEFP	CGC	MDDEFP	CGC	MDDEFP	CGC
C_1 Méthane (CH_4)	Moyenne	2,45	1,81	10,97	10,18	0,1	0,1		
	Médiane	0,65 n = 16	0,34 n = 21	4,20 n = 10	3,24 n = 13	0,1 n = 1	0,1 n = 1		
	Max	11,00	10,88	29,00	35,23	0,1	0,1		
C_2 Éthane (C_2H_6)	Moyenne	0,08	0,02	0,73	0,29				
	Médiane	0,08 n = 1	0,02 n = 3	0,37 n = 6	0,17 n = 10	n = 0	n = 0		
	Max	0,08	0,05	1,90	1,20				
C_3 Propane (C_3H_8)	Moyenne				0,01				
	Médiane	n = 0	n = 0	n = 0	0,01 n = 1	n = 0	n = 0		
	Max				0,01				

Tableau 4-8 Résultats analytiques de gaz dissous, d'isotopes du méthane et du $\delta^{13}\text{C}$ des échantillons sur lesquels des analyses isotopiques du méthane ont été effectuées, selon les résultats de la CGC. ND : non détecté

Échantillon	Méthane (mg/L)	Éthane (mg/L)	Propane (mg/L)	$\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ (‰ PDB)	$\delta^2\text{H}\text{-CH}_4$ (‰ VSMOW)	$\delta^{13}\text{C}\text{-CID}$ (moyenne) [‰ PDB]
GASP-02	1,8	ND	ND	-53,5	-202,1	-18,1
GASP-04	8,3	0,046	ND	-52,5	-237,8	-11,0
GASP-05	10,9	0,016	ND	-53,5	-251,6	-4,9
GASP-06	0,6	ND	ND	-48,5	-188,9	-17,8
GASP-20	0,4	ND	ND	-34,4	-63,5	-20,8
GASP-21	0,3	traces	ND	-37,5	-48,0	-21,4
GASP-78	8,9	0,019	ND	-51,9	-253,7	-11,0
GASP-84	4,1	traces	ND	-64,6	-281,0	-10,3
GASP-85	1,5	ND	ND	-66,8	-206,6	-23,2

Échantillon	Méthane (mg/L)	Éthane (mg/L)	Propane (mg/L)	$\delta^{13}\text{C-CH}_4$ (‰ PDB)	$\delta^2\text{H-CH}_4$ (‰ VSMOW)	$\delta^{13}\text{C-CID (moyenne)}$ [‰ PDB]
PH-01	3,6	0,255	0,014	-38,4	-159,5	-17,7
PH-02	2,1	0,052	traces	-53,7	-226,8	-21,0
POH-11-03	2,6	0,010	traces	-54,4	-246,7	-17,6
POH-11-06	22,5	0,177	traces	-56,0	-234,9	1,7
POH-11-09	27,9	0,791	traces	-51,6	-235,4	4,5
POH-11-10	26,7	0,158	traces	-56,0	-235,0	12,5
POH-11-11	3,2	0,003	ND	-65,7	-268,3	-3,7
POH-11-12	2,7	0,011	traces	-49,6	-227,6	-19,0
POH-11-13	5,1	0,231	traces	-51,0	-258,0	-25,9
POH-11-14	35,2	1,202	traces	-54,4	-257,9	13,8
POH-11-15	0,6	ND	traces	-56,6	-226,2	-18,6

4.4.3. Origines du méthane

Tel qu'il est indiqué à la section 4.4.1, les mécanismes de formation des gaz C₁, C₂ et C₃ analysés et les processus secondaires les affectant (migration, oxydation et mélange) peuvent partiellement être déduits à partir des signatures isotopiques et chimiques des gaz dissous.

Les résultats des analyses sont reportés sur des figures montrant les champs isotopiques et compositionnels typiques des différents gaz biogéniques et thermogéniques (figure 4.14 et figure 4.15). De tels diagrammes ne permettent pas à eux seuls de déterminer le mode de formation du méthane en raison des processus secondaires cités ci-dessus; néanmoins, certaines observations peuvent être faites :

- Quelques échantillons exhibent clairement une signature biogénique en raison d'un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ et d'une concentration en alcanes à chaîne plus longue (C₂+C₃) relativement faibles (GASP-84, GASP-85, POH-11-11).
- Un échantillon porte une signature thermogénique nette (PH-01). Cet échantillon est le seul qui contient des quantités mesurables de propane (14 µg/l, ou ppb).
- Plusieurs échantillons de composition intermédiaire (p. ex., POH-11-09, POH-11-13, POH-11-14, PH-02) montrent des signatures témoignant d'un mélange de gaz d'origines mixtes. Ces échantillons sont caractérisés par des quantités significatives d'éthane et des traces de propane, et une signature isotopique relativement légère ($-55 \text{‰} < \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} < -50 \text{‰}$)
- Quelques échantillons exhibent des signatures compatibles avec des processus d'oxydation bactérienne du méthane (p. ex., GASP-21, GASP-20, GASP-06). Ils sont caractérisés par des signatures isotopiques relativement lourdes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} > -50 \text{‰}$, $\delta^2\text{H}_{\text{CH}_4} > -200 \text{‰}$), mais ne contiennent néanmoins pas de concentrations détectables d'éthane ou de propane. Il est cependant aussi possible que les composés plus lourds aient été ségrégués lors d'une éventuelle migration du gaz.

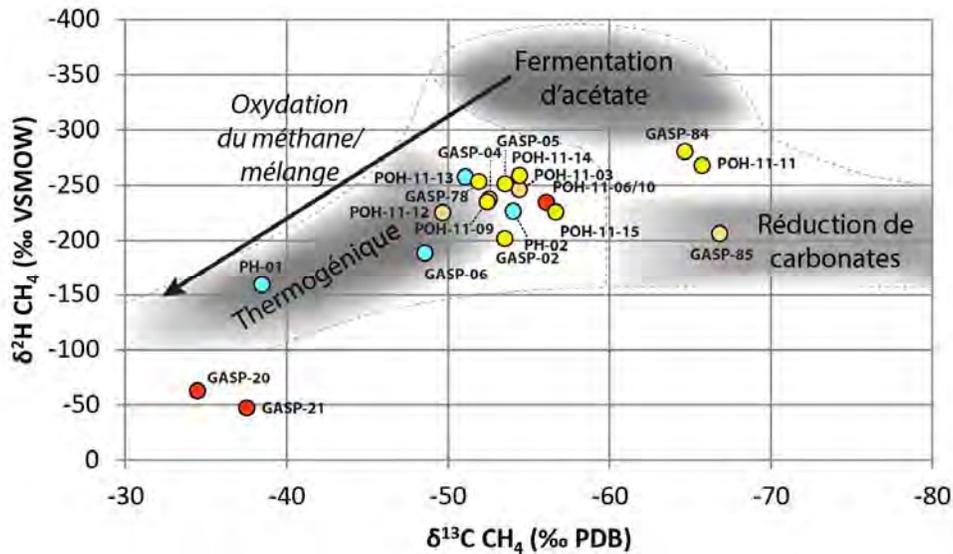


Figure 4.14 Isotopes stables ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^2\text{H}$) du méthane dissous. Les champs correspondant aux signatures isotopiques du méthane formé par différents mécanismes sont montrés. Modifié de Whiticar (1999)

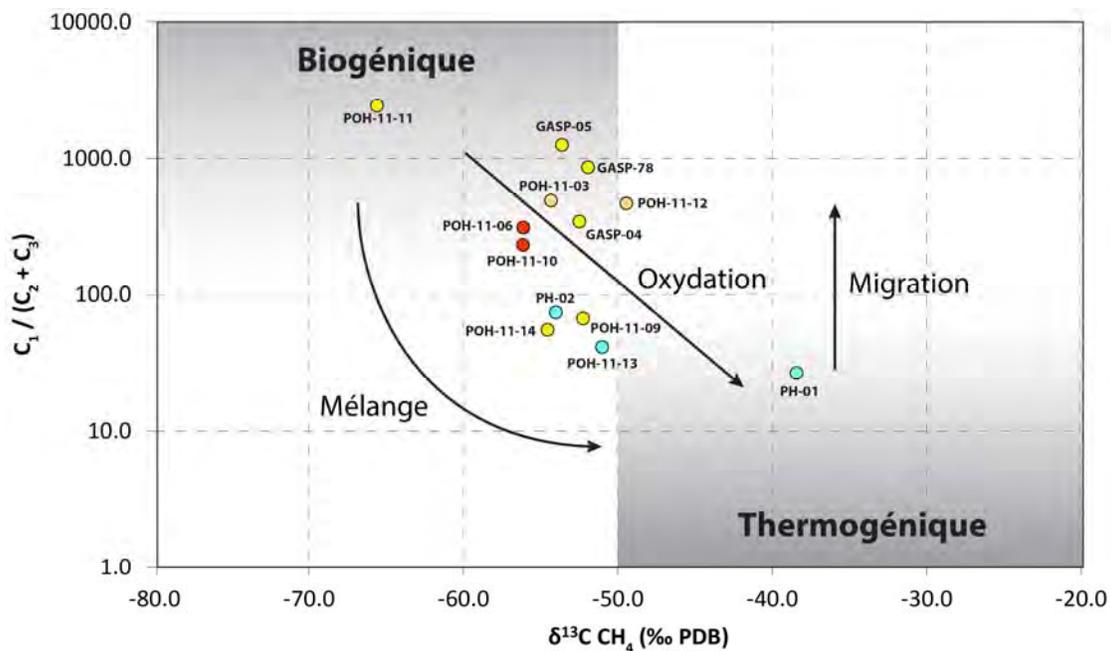


Figure 4.15 Isotopes du carbone du méthane en fonction du rapport molaire méthane (C_1)/éthane (C_2)+propane (C_3). Seuls les échantillons pour lesquels des concentrations d'éthane et/ou de propane ont été détectées sont reportés ici. Les concentrations de gaz dissous mesurées par la CGC ont été utilisées ici. Les effets globaux du mélange de gaz thermogénique et biogénique, de l'oxydation bactérienne du méthane et de la migration de gaz thermogénique sont montrés. Modifié de Bernard et al. (1978)

Le $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous à Haldimand est caractérisé par des valeurs comprises entre -27 ‰ et +15 ‰. La majorité des valeurs du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ les plus négatives (< 15 ‰) sont plutôt cohérentes avec les eaux de recharge sans dissolution significative de minéraux carbonatés (Clark et Fritz, 1997). Les eaux Ca- HCO_3 du groupe D1 sont

quant à elles caractérisées par un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ plus enrichi qui témoigne plutôt de la dissolution de carbonates, puisque ces eaux ne sont pas associées à des quantités importantes de méthane. Cependant, un certain nombre d'échantillons des groupes d'eaux évoluées S2 et S4 présentent des valeurs fortement enrichies du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ ($> 0 \text{‰}$) qui ne peuvent pas être expliquées uniquement par des réactions inorganiques du carbonate dissous (Aravena et al., 1995; Clark et Fritz, 1997). Les valeurs les plus enrichies du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ associées aux concentrations de méthane parmi les plus élevées (figure 4.16) ainsi que la corrélation positive entre le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ et l'alcalinité totale (figure 4.17) suggèrent que le CID est localement fortement influencé par le phénomène de méthanogenèse microbienne.

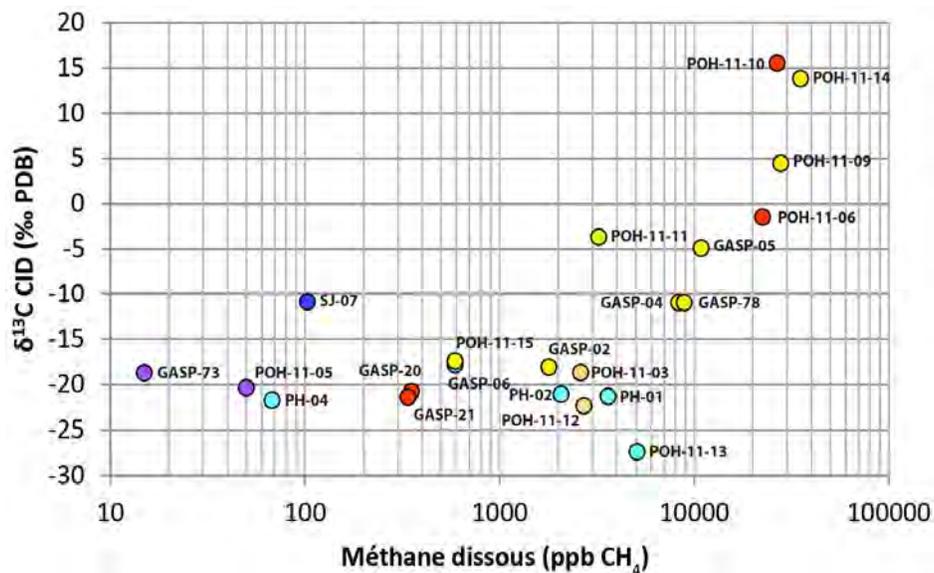


Figure 4.16 $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous (CID) en fonction de la concentration de méthane dissous

Cependant, les gaz associés aux eaux montrant le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ les plus élevés n'exhibent pas nécessairement des signatures distinctement biogéniques puisqu'elles sont caractérisées par un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ intermédiaire et parfois par des quantités significatives d'éthane. Cette observation permet de suggérer que ces eaux sont affectées par un mélange avec des gaz thermogéniques, ou encore, dans une moindre mesure, par des phénomènes d'oxydation bactérienne.

Les concentrations les plus élevées en méthane sont préférentiellement associées aux groupes d'eau évoluée S1, S2 et S4, bien que des concentrations élevées aient été détectées dans des eaux du groupe D3. Comme mentionné précédemment, les données d'isotopes stables des gaz dissous et du CID suggèrent qu'une production bactérienne de méthane est active dans l'aquifère étudié. Puisque les eaux évoluées sont caractérisées par des conditions réductrices et peu oxygénées, elles sont favorables à la méthanogenèse bactérienne (Tòth, 1999; Gorody, 2012). Ainsi, l'association du méthane avec les eaux évoluées serait en partie la conséquence des conditions d'oxydoréduction caractéristiques des eaux évoluées.

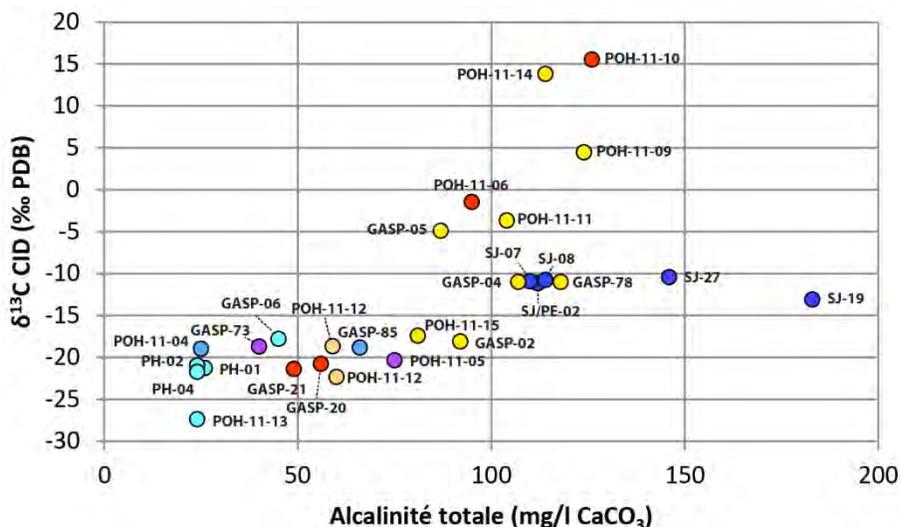


Figure 4.17 $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous (CID) en fonction de l'alcalinité totale

En résumé, l'analyse des données d'alcane légers ($\text{C}_1\text{-C}_3$) et des isotopes stables du CID indique que des processus de mélange de méthane thermogénique et biogénique, de méthanogenèse microbienne, d'oxydation bactérienne et de migration du méthane sont tous potentiellement actifs dans l'aquifère étudié. Certains échantillons montrent ainsi une signature isotopique et compositionnelle intermédiaire, et ils sont affectés à différents degrés par ces divers processus. Malgré la difficulté à déterminer l'amplitude relative de chaque processus pour les différents échantillons, il est possible d'affirmer que les échantillons des gaz dissous récoltés dans le cadre de la présente étude sont de source biogénique et thermogénique mixte.

La détermination des voies de formation et des processus secondaires affectant les échantillons de gaz récoltés ne donne toutefois pas d'indication univoque sur la source des gaz retrouvés dans les eaux souterraines. L'identification d'une méthanogenèse microbienne active dans l'aquifère étudié indique qu'une certaine proportion du méthane retrouvé est d'origine plutôt superficielle; la provenance du gaz thermogénique est en revanche plus difficile à établir.

Plusieurs forages ont mis en évidence la présence de quantités significatives d'huile ou de gaz à de relativement faibles profondeurs (< 200 m) dans la péninsule d'Haldimand (p. ex., G.O.C. Conant, POT2, C2; McGerrigle, 1950). Cependant, aucune analyse connue des gaz rencontrés dans ces zones superficielles lors du forage n'a été effectuée, si bien que leur nature biogénique ou thermogénique reste inconnue. Le seul échantillon de gaz relativement peu profond analysé provient du puits Pérolia Haldimand n° 1 dans l'intervalle situé entre 205 et 551 m de profondeur; celui-ci montre une signature chimique distinctement thermogénique (section 4.4.2.1).

La répartition complexe des hydrocarbures en profondeur et la méconnaissance des caractéristiques des gaz à des profondeurs intermédiaires rendent délicate l'interprétation de la présence de gaz thermogénique dans les eaux souterraines. Toutefois, du gaz thermogénique a été retrouvé bien au-dessus du toit du réservoir pétrolier dans le puits Pérolia Haldimand n° 1. La présence éventuelle d'accumulations de gaz d'origine thermocatalytique à des profondeurs encore inférieures n'est pas

connue et l'existence de sources peu profondes de gaz thermogénique reste plausible. En d'autres termes, les données d'hydrocarbures dissous récoltées ne permettent pas d'évaluer sans ambiguïté l'existence et l'expression de voies de migration préférentielle entre des zones profondes et l'aquifère superficiel, dans la mesure où la source du gaz thermogénique ne peut être déterminée.

En dépit de l'impossibilité de déterminer précisément l'origine des gaz dissous dans les eaux souterraines, l'établissement d'un portrait initial est fondamental dans l'évaluation de l'impact environnemental éventuel de futures activités pétrolières sur la qualité des eaux souterraines à Gaspé.

4.4.4. Risques reliés au méthane

Seuls deux échantillons prélevés dans des puits résidentiels montrent des concentrations supérieures au seuil d'alerte proposé de 7 mg/L selon les analyses effectuées par le MDDEFP (GASP-05 : 9,8 mg/L, GASP-78 : 11,0 mg/L). Ces concentrations sont bien en deçà de la valeur critique de 28 mg/L et ne sont donc pas considérées comme dangereuses. Néanmoins, les propriétaires des puits dépassant le seuil ont déjà été avisés par le MDDEFP. De plus, les analyses réalisées par la CGC ont indiqué un autre puits résidentiel avec plus de 7 mg/L, alors que les analyses du MDDEFP donnent une valeur sous ce seuil (GASP-04 : 8,3 mg/L selon la CGC et 6,2 mg/L selon le MDDEFP). Dès la réception par le MDDEFP des résultats analytiques de la CGC sur les gaz dissous, le propriétaire concerné a été avisé.

4.5. Composés organiques

4.5.1. Analyses conventionnelles (MDDEFP)

Des analyses de COV, de HAP et d'hydrocarbures pétroliers (C₁₀-C₅₀) ont été effectuées par les laboratoires du MDDEFP sur tous les échantillons récoltés lors de la campagne de 2013.

Les résultats des analyses effectuées par le MDDEFP montrent que seules de très faibles concentrations de composés organiques sont retrouvées dans les eaux souterraines à Haldimand (annexe 2). De faibles quantités de COV, de HAP et de C₁₀-C₅₀ ont été retrouvées dans 22, 5 et 2 puits résidentiels respectivement (et dans 6, 1 et 2 puits d'observation d'Haldimand respectivement). Cependant, aucun dépassement de norme de potabilité ou de critère esthétique n'a été observé. Comme il sera discuté à la section 4.5.3, le résultat analytique d'hydrocarbures pétroliers n'est peut-être pas représentatif dans le cadre de la présente étude.

4.5.2. Composés organiques analysés par la CGC

Les analyses de composés organiques par la CGC ont été réalisées sur deux ensembles d'échantillons distincts. Une première série d'analyses a été effectuée sur des échantillons prélevés en 2012 et comprenait la détermination de la composition en COV, HAP, OEA ainsi que la distribution des n-alcanes pour quatre échantillons d'eau

de surface, deux puits résidentiels et huit puits d'observation d'Haldimand. Une seconde série d'analyses a été effectuée sur des échantillons prélevés en 2013 et visait à caractériser la composition des OEA pour cinq puits d'observation (les quatre puits d'observation d'Haldimand et le futur puits d'exploitation de la ville de Gaspé) et un suintement. Les résultats détaillés des analyses sont montrés à l'annexe 4.

Les analyses de composés organiques dans les échantillons d'eau de surface et d'eau souterraine montrent que les eaux à Haldimand contiennent seulement de très faibles quantités de composés organiques, qui sont considérablement inférieures aux recommandations de Santé Canada (2012) et aux normes du Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) [MDDEFP, 2012b].

De plus, les signatures des HAP, des acides organiques et des n-alcanes montrent que la majorité des composés organiques retrouvés dans les eaux souterraines et de surface ne sont pas dérivés d'une source pétrolière. Cependant, de très faibles concentrations (< 0,6 mg/L) d'OEA contenant des acides naphthéniques, qui sont des dérivés pétroliers, ont été retrouvées dans quelques échantillons d'eau souterraine.

4.5.3. Discussion sur les composés organiques

Les analyses de composés organiques effectuées par le MDDEFP et par la CGC montrent que la présence naturelle d'hydrocarbures dans la péninsule d'Haldimand n'a pas d'impact négatif sur la qualité des eaux souterraines. Même si certains échantillons d'eau souterraine récoltés au niveau de puits d'observation d'Haldimand contiennent des composés organiques dérivés d'hydrocarbures pétroliers (p. ex., des acides naphthéniques), les concentrations retrouvées dans les eaux souterraines sont très faibles (< 0,6 mg/L). Aucune norme fédérale ou provinciale n'existe pour les acides naphthéniques; cependant, les concentrations très faibles rencontrées dans les eaux souterraines ne présentent aucun risque évident pour la santé.

Il est important de noter que la description approfondie des composés organiques par la CGC montre que l'analyse d'hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ n'est pas nécessairement un paramètre fiable dans le cadre de la présente étude. En effet, des hydrocarbures pétroliers avaient été indiqués par cette méthode analytique dans certains puits (notamment le puits d'observation PH-04) lors de la campagne de TechnoRem en 2012. L'analyse subséquente d'un échantillon par la CGC a montré que la concentration totale d'hydrocarbures dans l'échantillon était largement inférieure au résultat analytique de C₁₀-C₅₀. De plus, les résultats de la CGC montrent que les composés organiques détectés dans cet échantillon ne sont pas dérivés d'une source pétrolière.

4.6. Qualité de l'eau souterraine à Haldimand

4.6.1. Dépassements de critères de qualité

D'une manière générale, la qualité des eaux échantillonnées lors de la campagne 2013 du MDDEFP dans le secteur Haldimand est très bonne. En ce qui concerne les puits résidentiels, seuls quatre échantillons montrent des valeurs qui dépassent les limites du

RQEP (MDDEFP, 2012b) [2 dépassements du sélénium > 0,01 mg/L : GASP-78, GASP-85; 2 dépassements du baryum > 1 mg/L : GASP-21, GASP-38; 1 dépassement du plomb > 0,01 mg/L : GASP-35]. En plus, trois échantillons dépassent le seuil d'alerte pour le méthane de 7 mg/L (GASP-78, GASP-05, GASP-04; GASP-04 ne dépasse le seuil que selon les analyses de la CGC, pas celles du MDDEFP – voir la section 4.4.4). Des COV, des HAP et des hydrocarbures pétroliers ont été détectés dans 26 échantillons différents, sans dépasser de norme ou critère esthétique (voir l'annexe 2).

Les eaux des puits d'observation sont également de bonne qualité. Quatre échantillons montrent cependant des dépassements des normes du RQEP (2 du baryum : POH-11-06, POH-11-10; 2 du plomb : POH-11-04, POH-11-02). Des COV, des HAP et des hydrocarbures pétroliers ont été détectés dans sept puits d'observation, encore une fois sans dépassement de norme ou critère esthétique.

Finalement, la qualité des eaux des puits d'observation et du futur puits d'exploitation de la ville de Gaspé est excellente. Seule une faible quantité de méthane (0,1 mg/L) a été détectée dans le puits SJ-07.

4.6.2. Discussion des dépassements de critères de qualité

Les concentrations les plus élevées en baryum sont reliées aux eaux plus salines et évoluées (figure 4.18). Ces concentrations sont donc vraisemblablement des valeurs naturellement élevées, cohérentes et en continuité avec les autres valeurs observées dans la région d'étude.

Le dépassement en plomb pour l'échantillon résidentiel GASP-35 est associé aux valeurs les plus élevées de cuivre et de zinc mesurées lors de la présente campagne (figure 4.19). Il y aurait eu un entreposage de déchets miniers de Murdochville dans les environs par le passé. Il sera important de vérifier la position exacte de la décharge en relation avec l'emplacement de cet échantillon, mais les présents résultats montrent qu'il existe possiblement encore une source de contamination en métaux à proximité. La tuyauterie pourrait aussi être en cause. Les dépassements en plomb au niveau des puits d'observation restent pour l'instant inexpliqués.

La cause des dépassements en sélénium reste également inconnue. Cet élément a seulement été détecté dans trois échantillons au total et sa présence ne peut pour l'instant être mise en relation avec d'autres paramètres mesurés. Une vérification de la représentativité de ce résultat analytique serait souhaitable.

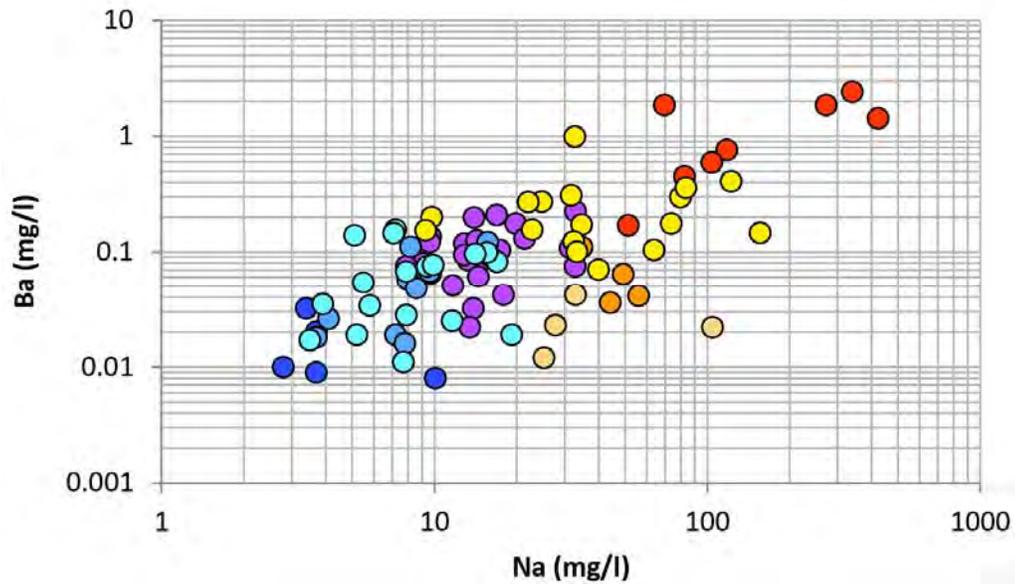


Figure 4.18 Sodium (Na) vs baryum (Ba). Les échantillons sont colorés en fonction des couleurs attribuées aux groupes lors de l'analyse hiérarchique regroupée.

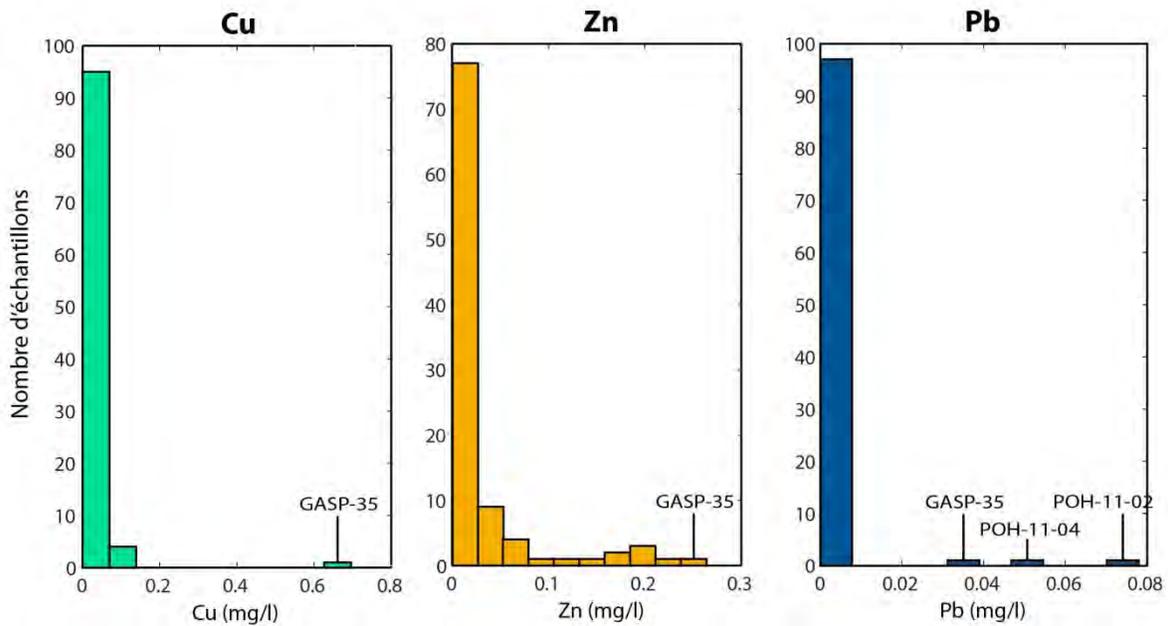


Figure 4.19 Histogramme des concentrations de cuivre (Cu), zinc (Zn) et plomb (Pb)

5. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE

Une modélisation numérique de l'écoulement à densité variable a été réalisée à l'aide du logiciel SALTFLOW (Molson et Frind, 2014) pour représenter le système aquifère de la région d'Haldimand. Cette modélisation utilise une géométrie 2D en coupe verticale. Elle a pour but de préciser le modèle conceptuel et de déterminer la profondeur des interfaces d'eau ayant différentes salinités. Le modèle 2D a été réalisé sur la base d'une coupe de 13,5 km de longueur. La coupe traverse la péninsule d'Haldimand du nord au sud, et elle a été prolongée vers le sud pour atteindre le haut topographique régional. Ce prolongement a été fait pour évaluer le patron d'écoulement régional qui peut avoir une incidence sur les conditions rencontrées à Haldimand. Le prolongement de la coupe vers le sud permet aussi d'évaluer la provenance de l'eau souterraine captée par les puits d'approvisionnement de la ville de Gaspé situés au sud de la rivière St-Jean.

5.1. Développement du modèle numérique

Les sections qui suivent présentent le développement du modèle numérique. Le modèle simule un milieu poreux équivalent saturé en condition de régime permanent supposant une température uniforme dans tout le domaine. Les fichiers utilisés pour les différentes simulations ainsi que les fichiers de sortie du modèle sont joints à l'annexe 5.

5.1.1. *Suppositions et limitations de la simulation*

Plusieurs suppositions faites pour le développement du modèle numérique impliquent certaines limitations. L'utilisation d'un modèle 2D en coupe suppose que cette coupe se trouve parfaitement alignée dans le sens général de l'écoulement de l'eau souterraine. L'absence d'écoulement latéral sur l'ensemble de la coupe est peu probable, ce qui peut engendrer des erreurs locales selon les conditions d'écoulement modélisées. Cependant, la coupe est parallèle au gradient topographique régional et devrait correspondre à la direction d'écoulement de l'eau souterraine qui est contrôlée par la gravité. De façon globale, mais possiblement pas dans les détails, le modèle devrait donc être représentatif des conditions d'écoulement. Aussi, la modélisation considère l'effet de densité causé par la présence d'eau ayant différentes salinités selon la profondeur. Il est bien connu que sous la zone active d'écoulement qui contient de l'eau douce, on retrouve des eaux ayant de plus fortes salinités et densités (Fritz, 1997). Ce fait est confirmé à Haldimand, même là où des eaux avec de fortes salinités ont été échantillonnées des puits d'exploration pétrolière. L'analyse de l'eau récupérée dans l'intervalle de 830 à 850 m de profondeur au droit du puits pétrolier Haldimand n° 1 indique la présence d'une eau avec une concentration de 157 000 mg/L (voir à l'annexe 2, Résultats analytiques de l'eau de formation). Il est nécessaire de considérer l'effet de salinité de façon à correctement représenter la mobilité de l'eau souterraine, particulièrement en profondeur où ses salinités et densités sont élevées. Cependant, les données disponibles sur le profil de salinité de l'eau avec la profondeur étant limitées, il a été nécessaire de simplifier la distribution des salinités avec la profondeur représentée dans le modèle. De plus, dans le modèle, on suppose que les eaux de

différentes salinités gardent les mêmes propriétés physiques que l'eau douce à l'exception de la densité.

5.1.2. Maillage et conditions limites

La coupe modélisée est d'une longueur de 13,5 km et d'une hauteur variant de 1 000 à 1 470 m. Le maillage comprend 35 100 éléments (675 éléments à l'horizontale, en x, et 52 éléments à la verticale, en z). Les éléments font 20 m en x et ont une hauteur variable en z puisque les éléments à la surface peuvent se déformer pour suivre la surface de la nappe (hauteur minimum de 5 m à la surface du modèle et maximum de 40 m à la base du modèle).

Les conditions limites et initiales qui ont servi à la construction du modèle numérique 2D d'écoulement et de transport sont présentées à la figure 5.1. Les côtés et la base du domaine sont des limites imperméables (flux nul) de type Neumann, sauf pour la partie supérieure de l'aquifère en contact avec la mer où une charge constante est imposée et correspond au niveau marin (0 m). La frontière sud représente le haut topographique régional pour lequel on suppose une frontière symétrique (ligne de partage des eaux) de flux nul. Une recharge de 50 mm/an est appliquée à la surface de la nappe, dans les bas topographiques, et une recharge plus importante de 500 mm/an est attribuée au niveau des hauts topographiques, où la couverture des dépôts meubles est mince ou absente (voir la section 3.6.1). Les flèches montrent les endroits où des charges constantes sont imposées à la surface du modèle, soit au droit des cours d'eau et au pied de talus situé au sud de la rivière St-Jean.

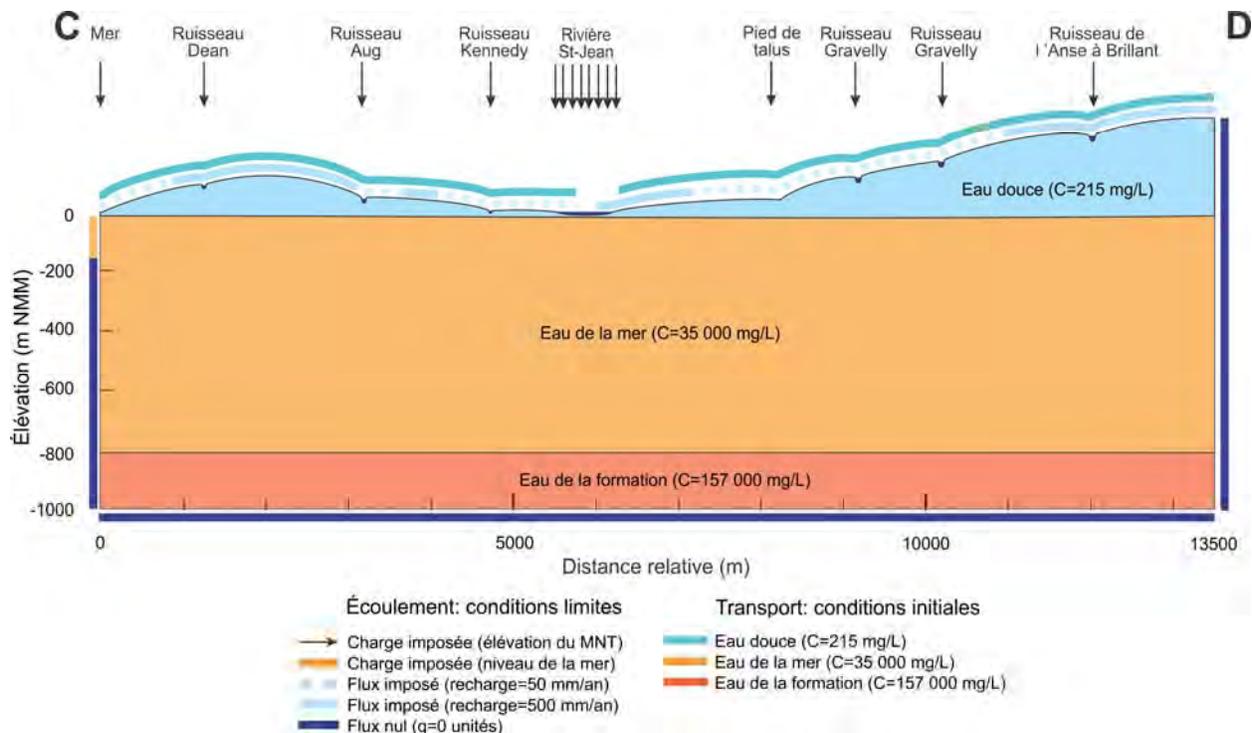


Figure 5.1 Conditions initiales et limites du modèle numérique d'écoulement et de transport le long de la coupe CD (localisation sur les cartes 1 et 35). Exagération verticale ~10x

Le domaine est divisé en trois zones d'eau avec des salinités différentes : l'eau douce dans la partie supérieure, l'eau marine dans une position intermédiaire et l'eau de formation dans la partie inférieure du modèle. Cette distribution verticale de la salinité constitue une condition initiale pour le modèle de transport. La distribution finale de la salinité sera différente après avoir fait la simulation du transport de solutés en régime permanent. Une recharge d'eau douce a été imposée sur la surface du modèle de transport pour les mêmes valeurs de recharge que celles établies dans le modèle d'écoulement.

5.1.3. Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux ont été définies sur la base des conclusions de la section 3.3. La conductivité hydraulique horizontale (K_h) de l'aquifère rocheux diminue avec la profondeur dans le modèle, conformément aux observations obtenues par diagraphie qui montrent une diminution de l'intensité de la fracturation avec la profondeur. La figure 5.2 présente la distribution des conductivités hydrauliques et porosités attribuées à chaque élément du modèle. Sous le secteur Haldimand, K_h est présumée être de 4×10^{-6} m/s (orange) et 2×10^{-6} m/s (jaune) pour les deux premières couches d'éléments à la surface du modèle. Ces valeurs sont dans l'intervalle des K_h obtenues lors des essais réalisés par TechnoRem (2013). La conductivité hydraulique diminue progressivement pour atteindre 9×10^{-9} m/s (bleu foncé) à la base du modèle.

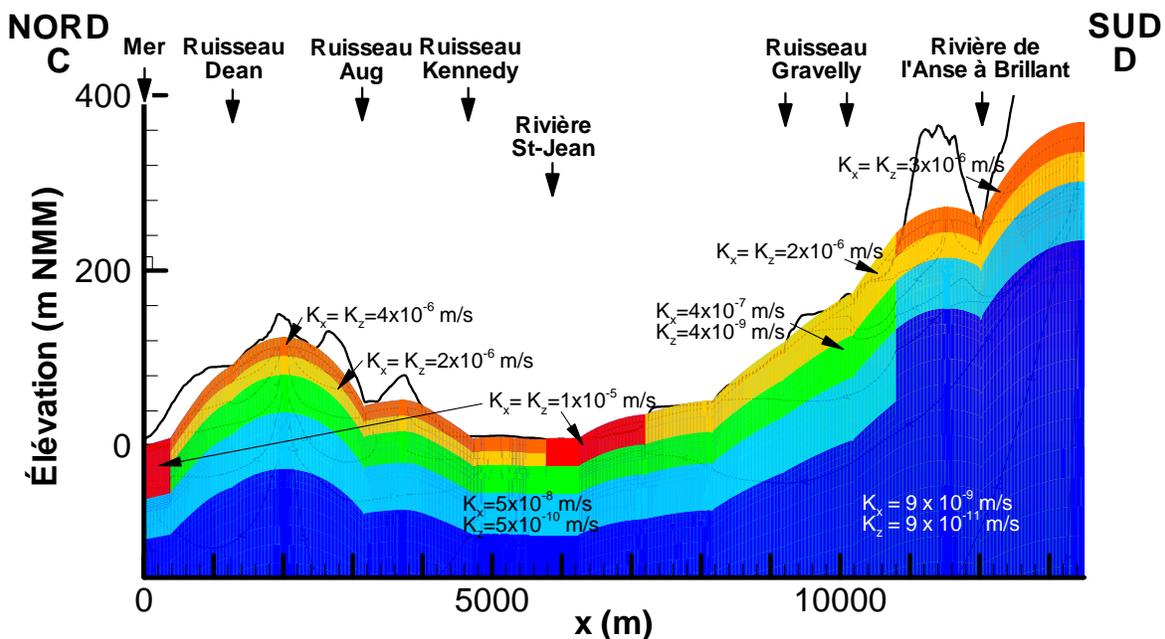


Figure 5.2 Distribution des conductivités hydrauliques (Agrandissement sur les premières couches du modèle) [Exagération verticale ~25x]

La conductivité hydraulique présente une anisotropie due à la fracturation selon laquelle la conductivité hydraulique verticale (K_v) correspond au rapport $K_v = K_h/100$. La porosité varie de 10 % jusqu'à environ 20 m de profondeur, de 7 % de 20 à 40 m et de 5 % jusqu'à la base du modèle. Cette décroissance de la porosité en fonction de la profondeur est basée sur les mesures de porosité réalisées par le laboratoire Core Lab (section 3.3.2 et annexe 2). Le coefficient d'emmagasinement a été fixé à 1×10^{-5} .

Les valeurs de conductivité hydraulique et de porosité pour l'aquifère granulaire proviennent du rapport d'Arrakis (2011). Des zones de conductivité plus élevée (1×10^{-5} m/s, en rouge) ont été ajoutées au nord, en bordure de la mer, et dans la vallée de la rivière St-Jean pour représenter les dépôts quaternaires perméables. Sous le haut topographique au sud, la diminution plus rapide de la conductivité hydraulique en fonction de la profondeur représente la formation d'Indian Cove. La géologie recoupée par la coupe modélisée est montrée à la carte 35.

5.1.4. Propriétés du modèle de transport

Les propriétés du modèle de transport ont été définies en tenant compte de la présence de la mer aux limites du modèle, de l'eau de formation avec des concentrations connues en profondeur et d'une recharge d'eau douce. Pour le transport, la salinité est exprimée en concentration relative C/C_0 , dont la concentration maximale est de 157 000 mg/L. La densité ρ_{max} dépend de la concentration en SDT (Molson et Frind, 2014). La formule de Mohsen et Singh (1990) permet le calcul de la densité à partir de la concentration en SDT.

$$\rho_{max} = \rho_0 + \alpha(C - C_0) \quad \text{où } \alpha = 0,7246$$

La valeur C_0 correspond à la concentration de l'eau douce qui est estimée à 0,5 g/L et la densité de l'eau douce (ρ_0) est de 1 000 g/L. Une concentration maximale (C) de 157 000 mg/L est supposée à la base du modèle. Cette valeur est basée sur l'analyse de l'eau de formation à environ 850 m de profondeur dans le forage Haldimand n° 1 (section 3.8.2). À cette concentration, la densité ρ_{max} de l'eau est d'approximativement 1 113 kg/m³. Le coefficient de densité des fluides γ est ensuite calculé par l'équation suivante (Molson et Frind, 2014) :

$$\gamma = \frac{\rho_{max}}{\rho_0} - 1$$

Le coefficient γ calculé pour le modèle de transport est de 0,113. Les concentrations de l'eau douce et de l'eau de mer ont été normalisées afin d'obtenir les conditions initiales du modèle de transport. Ces concentrations relatives sont de $1,4 \times 10^{-3}$ pour l'eau douce, de 0,22 pour l'eau de mer et de 1 pour l'eau de formation. Elles ont été calculées à partir des concentrations indiquées à la figure 5.1.

Le tenseur de dispersion est basé sur l'approche de Lichtner et al. (2002) qui donne deux valeurs de dispersivité longitudinale, soit longitudinale horizontale (α_{LH}) et longitudinale verticale (α_{LV}), et deux valeurs de dispersivité transversale, soit transversale horizontale (α_{TH}) et transversale verticale (α_{TV}). Dans ces simulations, on a choisi α_{LH} de 20 m d'après l'échelle du système (13,5 km) [Schulze-Makuch, 2005] et α_{LV} a été fixée à 15 m. La dispersivité transversale verticale a été fixée à 0,01 m, soit deux ordres de grandeur sous la dispersivité transversale horizontale, fixée à 0,1 m (Gelhar et al., 1992).

Les critères de convergences utilisés pour arrêter les itérations du système de solution numérique du modèle sont de 0,005 m pour la charge hydraulique, de 0,05 pour la concentration et de 0,005 m pour la surface libre de la nappe.

5.1.5. Distribution de la recharge

Aux fins de la modélisation, la recharge a été distribuée à partir de la carte des dépôts quaternaires le long de la coupe (carte 35). La valeur de la recharge a été estimée à la section 3.6. Une recharge élevée de 500 mm/an a été attribuée aux dépôts les plus perméables et au roc affleurant, et une recharge faible de 50 mm/an a été supposée pour le reste du modèle, comme le montre la figure 5.1.

La concentration de 215 mg/L a été attribuée à l'eau de la recharge pour le modèle de transport. Cette concentration est basée sur la concentration moyenne en solides totaux dissous des échantillons analysés par TechnoRem (2013).

5.1.6. Vérification de la discrétisation

Les zones où les vitesses d'écoulement sont les plus élevées sont les plus susceptibles d'entraîner des problèmes numériques qui créent des oscillations. Ces erreurs numériques sont contrôlées par le nombre de Peclet et le nombre de Courant. Ces nombres ont donc été vérifiés dans les secteurs du ruisseau Kennedy et de la rivière de l'Anse-à-Brillant. Ces endroits sont situés dans une zone où les vitesses sont les plus élevées, comme le montre la figure 5.3.

La figure 5.3 (haut) montre les vecteurs de vitesse sur l'ensemble du domaine modélisé. Les vitesses en profondeur sont tellement faibles qu'elles sont à peine visibles sur la figure. Même un agrandissement de la taille des vecteurs montre que sous une profondeur d'environ 60 m, les vitesses deviennent vraiment très faibles. Il y a donc très peu de mouvement de l'eau au-delà de cette profondeur. L'amplitude des vitesses, qui diminue avec la profondeur, est également représentée sur la figure 5.4. Ce profil de vitesse a été réalisé sur la ligne AA', soit un peu au sud du ruisseau Dean, puisque les vitesses sont principalement horizontales dans ce secteur.

Dans le cas du transport 2D, les vitesses dans la direction y sont nulles, donc le nombre de Peclet et le nombre de Courant n'ont pas été calculés pour cette direction. Le calcul de Peclet montre que la discrétisation en x et en z est adéquate pour le modèle de transport puisque le nombre de Peclet est inférieur à 2. Le tableau 5-1 montre le calcul du nombre de Peclet pour les éléments où la vitesse est la plus importante.

Le nombre de Peclet en x a seulement été calculé pour l'élément où la vitesse est la plus élevée. La longueur des cellules étant la même pour tout le domaine, le nombre de Peclet est forcément respecté pour toutes les vitesses inférieures. Le nombre de Peclet en z est également respecté pour les deux éléments étudiés.

La simulation a été réalisée avec un pas de temps court de 10 jours (Δt). Le tableau 5-2 présente le calcul du nombre de Courant pour les trois éléments critiques. Le nombre de Courant n'est pas respecté avec un pas de temps Δt de 10 jours, un pas de temps de trois jours aurait été nécessaire. Toutefois, étant donné que la simulation converge bien et ne montre pas d'oscillations, le faible dépassement du nombre de Courant est jugé raisonnable pour ce pas de temps.

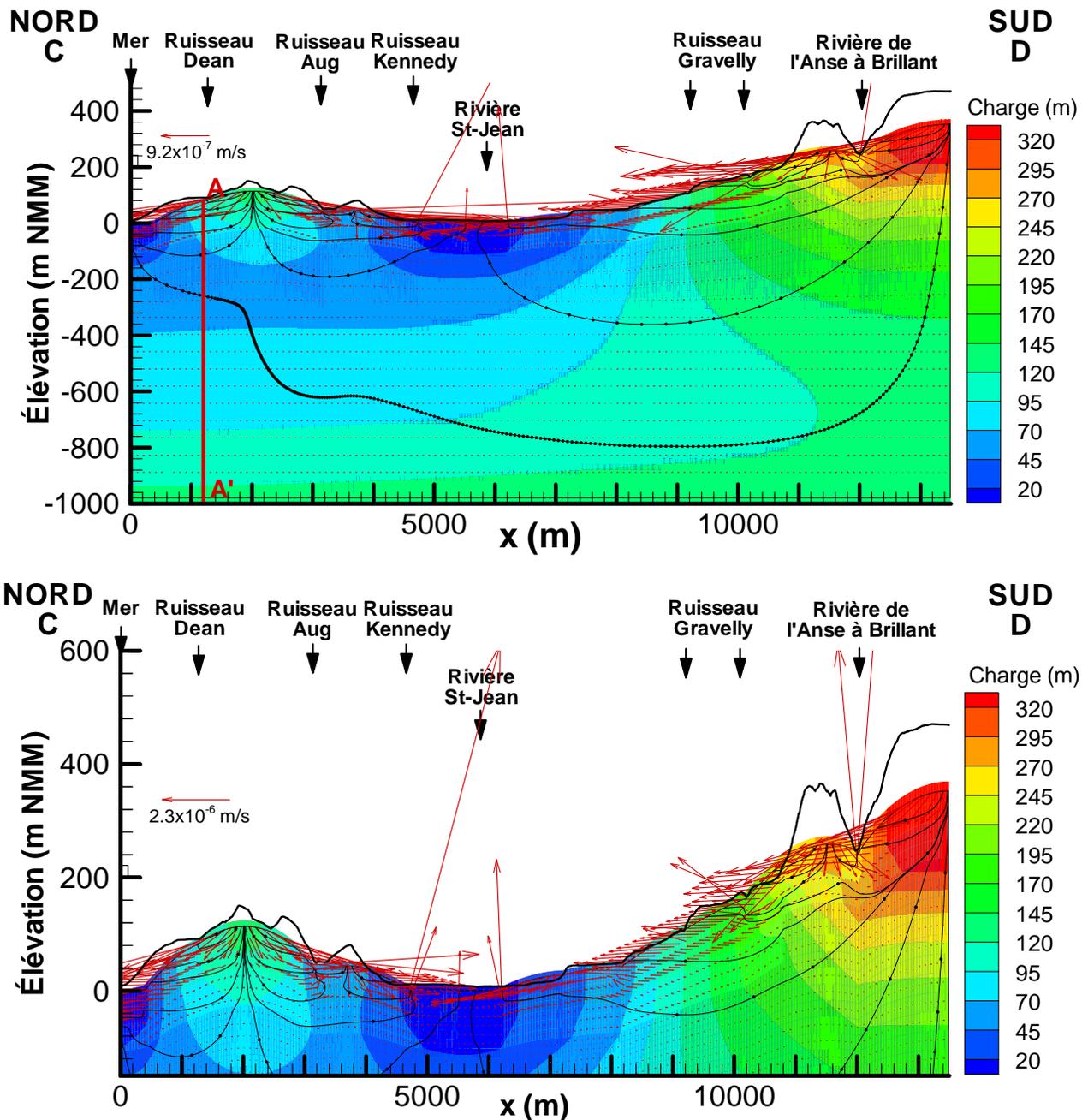


Figure 5.3 Haut : Vue d'ensemble des vecteurs de vitesse sur tout le domaine (exagération verticale ~10x). Bas : Agrandissement des vecteurs de vitesse de -150 à 400 m NMM (exagération verticale ~18x)

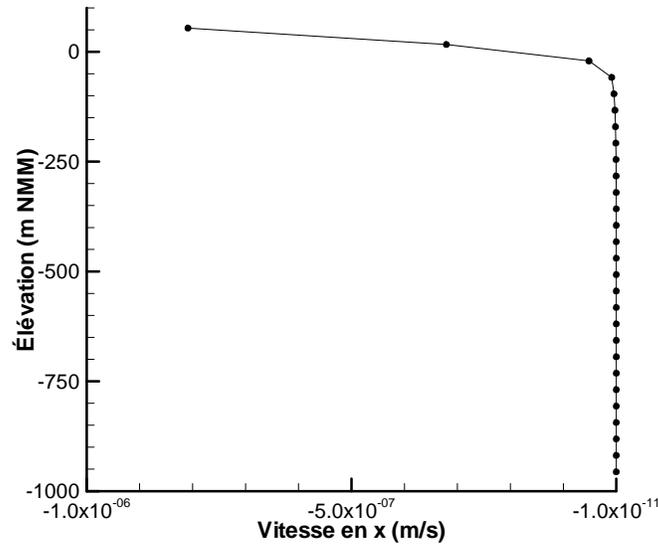


Figure 5.4 Profil des vitesses le long de la ligne AA' (figure 5.3, haut)

Tableau 5-1 Calcul du nombre de Peclet

Nombre de Peclet en x

Élément en x	Élément en z	v_x (m/j)	Δx (m)	α_L (m)	$2 * \alpha_L$ (m)	D_x (m ² /j)	Pe	Pe < 2
						$\alpha_L * v_x$	$ v_x * \Delta x / D_x $	Respecté
601	51	-2,69	20	20	40	-53,7	1,0	oui

Nombre de Peclet en z

Élément en x	Élément en z	v_z (m/j)	Δz (m)	α_L (m)	$2 * \alpha_L$ (m)	D_z (m ² /j)	Pe	Pe < 2
						$\alpha_L * v_x$	$ v_x * \Delta x / D_x $	Respecté
601	51	-2,69	28	15	30	-40,3	1,9	oui
159	51	-2,69	18	15	30	-40,3	1,2	oui

Tableau 5-2 Calcul du nombre de Courant

Nombre de Courant en x

Élément en x	Élément en z	Δt (j)	Cr	Pe/2	Cr ≤ Pe/2
			$ v_x * \Delta t / \Delta x $		Respecté
601	51	10	1.34	0.50	raisonnable

Nombre de Courant en z

Élément en x	Élément en z	Δt (j)	Cr	Pe/2	Cr ≤ Pe/2
			$ v_x * \Delta t / \Delta x $		Respecté
601	51	10	0,96	0,93	raisonnable
159	51	10	1,49	0,60	raisonnable

5.2. Conditions simulées

5.2.1. Écoulement de l'eau souterraine

La figure 5.5 illustre la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine en régime permanent pour la coupe CD (carte 1). Cette figure montre les charges hydrauliques équivalentes d'eau douce ainsi que le niveau de la nappe. Selon ce résultat, les hauts topographiques constituent les zones de recharge préférentielles, les rivières agissent comme des drains et la mer ainsi que la vallée de la rivière St-Jean correspondent aux zones d'émergence ultimes de l'eau souterraine du système aquifère.

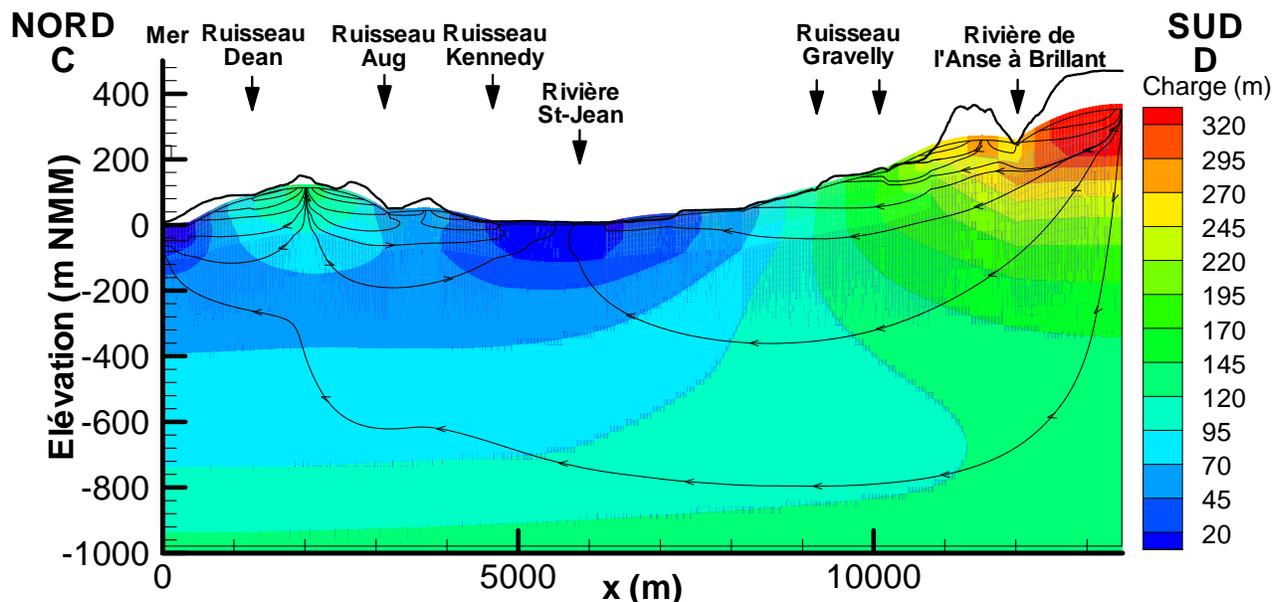


Figure 5.5 **Modèle numérique 2D vertical de l'écoulement à densité variable. Charges hydrauliques et lignes d'écoulement en régime permanent (exagération verticale ~10x). À noter que le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne de courant.**

Sur la figure 5.5, les lignes d'écoulement par traçage de particules indiquent les patrons d'écoulement à différentes profondeurs. Les lignes d'écoulement montrent aussi la profondeur de l'écoulement actif sous le secteur Haldimand (à gauche). Le système d'écoulement dynamique semble se limiter à une profondeur de 120 m sous le niveau de la mer, ce qui correspond environ aux 280 premiers mètres de profondeur au centre de la péninsule. Dans le reste du système, l'eau circule beaucoup plus lentement en profondeur et le trajet des particules est également beaucoup plus long à des profondeurs plus importantes (section 5.2.3). La figure 5.4 présente un profil des vitesses avec la profondeur dans un secteur où les vitesses sont horizontales. Les vecteurs proportionnels aux vitesses de la figure 5.3 soulignent le fait que l'écoulement actif se fait dans les 50 premiers mètres de profondeur. Par exemple, les vitesses au centre du système (environ 600 m de profondeur) sont de cinq ordres de grandeur plus faibles. La topographie du terrain est représentée par la courbe noire dans la partie supérieure de la figure 5.5. Le calage a permis d'obtenir une combinaison de valeurs de

recharge et de conductivité hydraulique du roc qui représente le mieux les données observées du système d'écoulement.

5.2.2. Transport de masse

La figure 5.6 montre la distribution des concentrations résultant de la simulation du transport de masse en condition de régime permanent. En comparant cette distribution des concentrations avec les conditions initiales montrées à la figure 5.1, on peut faire quelques constatations. D'abord, l'eau douce pénètre beaucoup plus en profondeur que son élévation initiale correspondant au niveau moyen de la mer. Ainsi, l'eau douce est à 200 m sous le NMM à Haldimand et à 400 m sous le NMM dans la partie sud du modèle. L'eau douce est plus profonde que la zone active d'écoulement, qui est limitée à une profondeur d'environ 120 m sous le NMM. Par contre, la profondeur de l'eau douce est inférieure à ce qui est prédit par le principe de Ghyben-Herzberg (De Marsily, 1986). Selon ce principe, qui est basé sur un système hydrostatique, homogène et isotrope, l'eau douce devrait atteindre 40 fois en profondeur l'élévation de la nappe, donc au-delà de 4 000 m de profondeur sous Haldimand si on ne considère qu'une élévation de 100 m (alors que le maximum est à 200 m). La conductivité hydraulique réduite de l'aquifère en profondeur limite probablement la pénétration de l'eau douce. On peut toutefois déduire que le modèle montre probablement une profondeur maximale de l'eau douce puisque le modèle implique des unités hydrogéologiques continues et une diminution tout de même modérée de la conductivité hydraulique avec la profondeur, particulièrement de la conductivité hydraulique verticale.

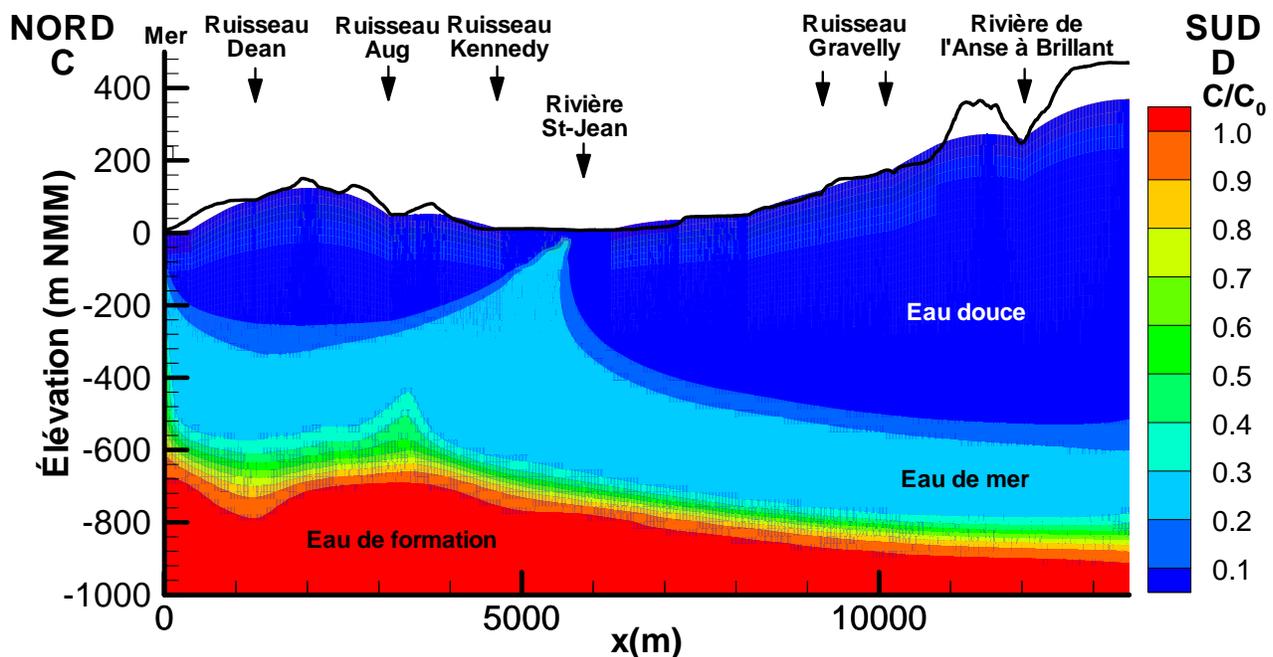


Figure 5.6 Concentration relative simulée en sel ($C_{\max} = 157\,000$ mg/L) [exagération verticale $\sim 10\times$]

La figure 5.6 montre aussi que le patron d'écoulement régional est susceptible d'induire la remontée de l'eau marine ou « évoluée » vers les principaux exutoires du système

d'écoulement, soit la rivière St-Jean et la mer (baie de Gaspé). Cette remontée pourrait apporter des eaux évoluées et à long temps de résidence (voir la section suivante) dans la partie supérieure de l'aquifère au roc, expliquant en partie la présence d'eau souterraine évoluée ainsi que d'eau souterraine présentant des évidences de mélange avec de l'eau marine (chapitre 4). L'effet du patron d'écoulement est cependant beaucoup moins prononcé sur l'eau de formation à la base du modèle qui montre de faibles remontées en relation avec les zones d'émergence de l'eau souterraine. La densité importante de l'eau de formation, qui a pour effet de limiter sa mobilité, explique en partie l'absence de remontée de l'eau de formation.

5.2.3. Temps de résidence de l'eau souterraine

Le simulateur numérique SALTFLOW permet de représenter le transport advectif-dispersif de l'âge, ou temps de résidence, de l'eau souterraine suivant l'approche développée par Goode (1996). Cet âge est différent de l'âge purement advectif obtenu du traçage de particule. Ceci est dû au fait que le mélange induit par la dispersion distribue les eaux d'âge important et donne ainsi des temps de résidence généralement plus longs, ce qui est plus représentatif (Goode, 1996). Pour cette simulation, les mêmes dispersivités α_{LH} , α_{LV} , α_{TH} , et α_{TV} ont été utilisées avec le même système d'écoulement en régime permanent que le système utilisé pour le transport de masse.

La figure 5.7 montre les âges advectifs-dispersifs obtenus pour le modèle ainsi que des marqueurs indiquant les âges advectifs par traçage de particules le long des lignes d'écoulement. La comparaison de la simulation d'âge avec la simulation du transport de masse (figure 5.6) montre que ces résultats sont cohérents. En effet, les âges les plus élevés correspondent aux endroits où les concentrations sont plus élevées, ce qui est attendu puisque l'eau salée retrouvée en profondeur est dans une partie du système d'écoulement moins actif, donc où les temps de résidence seront plus longs.

La « remontée » d'âges importants vers la surface vient donner un mécanisme d'apport d'eau très évoluée près de la surface. Cette remontée est plus importante en bordure de la rivière St-Jean, qui est l'exutoire majeur du système d'écoulement. Cependant, on peut aussi voir sous la péninsule d'Haldimand que l'émergence de l'eau souterraine aux ruisseaux peut apporter des eaux ayant des âges plus élevés dans la zone active d'écoulement (pour plus de détails, voir la figure 5.8 à la section suivante).

Un autre aspect important de la simulation d'âge est de mettre en évidence l'effet des conditions « convergentes et divergentes » de l'écoulement de l'eau souterraine sous Haldimand. On trouve en effet sous Haldimand des patrons d'écoulement « emboîtés », l'écoulement local à Haldimand étant intégré dans l'écoulement régional. Il en résulte que l'écoulement superficiel vers le bas à Haldimand rencontre l'écoulement régional vers le haut à environ 200 m sous le NMM. Ceci fait en sorte que l'écoulement est relativement stagnant sous la péninsule d'Haldimand où se trouvent des eaux dont le temps de résidence excède deux millions d'années à des profondeurs limitées. Ce phénomène avait été récemment mis en évidence par Jiang et al. (2012), à la fois pour des systèmes théoriques et pour un système réel. Cependant, les conditions rencontrées à Haldimand n'avaient pas été envisagées parmi celles qui pouvaient mener à de « l'accumulation » d'âge important dans les systèmes aquifères.

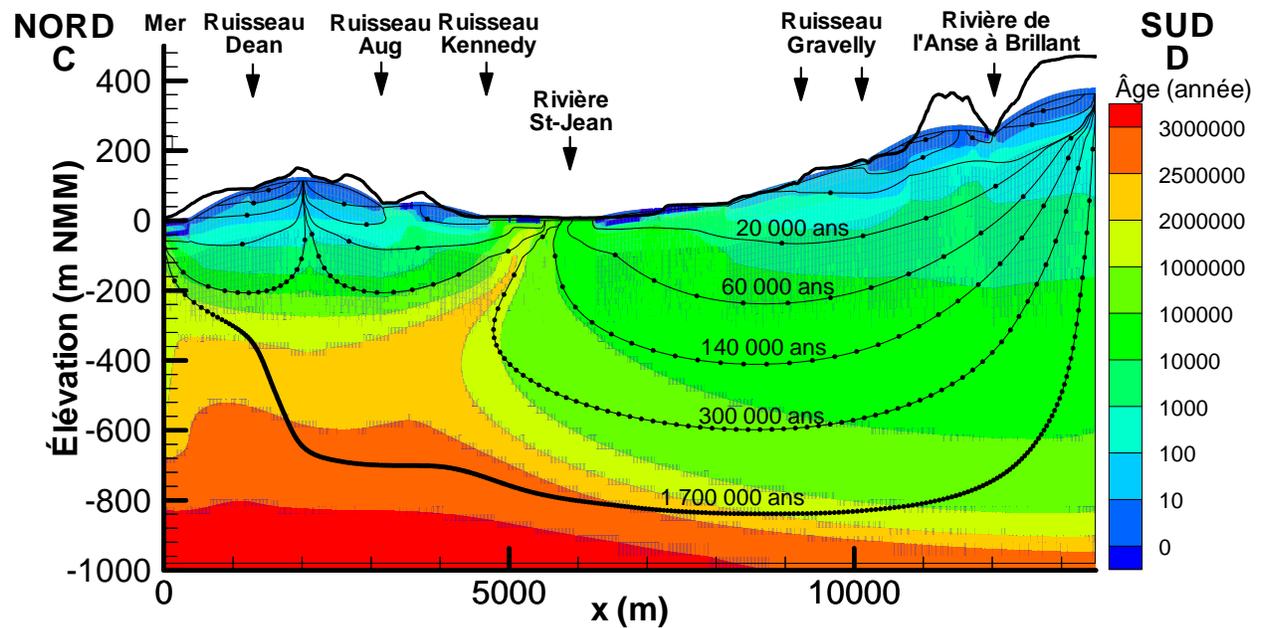


Figure 5.7 Simulation de l'âge advectif-dispersif (coupe CD; carte 1) et ligne d'écoulement du traçage de particules; intervalle de 5 000 ans entre les marqueurs (exagération verticale $\sim 10x$). Il est important de noter que le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne d'écoulement.

5.2.4. Conditions propres à Haldimand

Pour mieux montrer les conditions simulées à Haldimand, la figure 5.8 montre un agrandissement du modèle pour la péninsule, incluant les résultats des simulations de l'écoulement, du transport de masse et du transport d'âge. Bien que le transport de masse montre la présence d'eau douce jusqu'à environ 200 m sous le NMM, les simulations de l'écoulement et du transport d'âge montrent que la zone active d'écoulement est limitée à une profondeur en deçà de 80 m sous le NMM.

La simulation d'âge montre aussi que sous la péninsule d'Haldimand l'émergence de l'eau souterraine aux ruisseaux (particulièrement le ruisseau Aug) peut apporter des eaux évoluées ayant des âges importants (entre 1 000 et 10 000 ans) dans la zone active d'écoulement près de la surface. Dans cette situation, il n'est pas nécessaire de faire appel à des apports d'eau de grande profondeur pour expliquer la présence d'eau évoluée et à long temps de résidence dans la partie superficielle de l'aquifère au roc (voir le chapitre 4). Avec des zones de fracturation un peu plus importantes par endroits, on peut penser que, conceptuellement, il est possible de « distribuer » des eaux évoluées dans la zone active d'écoulement de l'aquifère au roc, comme observé (voir le chapitre 4 et la carte 33).

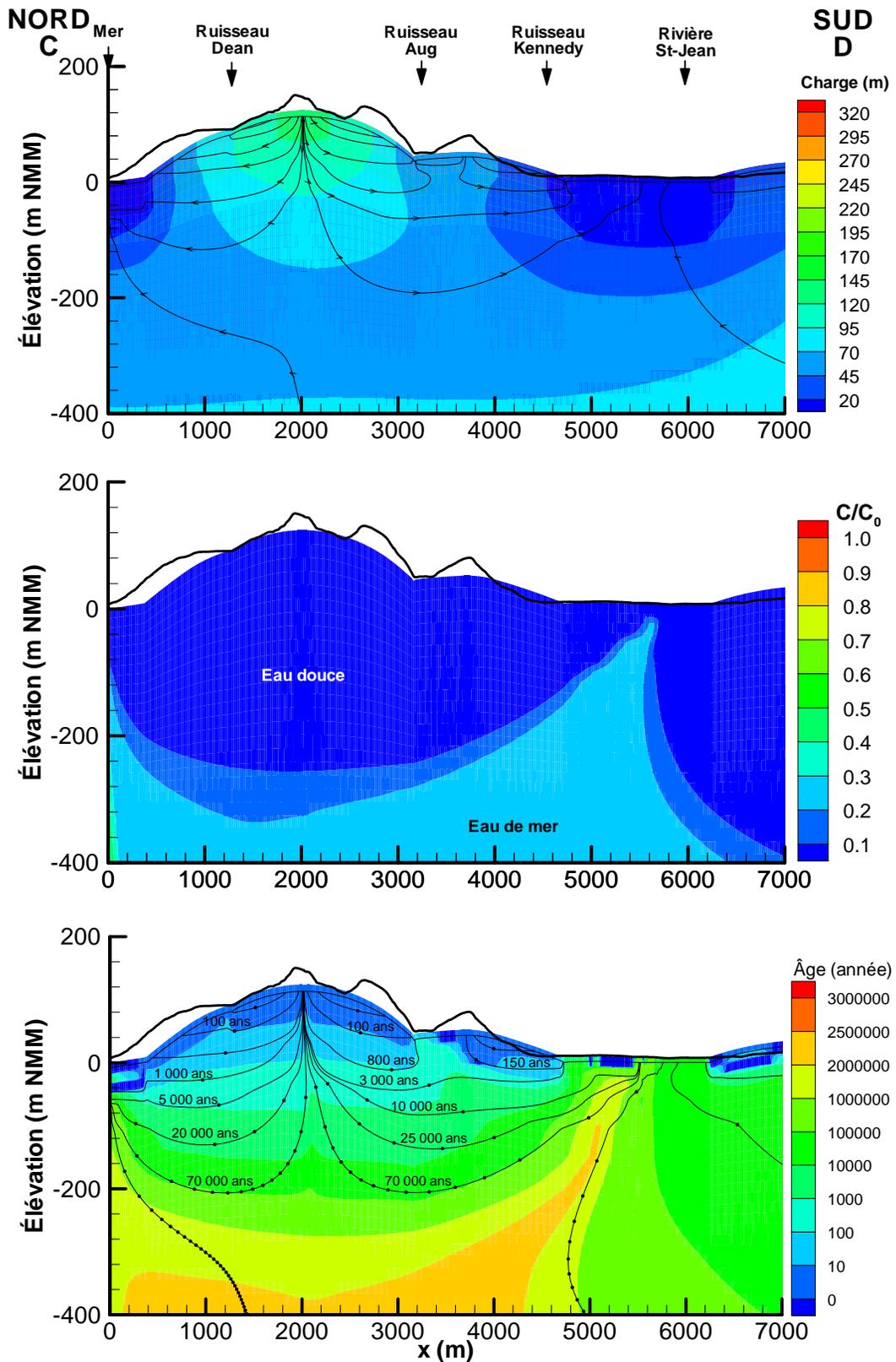


Figure 5.8 Conditions locales à Haldimand (écoulement, transport, âge); intervalle de 5 000 ans entre les marqueurs (exagération verticale ~13x). Il est important de noter que le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne d'écoulement.

5.2.5. Effet potentiel de fuites dans un puits pétrolier et de discontinuités

Du traçage de particules plus détaillé a été fait avec le modèle pour mieux évaluer quel pourrait être l'effet d'une fuite de liquide à travers le coffrage et la cimentation d'un puits d'exploration pétrolière. Cette approche ne tient pas compte d'un ciment mal scellé le long du coffrage qui permettrait à la fuite de suivre un chemin préférentiel le long du coffrage (Nowamooz et al., 2013). La figure 5.9 montre les particules émises dans le modèle à une position correspondant approximativement à celle du site de forage Haldimand n° 4. Les temps advectifs de transport de ces particules jusqu'à l'exutoire du modèle sont indiqués sur la figure. Dans tous les cas, sauf pour la particule la moins profonde, l'exutoire correspond à la bordure de la mer (baie de Gaspé). Le temps de migration advectif jusqu'à l'exutoire en bordure de mer va de 100 ans à 20 000 ans pour les particules au-dessus de la profondeur d'environ 200 m sous le NMM. Cette profondeur correspond approximativement à celle du coffrage de surface prévu à ce puits (et aux puits Haldimand n° 1 et n° 2). Cette section du puits pétrolier a donc un double coffrage qui diminue la probabilité d'émissions à partir du puits. Le temps de migration advectif pour des émissions sous la profondeur de 200 m sous le NMM serait au-delà de 100 000 ans.

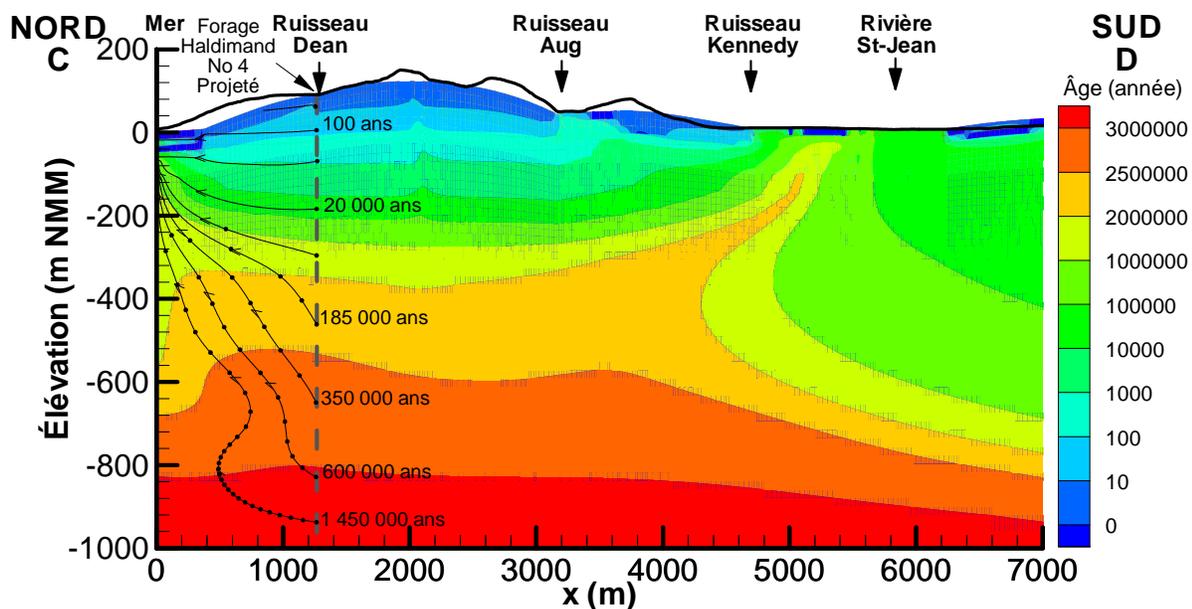


Figure 5.9 Traçage de particules à partir du puits Haldimand n° 4 projeté; intervalle de 50 000 ans entre les particules (exagération verticale ~6x)

La figure 5.10 montre l'utilisation faite du modèle pour évaluer l'effet potentiel de la présence de zones de plus forte perméabilité (failles perméables) sur l'écoulement, l'âge et le transport d'eau saline. L'hypothèse initiale était que de telles zones pourraient contribuer à un apport d'eaux salines et à longs temps de résidence jusque dans la zone active d'écoulement à Haldimand. Pour simuler ce processus, une colonne de cellules du modèle s'est vu attribuer la conductivité hydraulique la plus importante des éléments en surface du modèle de la surface jusque sous 850 m sous le NMM. Cette zone à plus forte conductivité hydraulique a aussi été placée sous un bas

local de la topographie (secteur du ruisseau Dean) qui sert d'exutoire à l'écoulement superficiel de façon à favoriser l'émergence possible d'eau profonde vers la surface. La figure 5.10 montre que l'effet obtenu est contraire à notre hypothèse et que la zone à forte conductivité hydraulique induit un écoulement vers le bas plutôt que vers le haut.

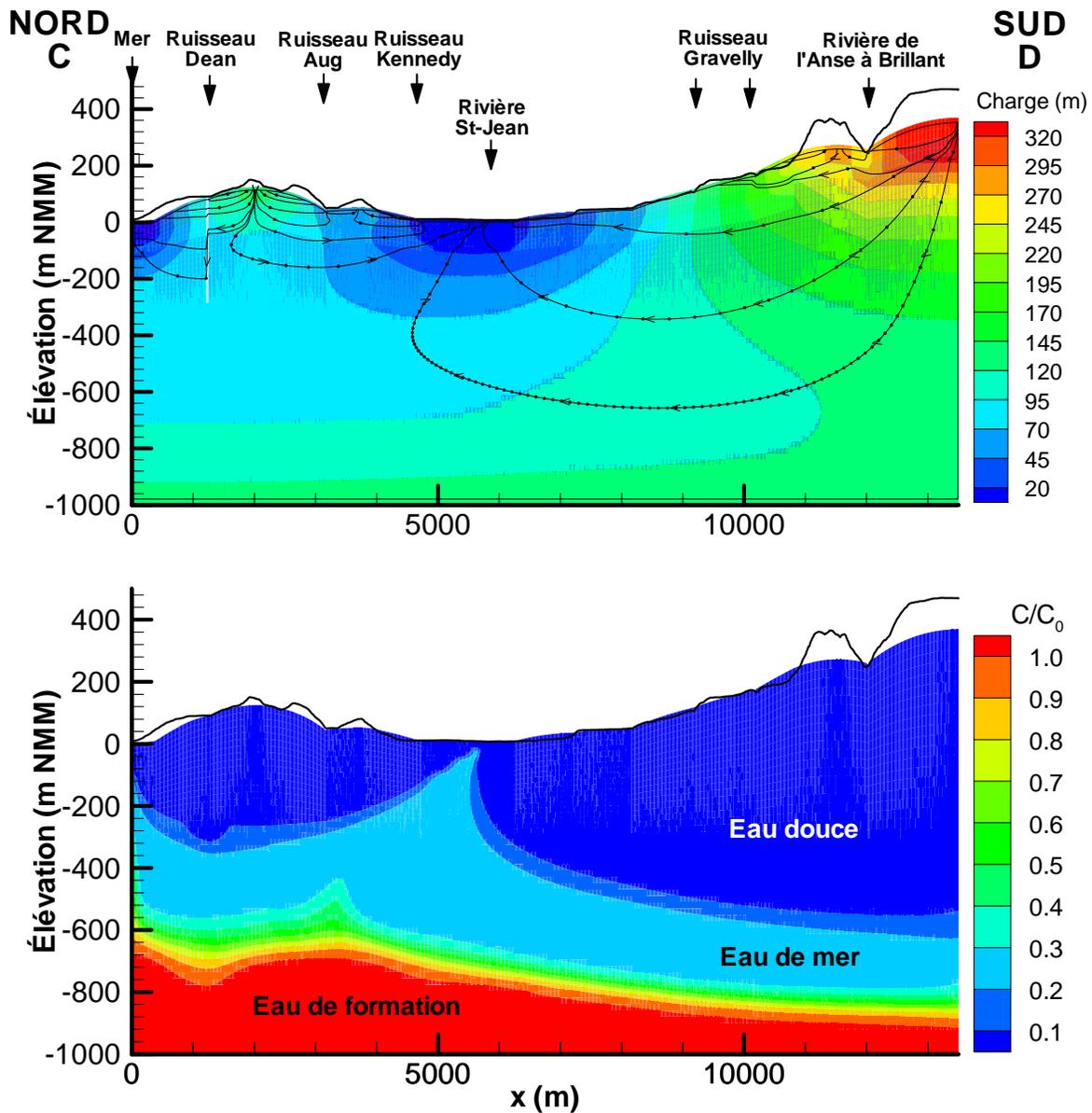


Figure 5.10 Modèle numérique 2D vertical de l'écoulement à densité variable avec la présence d'une discontinuité verticale près du ruisseau Dean (coupe CD; carte 1). a) Charges hydrauliques et lignes d'écoulement en régime permanent; b) Concentration relative en sel ($C_{max} = 157\ 000\ \text{mg/L}$) [exagération verticale $\sim 10x$]

L'hypothèse expliquant l'écoulement vers le bas qui est induit par la présence d'une zone à plus forte conductivité hydraulique (figure 5.10) est que les faibles conductivités hydrauliques de l'aquifère au roc restreignent l'étendue de l'eau douce en profondeur. Nous avons déjà souligné que cette eau douce devrait être à une profondeur plus importante pour respecter l'équilibre des densités des eaux prédit par le principe de

Ghyben-Herzberg. En mettant une zone plus perméable dans le modèle, c'est l'eau douce de la surface qui a tendance à migrer vers le bas pour tendre vers l'équilibre statique, plutôt que l'inverse. Les zones de fortes perméabilités, telles que les failles, ne sont donc pas susceptibles de permettre une migration des eaux salines et à longs temps de résidence vers le haut, parce que leur migration est empêchée par leur forte densité. Cependant, des fluides moins denses, tels que les hydrocarbures liquides ou gazeux, pourraient migrer dans de telles zones plus perméables si cette migration était soutenue par de fortes pressions en profondeur (Gassiat et al., 2013).

6. SYNTHÈSE ET ÉVALUATION DU RISQUE

6.1. Modèle hydrogéologique conceptuel du système aquifère

La présente section a pour but de résumer notre connaissance des conditions rencontrées dans le système aquifère du secteur Haldimand et leurs implications sur son fonctionnement. Cette compréhension du système aquifère a déjà été appliquée au développement du modèle numérique d'écoulement, qui, en retour, nous donne des indications qui ne peuvent pas être déduites directement des observations. Le texte qui suit ne reprend que les aspects les plus importants du système aquifère dont le tableau 6-1 résume les caractéristiques observées ainsi que les interprétations et implications de ces caractéristiques.

En ce qui concerne les matériaux, le système aquifère possède une hydrostratigraphie relativement simple, étant composé essentiellement de roc poreux et fracturé (grès et mudstones), jouant le rôle d'aquifère, qui est recouvert par des épaisseurs variables de till argileux et compact, agissant comme un aquitard. Trois unités lithologiques distinctes peuvent être reconnues dans le roc à partir des diagraphies. Par contre, dans le secteur Haldimand, ce n'est pas la lithologie qui contrôle la fracturation du roc, mais plutôt la profondeur sous la surface du roc. Le roc est en effet plus fracturé, et parfois altéré, dans les 20 premiers mètres de sa partie supérieure, alors que l'intensité de la fracturation diminue rapidement jusqu'à environ 40 m, la limite de la profondeur des puits d'observation disponibles. Ces fractures contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine, comme le démontrent les levés au débitmètre qui ne détectent pas de changement de débit sans la présence de fractures ouvertes. Ainsi, même si la matrice du roc est relativement poreuse (5 à 10 %), sa conductivité hydraulique est limitée par rapport à celle des fractures. La porosité de drainage du roc est ainsi présumée très faible, comme l'indiquent les très forts changements saisonniers de niveau d'eau.

Pour ce qui est de l'écoulement de l'eau souterraine, les hauts topographiques ne sont pas recouverts de till, ce qui entraîne des conditions libres de l'aquifère rocheux. Ces hauts topographiques représentent aussi des zones de recharge préférentielle qui sont donc plus vulnérables à la contamination par les activités de surface. En dehors des hauts topographiques, la couverture de till rend les conditions captives et limite la recharge, ce qui signifie aussi une réduction de la vulnérabilité. Il y a tout de même une certaine recharge en dehors des hauts topographiques, car on retrouve des indicateurs d'eaux récentes (tritium, CFC et SF₆) dans pratiquement tous les puits d'observation. La réduction de l'intensité de la recharge loin des hauts topographiques est toutefois bien démontrée par l'amplitude de plus en plus réduite des variations saisonnières de niveau d'eau des hydrogrammes de puits par rapport à la distance des hauts topographiques. À deux endroits, les puits d'observation dans les zones captives sont en conditions artésiennes (coulant librement). L'écoulement de l'eau souterraine est contrôlé par la topographie et se fait des hauts topographiques vers les cours d'eau et la périphérie de la péninsule. L'écoulement est présumé être plus important dans la partie supérieure de l'aquifère rocheux où la fracturation est plus intense et la conductivité hydraulique plus élevée. Il y a tout de même de la variation dans les conditions d'écoulement à cause de la variation de la topographie et de l'épaisseur de till, ce qui induit des zones où

l'écoulement se fait vers le haut et d'autres où l'écoulement est vers le bas, tel qu'il a été observé grâce aux levés faits avec le débitmètre. Les cours d'eau semblent au moins partiellement reliés à l'aquifère, car ils agissent comme des drains. Cependant, la présence d'une épaisseur importante de till sous certains segments de cours d'eau fait que ce lien n'est pas nécessairement direct et continu, dans le temps ou l'espace, ce qui est aussi montré par le fait que durant les périodes d'étiage, certaines portions de cours d'eau sont pratiquement à sec, ce qui signifie qu'ils ne reçoivent pas alors d'apport important d'eau souterraine.

L'eau souterraine du secteur Haldimand est généralement de très bonne qualité et très peu de dépassements de critères de santé ou esthétiques ont été observés dans les puits résidentiels ou d'observation. Il y a cependant une grande variabilité dans la géochimie de l'eau souterraine, surtout compte tenu de l'étendue restreinte de la région d'étude. Ainsi, on retrouve des eaux contenant très peu d'ions dissous dans les zones de recharge et des types d'eau Ca-HCO₃, alors que les eaux qui témoignent d'une évolution géochimique plus importante ont des types d'eau Na-HCO₃ et même Na-Cl. Cette évolution géochimique semble contrôlée par l'échange ionique et le mélange avec de l'eau marine. La répartition spatiale des différents types d'eau est cependant complexe, ce qui indique que la fracturation pourrait jouer un rôle dans la répartition des apports d'eau évoluée dans la zone active d'écoulement. Même si des suintements d'hydrocarbures sont présents à trois endroits à la surface de la région d'étude, on retrouve de très faibles concentrations d'hydrocarbures ou d'organiques extractibles à l'acide dans l'eau souterraine. La présence d'hydrocarbures et les pressions élevées dans le réservoir indiquent son isolement hydraulique des unités sus-jacentes. Cependant, du méthane se retrouve dans l'eau souterraine, associé préférentiellement à des eaux plus évoluées qui ont une plus grande salinité. Ce méthane est d'origine mixte, à la fois biogénique et thermogénique. La variabilité et le niveau d'évolution de l'eau souterraine indiquent des temps de résidence importants de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux, comme le confirme la datation ¹⁴C de l'eau souterraine. L'eau des puits d'observation et d'approvisionnement de la ville de Gaspé au sud de la rivière St-Jean a une géochimie distincte des eaux retrouvées dans la péninsule d'Haldimand.

La modélisation numérique montre que la zone d'écoulement actif dans le secteur Haldimand est assez peu profonde, allant jusqu'à environ 120 m sous le NMM. De l'eau douce pourrait se trouver jusqu'à environ 200 m sous le NMM. Cependant, le modèle a utilisé des conditions conservatrices qui font en sorte que l'épaisseur de la zone active et l'intervalle contenant de l'eau douce montrés par le modèle sont des valeurs présumées maximales. La modélisation montre un apport important d'eau souterraine à partir des hautes terres situées au sud de la rivière St-Jean. Cette rivière est un exutoire important de cet apport d'eau provenant du sud, mais cette eau poursuit son écoulement sous Haldimand, jusqu'au nord de la péninsule. À long terme, avec un flux très faible, ces patrons d'écoulement peuvent apporter des eaux salines ayant de longs temps de résidence (> 1 million d'années) de la profondeur vers les exutoires du système d'écoulement, particulièrement à la rivière St-Jean. Sous la péninsule d'Haldimand, on retrouverait des eaux à long temps de résidence (1 000 à 10 000 ans) à de relativement faibles profondeurs, ce qui expliquerait l'observation des eaux souterraines plus évoluées dont la répartition irrégulière pourrait être influencée par un patron complexe de fracturation près de la surface du roc.

Tableau 6-1 Sommaire des conditions hydrogéologiques du secteur Haldimand

Condition	Observations	Interprétation	Implications
Localisation	Péninsule dans la baie de Gaspé (~50 km ²) entre la rivière York, au nord-ouest, et la rivière St-Jean, au sud.	---	---
Utilisation du territoire	En majorité boisé, avec résidences au pourtour. Accès : route 132 (montée de Sandy Beach, au nord, et route Haldimand, au sud) et boulevard de York Sud, à l'ouest. Des chemins privés gravelés pénètrent dans la péninsule.	---	L'utilisation du territoire aura un effet sur le processus de recharge de la nappe.
Topographie	Pourtour de la péninsule au NMM. Trois crêtes d'orientation NO-SE atteignent plus de 100 m NMM (maximum à ~200 m NMM).	---	Les pentes fortes vont avoir une incidence sur le ruissellement. Le relief va mener à la segmentation de l'écoulement superficiel et de l'eau souterraine (voir « Patron d'écoulement »).
Hydrographie	La péninsule est bordée au nord-ouest et au sud-ouest par des cours d'eau majeurs (rivières York et St-Jean). Quatre principaux ruisseaux encaissés découpent la péninsule (Kennedy, Aug, Dean et 02M60000).	---	Les cours d'eau servent d'exutoires à l'eau souterraine.
Géologie du roc	Deux unités d'âge dévonien, constituées de grès et de mudstones, soit le Battery Point, au nord-est, et le York River, au sud-ouest, séparées par la faille du Bras Nord-Ouest.	---	---
Structure géologique	Failles régionales Haldimand et du Bras Nord-Ouest d'orientation SE-NO et pli anticlinal d'orientation ESE-ONO.	Les failles majeures pourraient être des voies préférentielles de migration de la profondeur à la surface (des suintements pétroliers à proximité de ces failles indiquent qu'une partie au moins de ces failles ont été perméables sur des temps géologiques).	---
Fracturation	La fracturation du roc est importante sur ~20 m dans la partie supérieure du roc et diminue avec la profondeur. La fracturation en surface est distincte et discontinue par rapport à celle trouvée en profondeur (niveau réservoir).	Le réseau de fractures naturelles contrôle la conductivité hydraulique de l'aquifère au roc, car la matrice poreuse est peu perméable.	Le réseau de fractures naturelles ne devrait pas permettre une communication entre la profondeur et l'aquifère au roc près de la surface.

Condition	Observations	Interprétation	Implications
Géologie du Quaternaire	La péninsule d'Haldimand a un couvert surtout de till glaciaire pratiquement absent sur les hauts topographiques et allant jusqu'à 10 m d'épaisseur. Des alluvions et des sédiments proglaciaires bordent la rivière St-Jean à des épaisseurs pouvant atteindre 20 m.	La faible perméabilité du till va contrôler la recharge et les conditions de confinement de l'aquifère au roc.	La présence ou non de till va aussi contrôler la vulnérabilité de l'aquifère au roc.
Topographie du roc	La topographie du roc est très semblable à celle de la surface du sol, mais elle est plus accentuée, car certaines dépressions de la surface du roc sont comblées de sédiments.	Puisque la partie supérieure du roc est la plus perméable, sa topographie va contrôler les directions d'écoulement de l'eau souterraine.	Le relief va mener à la segmentation de l'écoulement superficiel et de l'eau souterraine (voir « Patron d'écoulement »).
Aquifères et aquitards	Le roc fracturé constitue un aquifère régional. Le till agit comme un aquitard. Les sédiments sableux et graveleux en bordure de la rivière St-Jean constituent un aquifère granulaire local.	---	---
Conductivité hydraulique (K)	<i>Aquifère de roc fracturé</i> : K entre 10^{-7} et 10^{-5} m/s <i>Aquifère granulaire</i> : K entre 10^{-5} et 10^{-4} m/s	Le roc est assez peu perméable, mais tout de même assez poreux (5 à 10 %). On a donc un milieu fracturé et poreux.	La nature poreuse et fracturée va avoir une incidence sur le transport de soluté et implique des temps de résidence relativement longs de l'eau souterraine.
Nature des puits	Les puits résidentiels sont essentiellement installés dans l'aquifère au roc et ont une profondeur moyenne de 22 m (max. à 65 m). Les 3 puits municipaux au sud de la rivière St-Jean ont une profondeur moyenne de 17 m.	---	---
Confinement / Vulnérabilité	<i>Aquifère au roc</i> : conditions libres sur les hauts topographiques et conditions semi-captives à captives où les épaisseurs de till sont plus importantes. <i>Aquifère granulaire</i> : conditions libres.	La recharge de l'aquifère au roc se fait préférentiellement sur les hauts topographiques. L'aquifère granulaire est directement rechargé sur toute sa surface.	L'épaisseur de till et les conditions de confinement vont affecter la vulnérabilité de l'aquifère au roc.
Zones de recharge	Recharge importante de l'aquifère au roc sur les hauts topographiques et diffuse ailleurs.	Conditions de recharge et de confinement démontrées par les hydrogrammes de puits et la présence de tritium et de CFC/SF ₆ .	---
Zones de résurgence	Résurgence locale dans les ruisseaux et en périphérie de la péninsule.	Certaines portions de ruisseaux sont au-dessus de till épais et n'ont pas de lien direct avec l'aquifère au roc (à sec en été).	---
Recharge (moyenne : 97,8 mm/an)	<i>Aquifère au roc</i> : zones de recharge avec environ 500 mm/an; généralement moins de 100 mm /an ailleurs. <i>Aquifère granulaire</i> : plus de 400 mm/an.	Estimation par hydrogrammes de puits et par bilan hydrologique.	---

Condition	Observations	Interprétation	Implications
Patron d'écoulement local	<i>Piézométrie au roc</i> : écoulement superficiel dans la partie supérieure du roc plus fracturée et perméable. Écoulement des hauts topographiques aux ruisseaux ou jusqu'à la périphérie de la péninsule.	Segmentation de l'écoulement par la topographie du roc et les ruisseaux.	L'écoulement superficiel dans l'aquifère au roc est de nature très locale.
Types d'eau	Deux groupes de 4 types d'eau chacun représentant respectivement des eaux de type recharge peu évoluées (Ca-HCO ₃) et des eaux plus évoluées (Na-HCO ₃ ou Na-Cl), mais tout de même avec une minéralisation modérée (< 1,5 g/l).	Les eaux des puits municipaux sont distinctes des eaux trouvées dans la péninsule. L'évolution géochimique de l'eau souterraine est reliée à l'échange ionique Na-Ca et au mélange avec de l'eau marine.	La distribution spatiale hétérogène des types d'eau pourrait signifier des apports d'eau évoluée et à long temps de résidence vers la surface et certains cheminements préférentiels.
Provenance et temps de résidence	Les isotopes stables indiquent une provenance des précipitations. Portion d'eau jeune (< 60 ans) présente presque partout (tritium et CFC présents). Localement, on retrouve des eaux plus évoluées avec un pourcentage de ¹⁴ C moderne de moins de 30 % et des âges ¹⁴ C bruts > 10 000 ans.	Les temps de résidence de l'eau souterraine sont suffisamment longs pour permettre l'évolution géochimique de l'eau.	Les âges ¹⁴ C élevés pourraient signifier des apports d'eau évoluée vers la surface et certains cheminements préférentiels.
Qualité de l'eau	Selon les analyses du MDDEFP, l'eau souterraine est généralement de très bonne qualité : 4 puits résidentiels ont des dépassements en métaux (2 x Se, 2 x Ba, 1 x Pb) et 4 puits d'observation dépassent aussi les normes de métaux (2 x Ba, 2 x Pb). Des composés organiques ont été détectés, mais tous sous les normes ou critères esthétiques.	---	---
Méthane	3 puits résidentiels et 4 puits d'observation dépassent le seuil d'alerte du méthane de 7 mg/L. Les plus fortes concentrations en méthane sont associées aux eaux plus évoluées.	Le méthane est d'origine mixte, biogénique et thermogénique, indiquant une production dans la partie supérieure de l'aquifère lui-même et un apport de gaz d'origine plus profonde. Seul le méthane à PH-01 est clairement thermogénique.	Le méthane ne représente pas un problème de qualité d'eau, mais de sécurité; son accumulation dans la tuyauterie doit être évitée.
Suintements d'hydrocarbures	Le suintement S1 est très dégradé : les alcanes à chaîne plus courte sont absents. Par contre, le suintement POT2 est beaucoup moins dégradé.	La composition du suintement S1 indique une mise en place à une époque reculée. La signature du suintement POT2 témoigne de la présence d'huile plus « fraîche ».	Le suintement S1 semble inactif et ne représente pas un apport actif d'huile de la profondeur. Il est cependant impossible de déterminer la source et l'activité du suintement POT2.
Isolement du réservoir	La présence d'hydrocarbures et les pressions dans le réservoir dépassant fortement les pressions hydrostatiques indiquent son isolement hydraulique des unités sus-jacentes.	---	La fracturation discontinue et les pressions signifient une isolation hydraulique du réservoir par rapport aux formations géologiques sus-jacentes.

Condition	Observations	Interprétation	Implications
Modèle : écoulement régional	L'écoulement régional est amorcé dans les hauts topographiques à ~10 km au sud d'Haldimand et émerge principalement dans la rivière St-Jean. L'écoulement superficiel à Haldimand émerge dans les ruisseaux, alors que l'écoulement plus profond émerge de chaque côté de la péninsule.	---	De façon conservatrice, le modèle numérique possède une continuité des unités et des valeurs de conductivité hydraulique (horizontale et verticale) qui font en sorte que le modèle montre probablement l'extension maximale de la zone active d'écoulement et de l'eau douce.
Modèle : fluides en profondeur	L'eau plus saline présumée présente en profondeur participe très peu à l'écoulement régional, mais pourrait émerger dans la rivière St-Jean. L'eau de formation à plus grande profondeur n'est pratiquement pas remobilisée.	De l'eau douce, mais peu mobile, serait présente jusqu'à 200 m sous le NMM.	Des eaux plus évoluées et anciennes pourraient être présentes plus près de la surface. Un apport même limité vers la surface de l'eau saline présente sous Haldimand pourrait expliquer la présence d'eaux souterraines évoluées.
Modèle : temps de résidence	La zone active d'écoulement à moins de 200 m de profondeur a des temps de résidence pouvant aller jusqu'à 10 000 ans en profondeur et de moins de 1 000 ans dans la partie superficielle. Sous la zone active, les temps de résidence peuvent excéder 1 million d'années.	La zone active d'écoulement est limitée à une profondeur de moins de 120 m sous le NMM, sur la base des âges simulés inférieurs à 5 000 ans. Les fluides profonds sont très peu mobiles et ont des temps de résidence dépassant 1 million d'années.	Les fluides profonds sont très peu mobiles.
Modèle : migration à partir de la profondeur	Du traçage de particules à partir de la profondeur a été fait pour représenter de potentielles fuites au niveau de puits pétroliers. Sous le coffrage de surface (~200 m), les temps de migration vers la périphérie de la péninsule sont d'environ 20 000 ans.	En dehors des puits et des cheminements préférentiels, la migration de fluides à partir de la profondeur ne peut être importante sur une période inférieure à des centaines ou même des millions d'années.	---
Modèle : migration à partir de la surface	Du traçage de particules à partir de la surface du sol a été fait pour représenter de potentiels épanchements à la surface. Sauf en bordure de la péninsule, les voies de migration aboutissent aux eaux de surface et n'atteindraient pas les puits en périphérie de la péninsule.	Un calcul manuel indique que le temps de migration à partir des lignes de partage au sud des sites pétroliers vers les puits résidentiels en périphérie de la péninsule serait de l'ordre de quelques décennies.	---

6.2. Risque environnemental par rapport aux activités pétrolières

La présente section documente notre évaluation du risque environnemental de dégradation de la qualité de l'eau souterraine par rapport aux activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures dans le secteur Haldimand. Cette évaluation est faite en considérant trois aspects de la question : 1) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport au projet de règlement du MDDEFP (2013) qui a pour but de fournir un encadrement aux activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures par rapport à la protection de l'eau souterraine; 2) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport aux mécanismes de contamination potentielle de l'eau souterraine qui pourraient résulter des activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures; 3) les incidences que pourrait avoir l'émission de contaminants à Haldimand par ces mécanismes de contamination potentielle.

6.2.1. Conditions du site par rapport au projet de règlement

Le tableau 6-2 fait le sommaire des conditions rencontrées à Haldimand par rapport aux principales conditions définies pour les activités d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures dans le projet de règlement du MDDEFP (2013) [voir l'annexe 4].

D'abord, l'absence de données propres à Haldimand ne permet pas de modifier la profondeur de l'aquifère par rapport à ce qui est présumé par le projet de règlement, soit 200 m sous la surface du sol. La modélisation numérique montre que de l'eau douce pourrait être présente jusqu'à une telle profondeur, mais les conditions utilisées pour la modélisation font en sorte que la profondeur indiquée par le modèle peut être considérée comme une valeur maximale.

En ce qui concerne la distance entre les forages ou sondages pétroliers et les puits d'approvisionnement en eau, le projet de règlement prévoit 300 m. Les puits pétroliers présentement actifs (Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2) ainsi que le site prévu pour le forage Haldimand n° 4 sont situés à des distances approximatives de 730 m, 1 060 m et 850 m, respectivement, de puits d'approvisionnement en eau souterraine. Ces distances respectent donc les exigences du projet de règlement à cet égard.

Le permis du MRN accordé pour le forage du puits Haldimand n° 4 n'autorise pas la réalisation de fracturation hydraulique dans ce puits. Cependant, si tel était le cas, le projet de règlement du MDDEFP exige que la fracturation hydraulique soit faite à une profondeur excédant 400 m sous la base d'un aquifère, ce qui signifierait une profondeur de 600 m sous la surface du sol dans le cas où la profondeur de l'aquifère serait de 200 m. Le toit du réservoir pétrolier aux puits Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2 est respectivement à 930 m et 722 m sous la surface du sol. Uniquement sur le plan de la profondeur, les conditions présentes à Haldimand satisfont aux exigences du projet de règlement du MDDEFP. Cependant, ceci n'implique pas que toutes les exigences réglementaires soient respectées pour éventuellement permettre la fracturation hydraulique. En effet, le projet de règlement du MDDEFP prévoit d'autres exigences par rapport à la délivrance d'un permis pour la

fracturation hydraulique. Le MRN pourrait aussi imposer d'autres exigences pour la délivrance d'un tel permis.

Comme mentionné dans l'introduction du présent rapport, les travaux réalisés dans le cadre du mandat accordé par le MDDEFP impliquent la réalisation d'une caractérisation hydrogéologique qui satisfait aux conditions définies par le projet de règlement. Ce programme est donc conforme au projet de règlement en ce qui concerne la zone à caractériser dans un rayon de deux kilomètres du site de forage Haldimand n° 4 ainsi que par rapport au programme analytique sur les échantillons d'eau prélevés dans les puits d'approvisionnement en eau souterraine. En fait, le programme analytique réalisé sur certains échantillons, surtout en ce qui a trait aux puits d'observation, excède les exigences du projet de règlement. Cependant, le rayon de deux kilomètres a été défini sur la base du site du forage Haldimand n° 4 et non pas par rapport à l'extension horizontale prévue de ce puits dans le réservoir pétrolier.

Les puits d'observation dans le secteur Haldimand ont été installés par TechnoRem (2013), qui avait reçu un mandat de Pétrolia de faire une caractérisation hydrogéologique. Le réseau de puits d'observation est conforme aux conditions prévues par le projet de règlement sur le plan de la mise en place de trois puits d'observation aux sites de forage ou sondages, et ce, pour les deux puits pétroliers existants (Haldimand n° 1 et n° 2) ainsi que pour le forage prévu Haldimand n° 4. Le réseau de puits d'observation excède en fait les exigences du projet de règlement, car il comprend aussi des puits d'observation placés dans les hauts topographiques de la péninsule ainsi que des puits d'observation entre les sites pétroliers et les puits résidentiels situés au nord de la péninsule, même si les directions d'écoulement de l'eau souterraine à partir des puits pétroliers ne sont pas en direction de ces puits résidentiels.

Enfin, bien que cela ne fasse pas partie des nouvelles exigences du projet de règlement du MDDEFP (2013), nous avons vérifié si la quantité d'eau souterraine qu'il est prévu d'utiliser lors de la réalisation du forage Haldimand n° 4 excède le seuil exigeant la demande d'une autorisation. Il apparaît que les débits d'exploitation de l'eau souterraine prévus aux fins de la réalisation de ce forage sont bien inférieurs au seuil exigeant la demande d'un permis.

En résumé, toutes les conditions présentes dans le secteur Haldimand par rapport à l'éventuel forage Haldimand n° 4 respectent les exigences du projet de règlement du MDDEFP (2013). C'est cependant le MDDEFP lui-même qui a pris la responsabilité de réaliser une caractérisation hydrogéologique conforme aux exigences du projet de règlement. Les exigences du projet de règlement par rapport à la mise en place d'un réseau de puits d'observation étaient déjà respectées par les travaux réalisés antérieurement par TechnoRem (2013) en vertu d'un mandat que lui avait confié Pétrolia (voir l'annexe 4). Le projet de règlement du MDDEFP (2013) contient aussi d'autres dispositions à l'égard du suivi de la qualité de l'eau souterraine dans le temps et de la tenue d'un registre des données issues de la caractérisation hydrogéologique et du suivi. Ces conditions ne peuvent pas être évaluées, car elles concernent des activités futures.

Tableau 6-2 Sommaire des conditions du secteur Haldimand par rapport au projet de règlement du MDDEFP (2013)

Conditions	Projet de règlement*	Conditions à Haldimand	Remarques
Profondeur de l'aquifère	29. 1° « aquifère » : une formation géologique contenant de l'eau jusqu'à une profondeur de 200 mètres ou, si la teneur en solides dissous de l'eau contenue dans la formation géologique est supérieure à 4 000 mg/L, à la profondeur correspondant à la présence d'une telle eau.	Il n'y a pas de données permettant de préciser la profondeur jusqu'à laquelle l'eau a une concentration inférieure à 4 000 mg/L. Les puits (résidentiels ou municipaux) exploitent l'eau souterraine à moins de 100 m de profondeur. La fracturation et la conductivité hydrauliques diminuent avec la profondeur sous la surface du roc. Le potentiel aquifère devrait donc être de moins en moins bon avec la profondeur.	Le modèle numérique montre que la zone active d'écoulement pourrait aller jusqu'à 120 m sous le NMM et que l'eau « douce » pourrait se trouver jusqu'à environ 200 m de profondeur. La profondeur « par défaut » de l'aquifère de 200 m doit être utilisée faute de données démontrant que la profondeur véritable est différente de cette valeur.
Distance de puits résidentiels ou municipaux	30. Il est interdit d'aménager une installation ou de réaliser un sondage stratigraphique à moins de 300 mètres d'un site de prélèvement d'eau effectué à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire.	Haldimand n° 1 est à environ 730 m de puits. Haldimand n° 2 est à environ 1 060 m de puits. Haldimand n° 4 est prévu à environ 850 m de puits (au début et à la fin du forage horizontal). Distance de 5 100 m entre le début et de 4 800 m entre la fin de Haldimand n° 4 et le puits municipal le plus près.	La distance séparatrice des puits existants et du puits projeté est conforme au projet de règlement. La carte 36 montre l'espace potentiellement accessible aux forages ou sondages pétroliers par rapport à la distance séparatrice de 300 m des puits d'approvisionnement en eau (certains puits existants pourraient ne pas avoir été répertoriés).
Profondeur du réservoir pétrolier	42. La fracturation d'un puits destiné à l'exploration ou à l'exploitation du pétrole ou du gaz naturel est interdite à moins de 400 mètres sous la base d'un aquifère.	Les puits pétroliers actifs Haldimand n° 1 et Haldimand n° 2 indiquent que les profondeurs du toit du réservoir atteignent respectivement 930 m et 722 m.	La distance séparatrice de 600 m entre la surface du sol et la profondeur de fracturation n'interdirait pas la fracturation de ce réservoir.
Zone à caractériser	35. Le responsable d'une installation doit effectuer une caractérisation initiale au moins 30 jours avant le début des travaux d'aménagement d'une installation. Cette caractérisation doit couvrir un territoire dont la superficie minimale correspond à un rayon de 2 kilomètres en dehors des limites de l'installation à aménager. (...)	Le MDDEFP a échantillonné systématiquement l'eau souterraine dans les puits dans un rayon de 2 km de la localisation prévue du forage Haldimand n° 4. La caractérisation de TechnoRem (2013) avait échantillonné seulement une partie des puits, mais sur le pourtour de la péninsule d'Haldimand.	La caractérisation du MDDEFP a considéré la position d'origine prévue du forage Haldimand n° 4 et non pas sa section horizontale.
Contenu de la caractérisation	36. La caractérisation initiale s'effectue par une étude hydrogéologique permettant de définir le contexte hydrogéologique du secteur visé par la recherche ou l'exploitation du pétrole, du gaz naturel, de la saumure ou d'un réservoir souterrain. (...)	Le mandat reçu par l'INRS vise la production d'une telle étude hydrogéologique qui pourrait servir d'exemple aux futures études après l'entrée en vigueur du projet de règlement.	L'étude de l'INRS a été réalisée conformément aux exigences du projet de règlement et certains travaux dépassent les exigences.

Conditions	Projet de règlement*	Conditions à Haldimand	Remarques
Analyses de l'eau souterraine	37. Le responsable d'une installation doit procéder à l'échantillonnage des eaux exploitées par les prélèvements d'eau effectués à des fins de consommation humaine ou de transformation alimentaire sur le territoire couvert par l'étude conformément à l'annexe II, sauf si le propriétaire d'un prélèvement d'eau refuse l'échantillonnage de son site. (...)	---	Le MDDEFP a procédé à l'échantillonnage et à l'analyse de l'eau souterraine en conformité avec le projet de règlement.
Puits d'observation	38. Le responsable d'une installation doit aménager au moins trois puits d'observation des eaux souterraines préalablement aux travaux d'aménagement d'une installation. Ceux-ci doivent être localisés à moins de 100 mètres des limites de l'installation à aménager, dont un devra être localisé en amont hydraulique et deux en aval hydraulique.	Les travaux réalisés par TechnoRem (2013) avaient déjà impliqué l'installation de trois puits d'observation aux sites de chacun des puits pétroliers actifs (Haldimand n° 1 et n° 2) et du puits prévu Haldimand n° 4.	Le réseau de puits d'observation en place à Haldimand excède les exigences du projet de règlement du MDDEFP.
Utilisation d'eau par le forage Haldimand n° 4	Loi sur la qualité de l'environnement, article 31.75. <i>Tout prélèvement d'eau est subordonné à l'autorisation du ministre ou, dans les cas prévus par règlement pris en vertu de l'article 31.9, du gouvernement. Sont cependant soustraits à cette autorisation les prélèvements suivants : 1° un prélèvement dont le débit maximum est inférieur à 75 000 litres par jour (...)</i>	Une quantité d'environ 340 000 litres d'eau (Tardif, 2012) est estimée pour le forage Haldimand n° 4 avec un maximum de 15 m ³ /jour (Pétrolia, comm. pers. 2014).	Le débit d'utilisation d'eau prévu à Haldimand n° 4 est inférieur au seuil défini par la Loi sur la qualité de l'environnement par rapport à une exigence d'autorisation.

*Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). 2013. *Prélèvement des eaux et leur protection et Code de gestion des pesticides, Règlement relatif à l'application de la Loi sur la qualité de l'environnement, Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées, Règlement sur la qualité de l'eau potable, Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés et Règlement sur le pétrole, le gaz naturel et les réservoirs souterrains — Modification. Gazette officielle du Québec, 29 mai 2013, 145^e année, n° 22, partie 2, p. 2184-2215.*

6.2.2. Conditions du site par rapport aux mécanismes de contamination

La présente section discute des conditions rencontrées dans le secteur Haldimand et de leurs implications sur les mécanismes potentiels d'émission des contaminants dans l'eau souterraine par des activités d'exploration ou de production d'hydrocarbures. Ces mécanismes incluent les épanchements de liquide en surface, les fuites à travers la cimentation ou les coffrages et la migration des fluides à partir des niveaux exploités jusqu'aux aquifères par des cheminements préférentiels qui peuvent être naturels (failles) ou reliés aux opérations pétrolières (anciens puits ou puits actifs) [US EPA, 2012; Kissinger et al., 2013; Jackson et al., 2013]. La fracturation hydraulique peut augmenter le potentiel de migration par des failles ou d'anciens puits pétroliers (Gassiat et al., 2013; Watson, 2013; AER, 2013) et ce point est souligné plus loin, bien que le permis pour le forage Haldimand n° 4 n'implique pas la fracturation hydraulique.

Le tableau 6-3 résume les mécanismes potentiels d'émission des contaminants, les conditions rencontrées à Haldimand qui ont une incidence sur ces mécanismes et l'importance du risque pour la qualité de l'eau souterraine découlant de ces mécanismes. Le texte de la présente section donne aussi des informations additionnelles sur les conditions qui sont reliées aux mécanismes potentiels de contamination pour le site du forage Haldimand n° 4 et les sites des puits Haldimand n° 1 et n° 2. Cette section ne traite cependant pas des questions reliées à l'utilisation de l'eau souterraine, aux nuisances reliées aux opérations de forage (bruit, circulation, lumière, etc.) et aux émissions atmosphériques.

6.2.2.1. Épanchement de liquide en surface

Le premier mécanisme potentiel de contamination de l'eau souterraine considéré est l'épanchement de liquide à la surface du sol. Ce type de contamination peut être considéré comme celui qui est le plus susceptible de se produire (MIT, 2010). Des émissions de contaminants peuvent se produire suite à des accidents reliés au transport, au transfert ou à l'entreposage de liquides à la surface du sol. Le risque de dégradation de l'eau souterraine par rapport à ce mécanisme d'émission dépend de la vulnérabilité de l'aquifère, de la nature des liquides impliqués dans un épanchement ainsi que du transfert possible de contaminants entre le site d'émission et des milieux récepteurs qui pourraient être des cours d'eau ou des puits d'approvisionnement en eau souterraine dans le cas du secteur Haldimand.

L'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère au roc par rapport à une contamination provenant de la surface a montré que cet aquifère a un niveau de vulnérabilité pouvant être qualifié de moyen à très élevé, selon les endroits. Le niveau de vulnérabilité dépend en grande partie de l'épaisseur de till peu perméable recouvrant l'aquifère au roc. Dans les environs du site du forage Haldimand n° 4, l'indice de vulnérabilité va de moyen à élevé. Des émissions de contaminants dans ce secteur sont donc susceptibles de mener à la contamination de l'aquifère au roc. Une mesure de mitigation de ce risque a été prise par l'installation d'une membrane imperméable sous le remblai installé comme assise du site de forage.

En ce qui concerne les milieux récepteurs, la direction de l'écoulement au site du forage Haldimand n° 4 montre que c'est le ruisseau Dean qui serait le milieu récepteur d'une potentielle émission de contaminants dans l'aquifère au roc à ce site. Par contre, l'écoulement de l'eau souterraine ne se fait pas vers les puits résidentiels présents au nord du site du forage Haldimand n° 4, de sorte que ces puits ne seraient pas des milieux récepteurs d'une éventuelle émission de contaminants à ce site. Quant au ruisseau Dean, à proximité du site de forage Haldimand n° 4, la présence d'une épaisseur de till de l'ordre de 2 à 4 m d'épaisseur fait en sorte que le ruisseau n'est pas directement en contact avec l'aquifère au roc dans ce secteur.

Le risque de dégradation de la qualité de l'eau souterraine relié à un épanchement à la surface dépend en grande partie du type de liquide épanché. Un épanchement de boue de forage ou d'un liquide aqueux de salinité même élevée aurait un effet plutôt limité tant qu'il ne contient pas de contaminants en grande concentration (tels des métaux). L'effet de retard et de dilution à travers le roc poreux fracturé et le till d'un contaminant miscible à une concentration initiale modérée, même initialement au-dessus des critères de potabilité, n'aurait pas de conséquence importante à long terme sur la qualité de l'eau souterraine. Par contre, l'émission d'un liquide immiscible, tel un hydrocarbure, qui atteindrait l'aquifère de roc fracturé aurait possiblement pour effet de créer une zone source de contamination à long terme qui pourrait être difficile à réhabiliter. Le panache de contaminants dissous émis par cette zone source pourrait toutefois être contrôlé par des techniques éprouvées et subirait du retard ainsi que de l'atténuation lors de sa migration. Il faut aussi noter que la source d'une éventuelle contamination en hydrocarbures pourrait être déterminée sur la base de la composition de ces hydrocarbures, puisque la composition des suintements pétroliers naturels est distincte du pétrole brut du réservoir produit au puits Haldimand n° 1, qui est lui-même distinct de la composition de l'essence ou du diesel produit par une raffinerie. De même, la composition isotopique du méthane retrouvé naturellement dans l'eau souterraine de l'aquifère au roc pourrait être distinguée d'un méthane purement thermogénique qui migrerait directement de la profondeur jusqu'à l'aquifère au roc.

Des mesures de mitigation du risque potentiel relié à des épanchements de liquide en surface peuvent être envisagées, notamment : 1) la sélection de futurs sites de forage dans les zones les moins vulnérables; 2) la gestion rigoureuse des fluides manipulés et des réservoirs qui les contiennent; 3) la mise en place de mesures empêchant les liquides émis d'atteindre l'aquifère au roc ou de ruisseler à la surface du sol, telles que des bermes ou des membranes en bordure des sites de forage ou sous ceux-ci; 4) l'utilisation de fluides de forage à faible toxicité.

6.2.2.2. Fuite à travers les coffrages et la cimentation

Le deuxième mécanisme de contamination considéré est l'émission de contaminants à travers les coffrages ou la cimentation qui permettrait à des fluides (liquide ou gaz) d'atteindre l'aquifère au roc suite à une migration à partir du réservoir ou d'intervalles contenant des hydrocarbures entre la surface et le réservoir. La migration de gaz ou liquide à l'intérieur des coffrages peut être décelée par la pression ou présence de gaz dans la tête de forage et des mesures correctrices peuvent être prises. Ce type de migration est donc relativement peu susceptible d'affecter l'aquifère, du moins pendant

que les puits pétroliers font l'objet d'opérations et d'un suivi. Un abandon et une cimentation adéquats d'un puits devraient aussi minimiser l'éventualité d'un tel type de migration. De plus, de telles émissions sont encore moins probables à travers le double coffrage (de surface et intermédiaire) qui est présent dans l'intervalle à potentiel aquifère. À Haldimand, la profondeur de ce double coffrage est de l'ordre de 200 m. Cependant, il est plus difficile de déceler l'éventuelle migration de gaz à travers la cimentation extérieure d'un puits et son cheminement subséquent à travers un réseau naturel de fractures avant d'atteindre l'aquifère au roc près de la surface. Selon Nowamooz et al. (2013), cette migration entre les coffrages ou la cimentation pourrait se faire en moins de 10 ans si la qualité de la cimentation est très déficiente.

Si des émissions se produisaient dans les unités rocheuses sous le niveau du coffrage de surface (≈ 200 m à Haldimand), elles surviendraient à une profondeur à laquelle les temps de résidence de l'eau souterraine excèdent 100 000 ans et peuvent même excéder un million d'années. La migration de tels fluides à travers les unités rocheuses se ferait aussi en dehors de la zone active d'écoulement de l'eau souterraine et ne serait pas susceptible d'atteindre la zone de l'aquifère au roc exploitée par des puits résidentiels. Des émissions en profondeur au nord du centre de la péninsule seraient plus susceptibles d'émerger du côté nord, tandis que des émissions du côté sud pourraient émerger au nord de la rivière St-Jean. Le temps très long requis pour une telle migration permettrait aux processus d'atténuation (mélange et dégradation) de réduire considérablement la concentration des contaminants émis, de sorte qu'il pourrait être difficile de les déceler.

Tous les moyens qui assurent l'intégrité du coffrage d'acier et la qualité de la cimentation auront pour effet de mitiger le risque d'occurrence de ce mécanisme d'émission de contaminants. Une migration qui atteindrait la proximité du site de forage pourrait toutefois être détectée par le puits d'observation situé au site même de forage ou au puits d'observation localisé en aval. La présence de plus d'un puits d'observation à proximité du site de forage ou le suivi du méthane dans les gaz du sol sur le site de forage ou son pourtour auraient une meilleure capacité de détection. Enfin, la migration d'un panache de contaminants résultant de l'émission de gaz ou de liquide immiscible peut être contrôlée par des techniques de réhabilitation connues et éprouvées.

6.2.2.3. Migration le long de voies préférentielles naturelles

Des travaux sur la séquestration géologique du CO₂ dans les aquifères salins profonds ont montré que la migration importante de fluides à travers la colonne stratigraphique « intacte » n'est pas susceptible de se produire sur des périodes inférieures à des temps géologiques pouvant atteindre des millions d'années. La migration de fluides de la « profondeur » jusqu'à la surface doit donc se faire en suivant des voies préférentielles, telles que des zones de failles si celles-ci sont perméables. Cette migration exige aussi que des pressions fortes existent pour déclencher la migration. Même sous ces conditions, les temps de migration pourraient être très longs et se compter en milliers d'années (Gassiat et al., 2013). Enfin, tel que l'a suggéré la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine du secteur Haldimand, l'écoulement actif ne devrait pas se produire à de grandes profondeurs où les temps de résidence de l'eau souterraine peuvent être de plusieurs millions d'années.

Dans le secteur Haldimand, les failles Haldimand et du Bras Nord-Ouest sont des failles majeures qui sont en continuité entre la profondeur où se trouve le réservoir pétrolier et la surface. Il est envisageable que ces failles puissent agir en tant que voie de migration préférentielle puisque la perméabilité de ces failles, du moins sur les temps géologiques, semble être mise en évidence par la présence de suintements pétroliers. Dans le secteur Haldimand, la présence d'eau souterraine « évoluée », mais faiblement concentrée, dans certains puits d'observation ou résidentiels pourrait indiquer un apport limité d'eau « profonde ». La faible proportion de méthane thermogénique indique toutefois que cet apport « profond » est limité. Le modèle numérique montre aussi que de l'eau très évoluée et d'âge ancien pourrait être présente à moins de 200 m sous Haldimand, ce qui fait que les apports « profonds » n'ont pas à provenir du niveau où se trouve le réservoir pétrolier. L'étanchéité du réservoir pétrolier lui-même est démontrée par l'accumulation de pétrole et les pressions mesurées dans le réservoir qui excèdent la pression hydrostatique de la colonne d'eau allant de la surface jusqu'au réservoir.

Pour que la migration de contaminants le long d'une voie préférentielle ait un impact sur un milieu récepteur (puits dans l'aquifère au roc, ruisseaux, mer), il faut que les voies préférentielles fassent le lien entre un point d'émission et un récepteur. De telles émissions peuvent être prévenues en assurant la préservation de l'intégrité du réservoir et l'évitement de fuites par les forages. Encore une fois, ceci nécessite de s'assurer de l'intégrité des coffrages et de la cimentation des forages. Aussi, le respect d'une distance séparatrice (à préciser) des puits pétroliers dans le réservoir par rapport aux failles régionales majeures permettrait de réduire la possibilité que d'éventuelles activités d'exploration ou de production induisent une migration de fluides le long des failles bordant le réservoir pétrolier.

6.2.2.4. Fuite à travers les forages pétroliers existants

En plus des voies naturelles discutées dans la section précédente, d'anciens forages pétroliers peuvent aussi servir de voies préférentielles de migration s'ils ne sont pas scellés adéquatement (coffrages, cimentation extérieure et scellement intérieur). Le risque de migration par d'anciens puits ne se présente que s'il y a fuite à travers le coffrage d'un puits actif ou que l'ancien puits est dans la même unité réservoir qui est produite. La fracturation hydraulique peut entraîner des effets dans des puits existants à proximité (Watson, 2013; AER, 2013).

Dans le secteur Haldimand, les anciens puits P.O.T. n° 1 et P.O.T. n° 8 pénètrent dans le réservoir pétrolier et P.O.T. n° 2 est à sa périphérie. Les autres anciens puits pétroliers ne pénétreraient pas dans le réservoir pétrolier. Certains anciens puits pétroliers ont fait l'objet d'un programme d'abandon et de cimentation par le MRN (Foragaz, 1999). Cependant, l'état des puits P.O.T. n° 1 et P.O.T. n° 8 demeure inconnu, puisqu'ils n'ont pas été localisés dans le cadre du programme de fermeture sécuritaire des puits du MRN en 1994 (MRN, 1994). L'état des anciens puits devrait cependant faire l'objet d'une vérification. La minimisation de la possibilité que les anciens puits pétroliers servent de voies de migration de contaminants impliquerait la vérification de l'état des anciens puits pétroliers qui sont orphelins, et leur réparation au besoin, dont la responsabilité est présumée relever du MRN (ce qu'il faut vérifier).

Tableau 6-3 Sommaire de l'évaluation du risque environnemental des opérations pétrolières pour le secteur Haldimand par rapport aux mécanismes potentiels d'émission de contaminants

Mécanisme d'émission	Description du mécanisme	Conditions à Haldimand	Importance du risque pour l'eau souterraine
Épanchement de liquide en surface	Émission de contaminants à la surface du sol lors du transport, du transfert ou de l'entreposage de liquides à la surface.	La vulnérabilité de l'aquifère au roc va de moyenne à très élevée. Le temps de résidence de l'eau souterraine entre l'intérieur et la périphérie de la péninsule est > 1 000 ans. Conditions propres à Haldimand n° 4 : la vulnérabilité est intermédiaire pour le secteur (moyenne à élevée); le ruisseau Dean est le milieu récepteur potentiel le plus près, mais il n'est pas en contact direct avec l'aquifère au roc (till épais sous le ruisseau); l'écoulement de l'eau souterraine à partir de la surface ne se fait pas vers les puits résidentiels au nord.	<p>Type d'émission le plus probable (MIT, 2010). Le risque pour l'eau souterraine dépend de la vulnérabilité, de la nature des liquides émis et de la distance par rapport aux récepteurs. L'émission dans une zone vulnérable de liquides immiscibles (hydrocarbures) pourrait former une zone source de contamination à long terme. La nature fracturée, mais poreuse de l'aquifère au roc aurait pour effet de « retarder » la migration d'un panache de contaminants dissous.</p> <p>Mesures de mitigation du risque : 1) sélection de futurs sites de forage dans les zones les moins vulnérables; 2) gestion rigoureuse des fluides et réservoirs; 3) bermes ou membrane limitant la migration en surface; 4) fluides de forage à faible toxicité.</p> <p>Note : la composition chimique distincte de l'huile des suintements et de celle du réservoir pétrolier permettrait de distinguer une contamination causée par un déversement de l'huile du réservoir de l'effet d'un suintement.</p>
Fuite à travers les coffrages et la cimentation	Émission de contaminants à travers les coffrages ou la cimentation par des fluides (liquide ou gaz) provenant du réservoir ou d'intervalles contenant des hydrocarbures entre la surface et le réservoir.	Si des émissions se produisaient sous le niveau du coffrage de surface (≈200 m, où il y a un double coffrage), cela se produirait où les temps de résidence de l'eau souterraine excèdent 100 000 ans et peuvent même excéder un million d'années. La migration de tels fluides se ferait aussi en dehors de la zone active d'écoulement de l'eau souterraine et ne serait pas susceptible d'atteindre la zone de l'aquifère au roc exploitée par des puits résidentiels. Des émissions en profondeur au nord du centre de la péninsule seraient plus susceptibles d'émerger du côté nord, tandis que des émissions du côté sud pourraient émerger au nord de la rivière St-Jean.	<p>La migration de gaz ou liquide à l'intérieur des coffrages peut être décelée par la pression ou présence de gaz dans la tête de forage et des mesures correctrices peuvent être prises. La migration de gaz à travers la cimentation extérieure peut atteindre l'aquifère de surface. Des émissions hors d'un double coffrage (de surface et intermédiaire) et de la cimentation sont peu probables.</p> <p>Mesures de mitigation du risque : l'intégrité du coffrage d'acier et la qualité de la cimentation doivent être vérifiées et corrigées au besoin; le puits d'observation à la surface peut déceler l'émission de gaz ou de liquides immiscibles qui peut être contrôlée par des techniques de réhabilitation.</p>

Mécanisme d'émission	Description du mécanisme	Conditions à Haldimand	Importance du risque pour l'eau souterraine
<p>Migration le long de voies préférentielles naturelles</p>	<p>La migration importante de fluides à travers la colonne stratigraphique « intacte » n'est pas susceptible de se produire. La migration relativement rapide de la « profondeur » jusqu'à la surface ne peut se faire que suivant des voies préférentielles, telles que des zones de failles si elles sont perméables. Cette migration exige aussi que des pressions fortes existent pour déclencher la migration. Même sous ces conditions, les temps de migration sont très longs (milliers d'années). Enfin, l'écoulement actif ne se produit pas à de grandes profondeurs où les temps de résidence de l'eau souterraine peuvent être de millions d'années.</p>	<p>Les failles Haldimand et du Bras Nord-Ouest sont des failles majeures en continuité entre la profondeur et la surface qui pourraient agir en tant que voies de migration préférentielles (évidence par suintements pétroliers). La présence d'eau souterraine « évoluée », mais faiblement concentrée, dans certains puits d'observation ou résidentiels pourrait indiquer un apport limité d'eau « profonde ». La faible proportion de méthane thermogénique indique que cet apport « profond » est limité. Le modèle montre que de l'eau très évoluée et d'âge très ancien pourrait être présente à moins de 200 m sous Haldimand, ce qui fait que les apports « profonds » n'ont pas à provenir du niveau où se trouve le réservoir. Le réservoir avec du pétrole est à une pression qui excède fortement la pression hydrostatique, ce qui montre que la roche couverture permet un isolement hydraulique du réservoir pétrolier.</p>	<p>Pour qu'il y ait un impact sur un milieu récepteur (puits dans l'aquifère au roc, ruisseaux, mer), il faut que les voies préférentielles fassent le lien entre un point d'émission et un récepteur. La préservation de l'intégrité du réservoir et la minimisation du risque de fuites par les forages nécessitent l'intégrité des coffrages et de la cimentation.</p> <p>Mesures de mitigation : assurer la qualité des coffrages et de la cimentation; assurer une distance séparatrice des puits pétroliers dans le réservoir par rapport aux failles régionales majeures.</p>
<p>Fuite à travers les forages pétroliers existants</p>	<p>D'anciens forages pétroliers peuvent servir de voies préférentielles de migration s'ils ne sont pas scellés adéquatement (coffrages, cimentation extérieure et scellement intérieur).</p>	<p>Les anciens puits P.O.T. n° 1 et P.O.T. n° 8 pénètrent dans le réservoir et P.O.T. n° 2 est à sa périphérie. Les autres anciens puits pétroliers ne pénétreraient pas dans le réservoir. Les anciens puits pétroliers ont fait l'objet d'un programme d'abandon et de cimentation (Foragaz, 1999). L'état des anciens puits devrait cependant faire l'objet d'une vérification.</p>	<p>Le risque de migration par d'anciens puits ne se présente que s'il y a fuite à travers le coffrage d'un puits actif ou que l'ancien puits est dans la même unité réservoir qui est produite. La fracturation hydraulique peut entraîner des effets dans des puits existants à proximité.</p> <p>Mesures de mitigation : vérifier l'état des anciens puits (responsabilité présumée du MRN pour certains forages orphelins); s'assurer de l'intégrité des coffrages et de la cimentation.</p>

6.2.3. Incidence potentielle d'émissions de contaminants

La présente section a pour but de faire une évaluation très sommaire de l'incidence que pourraient avoir des émissions potentielles de contaminants causées par les mécanismes reliés aux activités d'exploration ou de production d'hydrocarbures qui ont été décrits dans la section précédente.

Les épanchements de liquide en surface représentent le mode de contamination le plus susceptible de se produire et la vulnérabilité moyenne à très élevée de l'aquifère au roc fait en sorte que ces épanchements pourraient avoir une incidence directe sur la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Sans mesures de prévention ou de mitigation, ce mécanisme d'émission pourrait être à l'origine de zones sources de contamination qui pourraient agir à moyen ou long terme (au-delà d'une décennie), particulièrement si le liquide émis est un contaminant organique immiscible comme un hydrocarbure. Considérant la localisation du site du forage Haldimand n° 4, c'est le ruisseau Dean qui serait le milieu récepteur susceptible d'être affecté par ce mécanisme d'émission. Dans un milieu fracturé qui est aussi poreux, les contaminants migrent par advection dans les fractures avec l'eau souterraine, mais la diffusion de contaminants des fractures vers la matrice rocheuse poreuse adjacente retarde leur migration (Pankow et Cherry, 1996). Ainsi, la migration de contaminants dissous serait retardée par la nature poreuse et fracturée de l'aquifère au roc ainsi que par la présence de till d'une épaisseur variant entre 2 et 4 m sous le ruisseau Dean dans la zone d'émergence de l'eau souterraine en provenance de ce site. De plus, des mesures de protection de l'aquifère au roc, telle la mise en place d'une membrane sous le site de forage, permettraient de limiter le risque de contamination de l'aquifère au roc. Une gestion rigoureuse des opérations de transport, de transfert et d'entreposage des fluides contribuerait aussi à la réduction du risque de contamination. La situation aux sites des puits Haldimand n° 1 et n° 2 est très semblable à celle du site du forage Haldimand n° 4. À ces trois sites, les puits résidentiels entourant la péninsule d'Haldimand de même que les puits municipaux situés au sud de la rivière St-Jean ne représentent pas des milieux récepteurs potentiels d'émissions qui se produiraient aux sites mêmes de ce forage ou de ces puits. Cependant, si des épanchements se produisaient sur les routes conduisant aux sites de forage, alors certains des puits résidentiels situés au nord de la péninsule pourraient constituer des milieux récepteurs de la contamination. La route conduisant au site du forage Haldimand n° 4 est dans une zone à vulnérabilité élevée et donc plus à risque qu'un épanchement mène à une contamination de l'aquifère au roc. Un programme d'intervention rapide pourrait réduire les incidences d'un éventuel épanchement.

Dans le cas de fuites à travers les coffrages et la cimentation des puits pétroliers, c'est la migration de gaz qui est plus susceptible de se produire si un puits pétrolier a intercepté un intervalle contenant du gaz entre la surface et le réservoir pétrolier. La migration dans l'espace annulaire du puits serait décelable par la pression et la présence de méthane en tête de forage. La migration à l'extérieur du forage pourrait apporter du méthane au site de forage qui serait possiblement décelé dans le puits d'alimentation en eau du site de forage (qui sert aussi de puits d'observation). À cet égard, la présence de méthane avec une signature isotopique indiquant une source

thermogénique à PH-01 (site d'Haldimand n° 1) devrait faire l'objet d'une investigation plus approfondie pour en déterminer la source. Des mesures de gaz en surface ou en périphérie des sites de forage ou de puits pourraient aussi permettre de déceler la migration de gaz le long d'un puits pétrolier. Une telle migration de gaz aux sites des forages ou puits pétroliers aurait une incidence surtout locale sur l'eau souterraine et représenterait avant tout un risque pour le personnel et les infrastructures.

L'incidence de la migration de contaminants le long de cheminements préférentiels est beaucoup plus difficile à évaluer. Des recherches récentes ont montré qu'une telle migration se ferait à très long terme (milliers d'années) dans le cas où une faille intercepte une zone fracturée hydrauliquement dans la partie supérieure d'un shale gazéifère dont la pression serait maintenue à long terme (Gassiat et al., 2013). Cependant, cette étude ne considérait pas les mécanismes de migration de gaz le long d'une faille, mais uniquement de liquide. Le temps de résidence très long (pouvant excéder des centaines ou même des millions d'années) de l'eau souterraine à partir de 200 à 300 m sous la surface du sol semble indiquer qu'une fuite au-delà de telles profondeurs ne pourrait pas mener à des effets détectables sur les milieux récepteurs que sont les cours d'eau et les puits d'approvisionnement en eau souterraine. La vérification de l'intégrité des coffrages et de la cimentation, suivie de la prise de mesures correctrices au besoin, demeure la mesure de mitigation la plus directe et efficace du risque posé par la migration de contaminants le long de voies préférentielles.

En ce qui concerne la migration par les anciens puits, le fait que certains puits atteignent le réservoir pétrolier Haldimand devrait inciter à une vérification de la qualité des mesures d'abandon et de cimentation des anciens puits prises par le MRN (Foragaz, 1999).

Quel que soit le mécanisme d'émission considéré, si les émissions sont constituées de pétrole provenant du réservoir pétrolier ou de gaz thermogénique, la signature chimique de ces hydrocarbures pourra être distinguée de celle des suintements pétroliers et du méthane présent naturellement à Haldimand.

6.3. Réseau de surveillance

L'emplacement des puits d'observation forés par TechnoRem (2013) pour Pétrolia respecte les exigences du projet de règlement du MDDEFP (2013). Ce réseau excède en fait les exigences et certains puits d'observation pourraient être abandonnés suite à la présente étude, alors que d'autres devraient être conservés pour assurer le suivi prévu par le projet de règlement du MDDEFP (2013).

En ce qui concerne les puits d'observation à garder en place pour un suivi à long terme, le premier groupe de puits à conserver serait les puits autour des sites de forage pétrolier (en amont, près du puits, en aval) et les puits permettant de suivre la qualité de l'eau souterraine en amont des puits résidentiels. Spécifiquement, les puits suivants devraient être gardés :

1) Autour d'Haldimand n° 1 : POH-11-09 (amont; adéquat pour donner un bruit de fond naturel, même si un peu au-delà de la ligne de partage), PH-01 (au site), POH-11-06

(aval) [ce puits d'observation est en conditions artésiennes, ce qui complique les activités d'échantillonnage; de façon à avoir des conditions non artésiennes, ce puits pourrait être fermé et remplacé par un nouveau puits foré plus au nord à une élévation d'au moins 10 m supérieure si on peut trouver un endroit approprié pour un forage];

2) Autour d'Haldimand n° 2 : POH-11-12 (amont; adéquat pour donner un bruit de fond naturel, même si un peu en amont de la ligne de partage), PH-02 (site) et POH-11-13 (aval; adéquat même si de l'autre côté du ruisseau, car il y a un couvert de till sous le ruisseau qui fait en sorte que le lien hydraulique n'est pas direct et que des émissions à Haldimand n° 2 pourraient ne pas être détectées par ce puits);

3) Autour d'Haldimand n° 4 : POH-11-05 (amont; à peu près idéal, car sur la ligne de partage), PH-04 (site; il faut vérifier la qualité de l'eau à ce puits) et POH-11-15 (aval);

4) En amont des puits résidentiels (même si les puits pétroliers sont de l'autre côté des lignes de partage des eaux de surface et souterraines) : a) en aval d'Haldimand n° 4 : POH-11-03 (ce puits est parfois en conditions artésiennes, mais il est très bien situé); b) en aval d'Haldimand n° 2 : POH-11-14; c) en aval d'Haldimand n° 1 : POH-11-10.

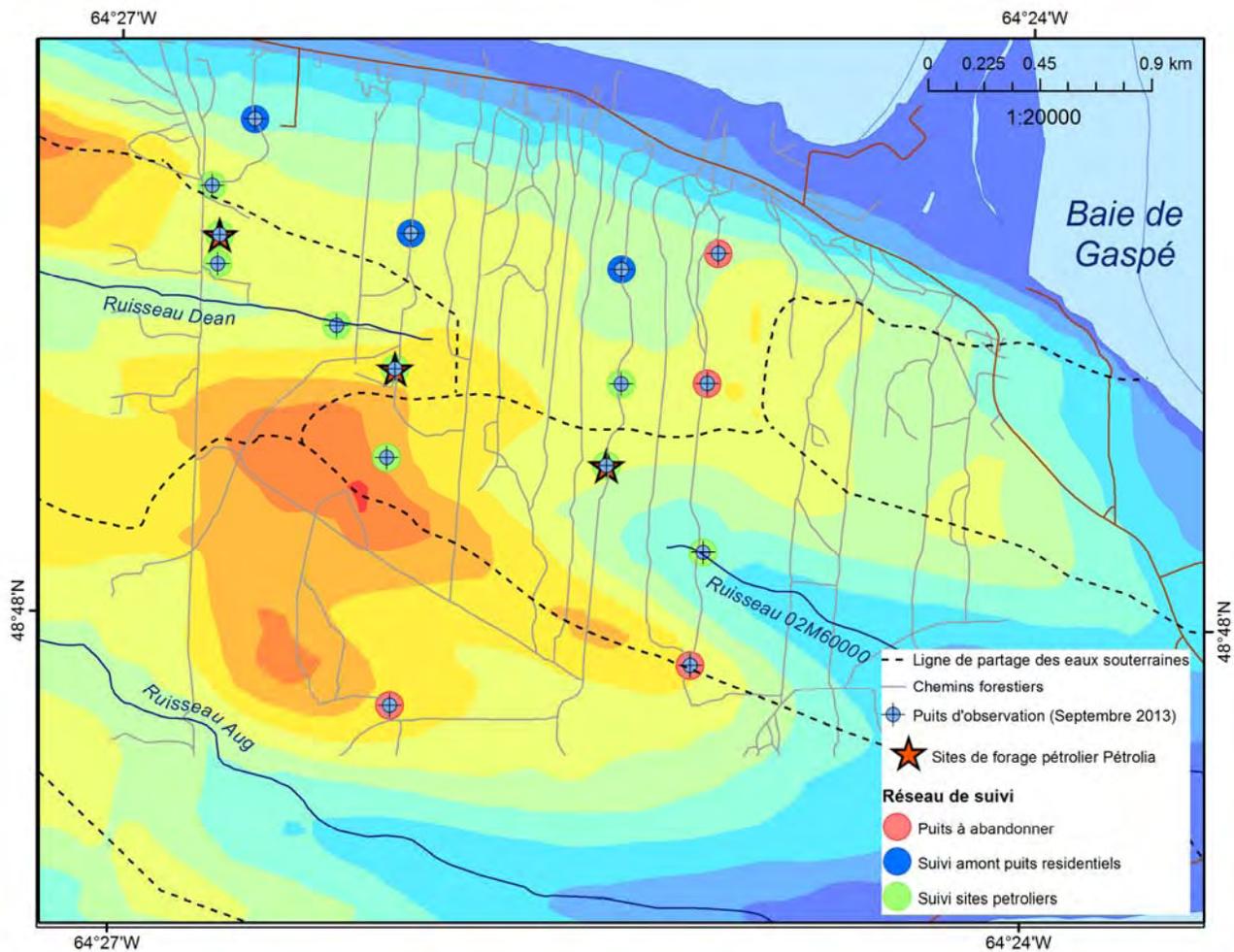


Figure 6.1 Localisation des puits d'observation existants à conserver et à abandonner

Parmi les puits d'observation à garder se trouvent les trois puits d'approvisionnement en eau des sites de forage. Si ces puits ne peuvent pas être dédiés au suivi, il faudra les remplacer par d'autres puits installés sur les sites de forage.

Certains puits d'observation existants semblent moins pertinents à garder à long terme : 1) les puits éloignés et difficilement accessibles sur des hauts topographiques (PH-11-07, PH-11-08 et PH-11-11); 2) les puits qui ne sont pas sur des voies d'écoulement potentielles par rapport aux puits pétroliers existants (POH-11-02 et POH-11-04). Ces derniers puits pourraient cependant être utiles à titre de « références » pour juger de changements saisonniers ou temporels de l'évolution de la géochimie des eaux souterraines dans le secteur Haldimand.

En résumé, il est suggéré de conserver 12 puits d'observation pour la surveillance à long terme (incluant les trois puits d'alimentation en eau des sites de forage) et d'abandonner cinq puits d'observation existants. De plus, comme les cours d'eau sont les milieux récepteurs potentiels les plus immédiats par rapport aux activités pétrolières existantes, il faudrait aussi conserver les trois puits de suivi de la qualité de l'eau de surface (SURFH-11-01, SURFH-11-02 et SURFH-11-03). Si les activités d'exploration, et éventuellement de développement et d'exploitation, se poursuivent, il faudra aussi mettre en place un suivi sur les ruisseaux Aug et Kennedy. Dans cette éventualité, il faudra alors aussi développer le réseau de suivi de l'eau souterraine.

7. CONCLUSIONS

L'interprétation des données existantes, de la caractérisation faite par TechnoRem en 2011-2012 et du programme d'échantillonnage de l'eau souterraine réalisé par le MDDEFP en 2013 a permis de définir les conditions hydrogéologiques dans le secteur Haldimand. Le présent rapport a ainsi décrit l'état de notre compréhension du système d'écoulement de l'eau souterraine dans la région d'étude sous la forme d'un modèle conceptuel hydrogéologique qui a servi de base au développement d'un modèle numérique d'écoulement à densité variable le long d'une ligne d'écoulement.

Sur le plan des matériaux, le roc poreux et fracturé (grès et mudstones) joue le rôle d'aquifère régional. Le roc est recouvert par des épaisseurs variables de till argileux et compact, agissant comme un aquitard. La fracturation du roc et sa perméabilité varient selon la profondeur sous la surface du roc. Le roc est plus fracturé, et parfois altéré, dans les 20 premiers mètres de sa partie supérieure, alors que l'intensité de la fracturation diminue rapidement jusqu'à environ 40 m. En ce qui concerne l'écoulement de l'eau souterraine, les hauts topographiques ne sont pas recouverts de till, ce qui en fait des zones de recharge préférentielle qui sont donc plus vulnérables à la contamination par les activités de surface. En dehors des hauts topographiques, la couverture de till limite la recharge, ce qui signifie aussi une réduction de la vulnérabilité. L'écoulement de l'eau souterraine dépend de la topographie et se fait des hauts topographiques vers les cours d'eau et la périphérie de la péninsule. Les cours d'eau semblent au moins partiellement reliés à l'aquifère, car ils agissent comme des drains. Cependant, la présence d'une épaisseur importante de till sous certains segments de cours d'eau fait que ce lien n'est pas nécessairement direct et continu, dans le temps ou l'espace.

L'eau souterraine du secteur Haldimand est généralement de très bonne qualité et très peu de dépassements de critères de santé ou esthétiques ont été observés dans les puits résidentiels ou d'observation. Il y a cependant une grande variabilité dans la géochimie de l'eau souterraine, surtout compte tenu de l'étendue restreinte de la région d'étude. La répartition spatiale des différents types d'eau est complexe, ce qui indique que la fracturation naturelle pourrait jouer un rôle dans la répartition des apports d'eau évoluée dans la zone active d'écoulement. Même si des suintements d'hydrocarbures sont présents à trois endroits à la surface de la région d'étude, on retrouve de très faibles concentrations d'hydrocarbures ou d'acides organiques dissous dans l'eau souterraine. La présence d'hydrocarbures et les pressions élevées dans le réservoir indiquent son isolement hydraulique des unités sus-jacentes. Cependant, du méthane se retrouve naturellement dans l'eau souterraine, associé préférentiellement à des eaux plus évoluées qui ont une plus grande salinité. Ce méthane est d'origine mixte, étant constitué d'un mélange de gaz biogénique et thermogénique. La variabilité et le niveau d'évolution de l'eau souterraine indiquent des temps de résidence importants de l'eau souterraine dans l'aquifère rocheux, comme le confirme la datation ^{14}C de l'eau souterraine. L'eau des puits d'observation et d'approvisionnement de la ville de Gaspé au sud de la rivière St-Jean a une géochimie distincte des eaux retrouvées dans la péninsule d'Haldimand.

La modélisation numérique montre que la zone d'écoulement actif dans le secteur Haldimand serait assez peu profonde, allant jusqu'à environ 120 m sous le NMM. De l'eau douce pourrait se trouver jusqu'à environ 200 m sous le NMM. La modélisation montre un apport important d'eau souterraine à partir des hautes terres situées au sud de la rivière St-Jean, laquelle est un exutoire important, mais cette eau poursuit son écoulement jusque sous Haldimand, jusqu'au nord de la péninsule. La modélisation montre aussi que les patrons d'écoulement peuvent apporter des eaux salines ayant de longs temps de résidence (excédant un million d'années) de la profondeur vers les exutoires du système d'écoulement, particulièrement la rivière St-Jean. Sous la péninsule d'Haldimand, on retrouverait des eaux à long temps de résidence (1 000 à 10 000 ans) à de relativement faibles profondeurs, ce qui expliquerait l'observation des eaux souterraines plus évoluées dont la répartition pourrait être influencée par un patron complexe de fracturation près de la surface du roc.

Sur la base de notre compréhension du système hydrogéologique, nous avons fait une évaluation du risque environnemental de dégradation de la qualité de l'eau souterraine par rapport aux activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures dans le secteur Haldimand. Cette évaluation tient compte de trois aspects de la question : 1) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport au projet de règlement du MDDEFP (2013) visant l'encadrement des activités d'exploration ou d'exploitation des hydrocarbures; 2) les conditions rencontrées à Haldimand par rapport aux mécanismes de contamination potentielle de l'eau souterraine qui pourraient résulter des opérations pétrolières; 3) les incidences que pourrait avoir l'émission de contaminants à Haldimand par ces mécanismes de contamination potentielle. Toutes les conditions présentes dans le secteur Haldimand par rapport à l'éventuel forage Haldimand n° 4 satisfont aux exigences du projet de règlement du MDDEFP (2013). C'est cependant le MDDEFP lui-même qui a pris la responsabilité de réaliser une caractérisation hydrogéologique conforme aux exigences du projet de règlement. Les exigences du projet de règlement par rapport à la mise en place d'un réseau de puits d'observation étaient déjà respectées dans le cadre des travaux réalisés antérieurement par TechnoRem (2013) pour Pétrolia.

Les mécanismes potentiels d'émission des contaminants dans l'eau souterraine par des activités d'exploration ou de production d'hydrocarbures que nous avons considérés incluent les épanchements de liquide en surface, les fuites à travers la cimentation ou les coffrages des puits pétroliers et la migration des fluides à partir des niveaux exploités jusqu'aux aquifères par des cheminements préférentiels naturels (failles) ou reliés aux opérations pétrolières (anciens puits ou puits actifs). En tant que mode d'émission potentiel, les épanchements de liquide en surface sont les plus susceptibles de se produire. La vulnérabilité moyenne à très élevée de l'aquifère au roc fait en sorte que ces épanchements pourraient avoir une incidence directe sur la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Sans mesures de prévention ou de mitigation, ce mécanisme d'émission pourrait être à l'origine de zones sources de contamination qui pourraient agir à moyen ou long terme (au-delà d'une décennie), particulièrement si le liquide émis est un contaminant organique immiscible comme un hydrocarbure. Considérant la localisation du site du forage Haldimand n° 4, c'est le ruisseau Dean qui serait le milieu récepteur susceptible d'être affecté par ce mécanisme d'émission. Cependant, la migration de contaminants dissous serait retardée par leur diffusion dans

la matrice poreuse de l'aquifère au roc ainsi que par la présence de till d'une épaisseur variant entre 2 et 4 m sous le ruisseau Dean. De plus, des mesures de protection de l'aquifère au roc, telle la mise en place d'une membrane sous le site de forage, permettraient de limiter le risque de contamination de l'aquifère au roc. Une gestion rigoureuse des opérations de transport, de transfert et d'entreposage des fluides contribuerait aussi à la réduction du risque de contamination. Aux sites Haldimand n° 1, n° 2 et n° 4, les puits résidentiels entourant la péninsule d'Haldimand de même que les puits municipaux situés au sud de la rivière St-Jean ne représentent pas des milieux récepteurs potentiels d'émissions qui se produiraient aux sites mêmes de ce forage ou de ces puits. Cependant, si des épanchements se produisaient sur les routes conduisant aux sites de forage, alors certains des puits résidentiels situés au nord de la péninsule pourraient constituer des milieux récepteurs de la contamination. Les autres mécanismes potentiels d'émission de contaminants par les opérations pétrolières ont moins de probabilité de se produire et ont des incidences moindres sur la qualité de l'eau souterraine. Cependant, le fait que certains puits atteignent le réservoir pétrolier Haldimand devrait inciter à une vérification de la qualité des mesures d'abandon et de cimentation des anciens puits prises par le MRN (Foragaz, 1999).

Quel que soit le mécanisme d'émission considéré, si les émissions sont constituées de pétrole provenant du réservoir pétrolier ou de gaz purement thermogénique, la signature chimique de ces hydrocarbures pourra être distinguée de celle des suintements pétroliers et du méthane présent naturellement à Haldimand, de même que de celle des sources de contamination qui pourraient être reliées à des émissions d'essence ou de diesel non liées aux opérations pétrolières.

8. RÉFÉRENCES

- AESCHBACH-HERTIG, W., F. PEETERS, U. BEYERLE ET R. KIPFER. 1999. « Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters ». *Water Resources Research*, vol. 35, n° 9, p. 2779-2792.
- AESCHBACH-HERTIG, W., ET D. K. SOLOMON. 2013. « Noble Gas Thermometry in Groundwater Hydrology ». Dans Burnard, P. (éd.), *The Noble Gases as Geochemical Tracers*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 81-122.
- ADAMS, J.J., ET D. BACHU. 2002. « Equations of state for basin geofluids: algorithm review and intercomparaison for brines ». *Geofluids*, vol. 2, n° 4, p. 257-271.
- ALBERTA ENERGY REGULATOR (AER). 2013. *Directive 083: Hydraulic Fracturing – Subsurface Integrity*. 14 p.
- APPELO, C.A.J., ET D. POSTMA. 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- ARAVENA, R., WASSENAAR, L.I. ET L.N. PLUMMER. 1995. « Estimating ¹⁴C groundwater ages in a methanogenic aquifer ». *Water Resources Research*, vol. 31, n° 9, p. 2307-2317.
- ARRAKIS CONSULTANTS INC. 2010. *Alimentation en eau – Plage Haldimand, Projet A416-06, Rapport A416-06A, Mai 2010*.
- ARRAKIS CONSULTANTS INC. 2011. *Recherche en eau souterraine – Secteur Gaspé Centre, Projet A416-12, Rapport A416-12A, Juillet 2011*.
- BARKER, C. 1990. « Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil and gas in reservoirs ». *AAPG Bulletin*, vol. 74, n° 8, p. 1254-1261.
- BARKER, J. F., ET P. FRITZ. 1981. « The occurrence and origin of methane in some groundwater flow systems ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 18, n° 12, p. 1802-1816.
- BAALOUSHA, H. 2005. « Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip, Palestine ». *Environmental Geology*, vol. 48, p. 889-900.
- BATZLE, M., ET Z. WANG. 1992. « Seismic properties of pore fluids ». *Geophysics*, vol. 57, n° 11, p. 1396-1408.
- BEAUDRY, C. 2013. *Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine. Projet PACES Chaudière-Appalaches*.
- BENOIT, N., D. BLANCHETTE, M. NASTEV, V. CLOUTIER, D. MARCOTTE, M. BRUN KONE ET J. W. MOLSON. « Groundwater Geochemistry of the Lower Chaudière River Watershed, Québec ». *Geohydro 2011*, congrès conjoint de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues (IAH-CNC), de l'Association canadienne pour l'étude du Quaternaire (CANQUA) et de l'Association d'hydrogéophysique du Québec (AHQ) tenu à Québec.
- BERNARD, B. B., J. M. BROOKS ET W. M. SACKETT. 1978. « Light hydrocarbons in recent Texas continental shelf and slope sediments ». *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 83, n° C8, p. 4053-4061.

- BERTRAND, R., ET M. MALO. 2001. « Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation in the Siluro-Devonian rocks of the Gaspé Belt basin, Canada ». *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, n° 2, p. 238-261.
- BLÈS, J. L., ET B. FEUGA. 1981. *La fracturation des roches*. Bureau des recherches géologiques et minières, collection « Manuels et méthodes », n° 1, 121 p.
- BOUCHER, A. 2013. « SGeMS 3.0 source code beta. Geostatistical Libraries and Software ». En ligne. <<https://github.com/ar2tech/ar2tech-SGeMS-public>>.
- BOURQUE, P.-A., D. BRISEBOIS ET M. MALO. 1995. « Ceinture de Gaspé ». Dans *Géologie de l'orogène appalachien-calédonien au Canada et au Groenland*, Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada* n° 6, p. 347-387.
- BOURQUE, P.-A., M. MALO ET D. KIRKWOOD. 2001. « Stratigraphy, tectono-sedimentary evolution and paleogeography of the post-Taconian-pre-Carboniferous Gaspé Belt: an overview ». *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, n° 2, p. 186-201.
- BRISEBOIS, D., ET J. NADEAU. 2003. « Géologie de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent (22A, 22B, 22C, 22G, 22H, 21N et 21O) ». Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, DV 2003-08, échelle 1:250 000.
- BUREAU D'AUDIENCES PUBLIQUES SUR L'ENVIRONNEMENT (BAPE). 2011. *Développement durable de l'industrie des gaz de schiste au Québec*. Rapport 273 d'enquête et d'audience publique, 323 pp.
- CASTRO, M.C. ET P. GOBLET. 2005. « Calculation of Groundwater ages-a Comparative Analysis ». *Ground Water*, vol. 43, n° 3, p. 368-380.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC (CEAEQ). 2014. *Détermination des terres rares dans l'eau : méthode par spectrométrie de masse en tandem et source ionisante au plasma d'argon (ICP-MS-MS), MA. 203 – Mét.T. rares*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 11 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC (CEAEQ). *Détermination du méthane dissous dans l'eau : dosage par purge et piégeage couplé à un chromatographe en phase gazeuse et à un détecteur à ionisation de flamme, MA. 403 – Méthane 1.0*. Édition 2014-02-14.
- CLARK, I. D., ET P. FRITZ. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton (Floride) États-Unis, CRC Press LLC, 328 p.
- CLOUTIER, V., R. LEFEBVRE, R. THERRIEN ET M. SAVARD. 2008. « Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system ». *Journal of Hydrology*, vol. 353 n° 3-4, p. 294-313.
- COMITÉ DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE STRATÉGIQUE SUR LE GAZ DE SCHISTE (CÉES). 2014. *Rapport synthèse – Évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN 978-2-550-69741-1 (PDF), 279 p.

- CORNATON F., PARK, Y.J. ET E. DELEERSNIJDER. 2011. « On the biases affecting water ages inferred from isotopic data ». *Journal of Hydrology*, vol. 410, n° 3-4, p. 217-225.
- CORNATON F. ET P. PERROCHET. 2006. « Groundwater age, life expectancy and transit time distributions in advective-dispersive systems: 1. Generalized reservoir theory ». *Water Resources Research*, vol. 29, n° 9, p. 1267-1291.
- CROTEAU, A. 2006. *Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis*. Thèse de maîtrise, Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement, Québec, 128 p. et 13 annexes.
- CROW, H., M. RAYNAULD, R. LEFEBVRE, E. GLOAGUEN, K. BREWER ET T. CARTWRIGHT. 2014. *Borehole geophysical studies in a sedimentary rock aquifer in Haldimand, Gaspé, Québec*. Commission géologique du Canada, Dossier public 7492, 44 p.
- DAVIS, A. M. 1993. « Shallow gas: an overview ». *Continental Shelf Research*, vol. 12, n° 10, p. 1077-1079.
- DAVIS, J. C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- DE MARSILY, G. 1986. *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, San Diego (Californie), États-Unis, 440 p.
- DESBIENS, S. 1990. *La formation de York River de la région de Gaspé : un complexe deltaïque*. Commission géologique du Canada, Québec, Dossier public 2235, p. 21-22.
- DEPARTMENT OF ENERGY (DOI). 2001. *Technical measures for the investigation and mitigation of fugitive methane hazards in areas of coal mining*. US Department of the Interior, Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement, Pittsburgh.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2014. « Données météorologiques, Station Gaspé A ». En ligne. <http://climate.weather.gc.ca/climateData/monthlydata_f.html?timeframe=3&Prov=QUE&StationID=5794&dlyRange=1968-05-01|2013-03-13&cmdB1=Go&Month=10&Year=2012&Day=1>. Consulté en janvier 2014.
- ETCHEVERRY, D. 2001. *Une approche déterministe des distributions des temps de transit de l'eau souterraine par la théorie des réservoirs*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Suisse, 116 p.
- FORAGAZ INC. 1999. *Rapport de fermeture définitive de 22 puits orphelins de la Gaspésie*. Travaux effectués pour le compte du ministère des Ressources naturelles, 67 p.
- FRITZ, P. 1997. « Saline groundwater and brines in crystalline rocks : the contributions of John Andrews and Jean-Charles Fontes to the solution of a hydrogeological and geochemical problem ». *Applied Geochemistry*, vol. 12, n° 6, p. 851-856.
- GASSIAT, C., T. GLEESON, R. LEFEBVRE ET J. MCKENZIE. 2013. « Hydraulic fracturing in faulted sedimentary basins: Numerical simulation of potential contamination of shallow aquifers over long time scales ». *Water Resources Research*, vol. 49, n° 12, p. 8310-8327.

- GELHAR, L. W., C. WELTY ET K. R. REHFELDT. 1992. « A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers ». *Water Resources Research*, vol. 28, n° 7, p. 1955-1974.
- GOODE, D. J. 1996. « Direct Simulation of Groundwater Age ». *Water Resources Research*, vol. 32, n° 2, p. 289-296.
- GOODMAN, R. E. 1993. *Engineering geology: rock in engineering construction*. New York, John Wiley & Sons, 412 p.
- GORODY, A. W. 2012. « Factors affecting the variability of stray gas concentration and composition in groundwater ». *Environmental Geosciences*, vol. 19, n° 1, p. 17-31.
- HÄRDLE, W. ET L. SIMAR. 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 458 p.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2006. *Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A guidebook*. STI/PUB/1238.
- JACKSON, R. E., A. W. GORODY, B. MAYER, J. W. ROY, M. C. RYAN ET D. R. VAN STEMPVOORT. 2013. « Groundwater protection and unconventional gas extraction: The critical need for field-based hydrogeological research ». *Ground Water*, vol. 51, n° 4, p. 488-510.
- JIANG, X. W., L. WAN, S. GE, G. L. CAO, G. C. HOU, F. S. HU, X. S. WANG, H. LI ET S. H. LIANG. 2012. « A quantitative study on accumulation of age mass around stagnation points in nested flow systems ». *Water Resources Research*, vol. 48, n° 12.
- JOLLIFFE, I. T. 2002. *Principal Component Analysis*. Springer, New York, 489 p.
- KAZEMI, G. A., J. H. LEHR ET P. PERROCHET. 2006. *Groundwater Age*. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 325 pp.
- KIRKWOOD, D. 1999. « Palinspastic restoration of a post-Taconian successor basin deformed within a transpressive regime, northern Appalachians ». *Tectonics*, vol. 18, n° 6, p. 1027-1040.
- KISSINGER, A., R. HELMIG, A. EBIGBO, H. CLASS, T. LANGE, M. SAUTER, M. HEITFELD, J. KLUNER ET W. JAHNKE. 2013. « Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system, part 2. Modelling the transport of fracturing fluids, brine and methane ». *Environmental Earth Sciences*, vol. 70, n° 8, p. 3855-3873.
- LAFORÉST NOVAQUA (LNA). 2008. « Well characterization program, Gaspé, Québec ». N° dossier 08-5937-952.
- LANGE, T., M. SAUTER, M. HEITFELD, K. SCHETELIG, K. BROSIG, W. JAHNKE, A. KISSINGER, R. HELMIG, A. EBIGBO ET H. CLASS. 2013. « Hydraulic fracturing in unconventional gas reservoirs: risks in the geological system, part 1. *Environmental Earth Sciences*, vol. 70, n° 8, p. 3839-3853.
- LAVOIE, D., ET P.-A. BOURQUE. 2001. « The history of hydrocarbon exploration in the Silurian-Devonian Gaspé Belt: 100 years of modest success ». *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, n° 2, p. 180-185.

- LAVOIE, D., C. RIVARD, R. LEFEBVRE, S. SÉJOURNÉ, R. THÉRIAULT, M.-J. DUCHESNE, J. AHAD, B. WANG, N. BENOIT ET C. LAMONTAGNE. 2014. « The Utica Shale and gas play in southern Quebec: Geological and hydrogeological synthesis and methodological approaches to groundwater risk evaluation ». *International Journal of Coal Geology (IJCG)*, vol. 126 (2014), p. 77-91.
- LEFEBVRE, R., I. MALTAIS, D. PARADIS ET Y. MICHAUD. 2011. « Recharge assessment from daily soil moisture balance and well hydrographs, Portneuf unconfined aquifer, Canada ». *Geohydro 2011*, congrès conjoint de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues (IAH-CNC), de l'Association canadienne pour l'étude du Quaternaire (CANQUA) et de l'Association d'hydrogéophysique du Québec (AHQ) tenu à Québec, du 28 au 31 août 2011, 8 p.
- LICHTNER, P. C., S. KELKAR ET B. ROBINSON. 2002. « New form of dispersion tensor for axisymmetric porous media with implementation in particle tracking ». *Water Resources Research*, vol. 38, n° 8, p. 21-1 à 21-16.
- LOGAN, W. E. 1863. *Geology of Canada*. Report of progress from its commencement to 1863, Commission géologique du Canada, 983 p.
- MALO, M. 2001. « Late Silurian-Early Devonian tectono-sedimentary history of the Gaspé Belt in the Gaspé Peninsula: from a tectonothermal Salinic basin to an Acadian foreland basin ». *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 49, n° 2, p. 202-216.
- MALO, M., ET P.-A. BOURQUE. 1993. « Timing of the deformation events from Late Ordovician to Mid-Devonian in the Gaspé Peninsula ». *Geological Society of America Special Papers*, vol. 275, p. 101-122.
- MALO, M., A. TREMBLAY ET D. KIRKWOOD. 1995. « Along-strike Acadian structural variations in the Québec Appalachians: Consequence of a collision along an irregular margin ». *Tectonics*, vol. 5, n° 14, p. 1327-1338.
- MALOSZEWSKI, P. 2000. « Lumped parameter models as a tool for determining the hydrological parameters of some groundwater systems based on isotope data ». *TraM'2000*, IAHS Press, Liège, Belgique, p. 271-276.
- MCCALLUM, J. L., N. B. ENGDahl, T. R. GINN ET P. G. COOK. 2014. « Non-parametric estimation of groundwater residence time distributions: What can environmental tracer data tell us about groundwater residence time? ». *Water Resources Research*, vol 50, n° 3, p. 2022-2038.
- MILLIGAN, G. W., ET M. C. COOPER. 1988. « A study of standardization of variables in cluster analysis ». *Journal of Classification*, vol. 5, n° 2, p. 181-204.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS DU QUÉBEC (MDDEFP). 2013. « Projet de règlement – Avis dans la *Gazette officielle du Québec* du 29 mai 2013 ».
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS DU QUÉBEC (MDDEFP). 2012a. « Système d'information hydrogéologique (SIH) ». En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih>>. Consulté en septembre 2012.

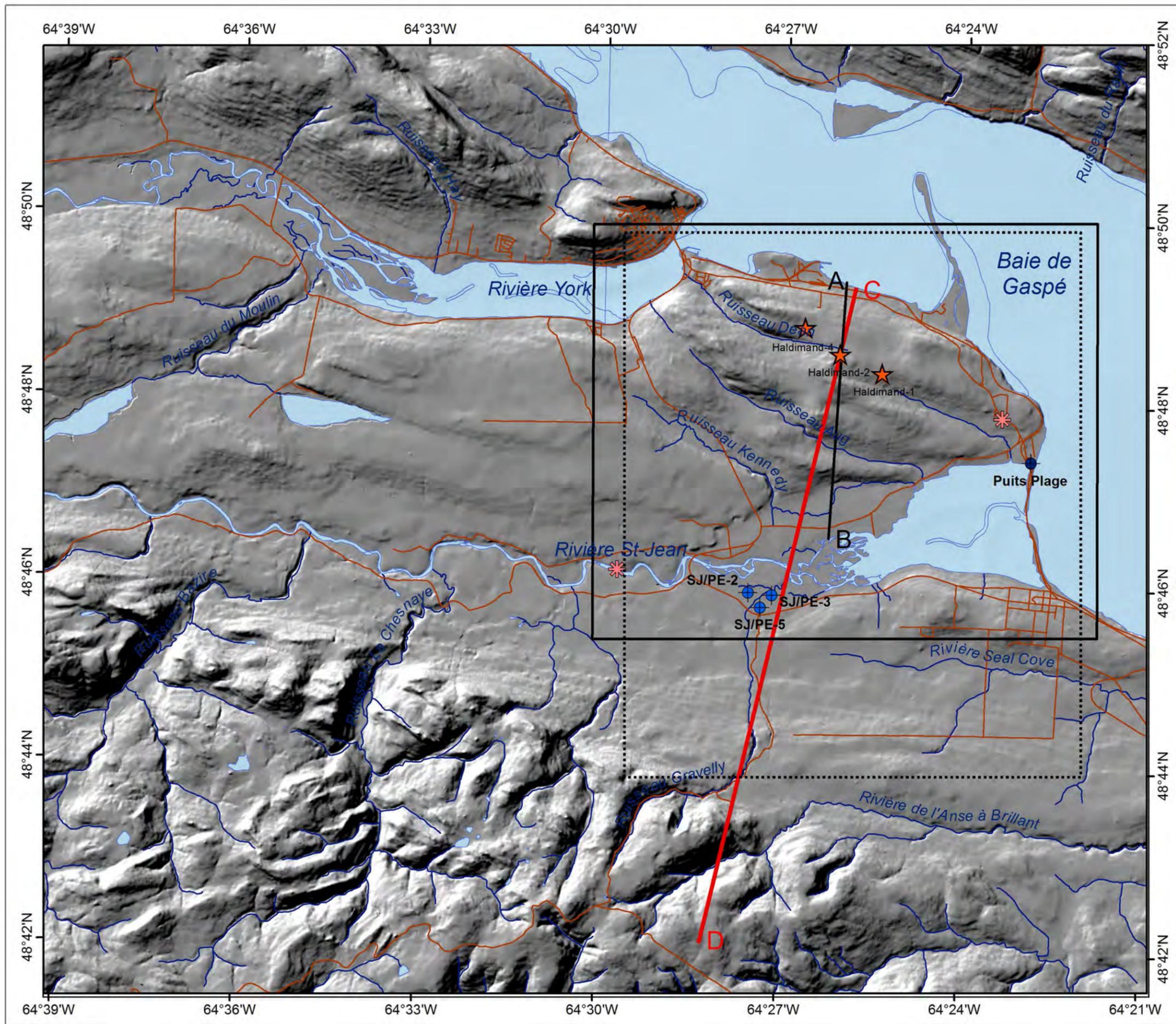
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA FAUNE ET DES PARCS DU QUÉBEC (MDDEFP). 2012b. *Guide d'interprétation du Règlement sur la qualité de l'eau potable*. Gouvernement du Québec, Direction des politiques de l'eau, 144 p. En ligne. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/reglement/guide_interpretation_RQEP.pdf>. Consulté en mai 2013.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (MRN). 1994. « Projet de fermeture sécuritaire des puits-Région de la Gaspésie. Phase 1. »
- MOLSON, J. W., ET E. O. FRIND. 2014. *SALTFLOW User Guide, Density-dependent flow and mass transport model in three dimensions*. Université Laval, 84 p.
- MOHSEN, M. S., ET V. P. SINGH. 1990. « A note on saltwater intrusion in coastal aquifers ». *Water Resources Management*, vol. 4, n° 2, p. 123-134.
- MCGERRIGLE, H. W. 1950. *La géologie de l'est de Gaspé*. Ministère des mines, Rapport géologique 35, 168 p.
- NOWAMOOZ, A., J.-M. LEMIEUX ET R. THERRIEN. 2013. *Modélisation numérique de la migration du méthane dans les Basses-Terres du Saint-Laurent*. Université Laval, Étude E3-10 soumise au Fonds de recherche Nature et technologies et au Comité de l'évaluation environnementale stratégique sur les gaz de schiste, 115 p.
- PANKOW, J. F., ET J. A. CHERRY. 1996. *Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater: history, behavior, and remediation*. Waterloo Press, Portland (Oregon), États-Unis, 522 p.
- PARKHURST, D. L., ET C. A. J. APPELO. 2013. « Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations ». U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p. En ligne seulement. <<http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>>.
- PARKHURST, D. L., ET C. A. J. APPELO. 1999. *User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 p. En ligne seulement. <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/wri994259>>.
- PARKS, W. A. 1929. *Report on the oil and gas resources of the Province of Quebec*. Bureau des mines du Québec, Rapport annuel, partie B, p. 7-56.
- PÉTROLIA. 2012a. « Communiqué de presse du 6 février 2012 ». En ligne. <<http://haldimand.petrolia-inc.com/imports/medias/haldimand/2012-02-06-commpr-augmentation-production-haldimand1-fr.pdf>>. Consulté le 6 février 2014.
- PÉTROLIA. 2012b. *Projet Haldimand – Le pétrole d'ici. Par des gens d'ici. Pour ici*. En ligne. <<http://www.petroliagaz.com/imports/medias/pdf/2013-01-31-depliant-fr.pdf>>. Consulté en novembre 2013.
- PINET, N., D. LAVOIE, P. BROUILLETTE, D.J. DION, P. KEATING, D. BRISEBOIS, M. MALOET S. CASTONGUAY. 2005. *Gravity and aeromagnetic atlas of the Gaspé Peninsula*. Commission géologique du Canada, Dossier public 5020.

- PINTI, D. L., Y. GÉLINAS, M. LAROCQUE, D. BARNETCHE, S. RETAILLEAU, A. MORITZ, J.-F. HÉLIE ET R. LEFEBVRE. 2013. *Concentrations, sources et mécanismes de migration préférentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses-Terres du Saint-Laurent – Volet géochimie*. Étude E3-9, FQRNT ISI n° 171083, Université du Québec à Montréal, Université Concordia, INRS-ETE, 94 p.
- PLUMMER, L. N., ET E. BUSENBERG. 1999. « Chlorofluorocarbons ». Dans Cook, P. G., et A. L. Herczeg (éd.), *Environmental tracers in subsurface hydrology*. p. 441-478.
- PRIEST, S. D., 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Londres, Chapman & Hall, 473 p.
- RAMSAY, J. G., ET M. I. HUBER. 1983. *The techniques of modern structural geology*. Londres, Academic Press, 307 p.
- RIVARD, C., D. LAVOIE, R. LEFEBVRE, S. SÉJOURNÉ, C. LAMONTAGNE, E. G. JOHNSON ET M. J. DUCHESNE. 2014. « An overview of Canadian shale gas production and environmental concerns ». *International Journal of Coal Geology (IJCG)*, vol. 126 (2014), p. 64-76.
- RÖLLER, K., ET C. TREPMMANN. 2013. *Stereo32*. Bochum, Allemagne, Institut für Geologie – Ruhr-Universität Bochum.
- ROY, S. 2008. *Maturation thermique et potentiel pétrolière de la Ceinture de Gaspé, Gaspésie, Québec, Canada*. Thèse doctorale, INRS-ETE, 473 p.
- ROZANSKI, K., L. ARAGUÁS-ARAGUÁS ET R. GONFIANTINI. 1993. « Isotopic patterns in modern global precipitation ». Dans Swart, P. K., K. C. Lohmann, J. McKenzie et S. Savin (éd.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*, vol. 78, p. 1-36.
- SANTÉ CANADA, 2012. « Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada – Tableau sommaire ». Santé Canada, Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Ottawa, Ontario, 24 p. En ligne. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/2012-sum_guide-res_recom-fra.pdf>. Consulté en avril 2014.
- SCHOELL, M. 1980. « The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins ». *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol. 44, n° 5, p. 649-661.
- SCHOELL, M., 1983. « Genetic Characterization of Natural Gases ». *AAPG Bulletin*, vol. 67, n° 12, p. 2225-2238.
- SCHOELL, M. 1988. « Multiple origins of methane in the Earth ». *Chemical Geology*, vol. 71, no 1-3, p. 1-10.
- SCHOT, P. P., ET J. VAN DER WAL. 1992. « Human impact on regional groundwater composition through intervention in natural flow patterns and changes in land use ». *Journal of Hydrology*, vol. 134, p. 297-313.
- SCHULZE-MAKUCH, D. 2005. « Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior ». *Ground Water*, vol. 43, n° 3, p. 443-456.

- SCHUMACHER, D. 2000. « Surface geochemical exploration for oil and gas: New life for an old technology ». *The Leading Edge*, vol. 19, n° 3, p. 258-261.
- SHALIZI, C. R. 2014 (en impression). *Advanced data analysis from an elementary point of view*. Cambridge University Press, 586 p.
- SIKANDER, A. H. 1975. « Occurrence of oil in the Devonian rocks of eastern Gaspé, Québec ». *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 23, n° 2, p. 278-294.
- SOEDER, D. J., S. SHARMA, N. PEKNEY, L. HOPKINSON, R. DILMORE, B. KUTCHKO, B. STEWART, K. CARTER, A. HAKALA ET R. CAPO. 2014. « An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States ». *International Journal of Coal Geology (IJCG)*, vol. 126 (2014), p. 4-19.
- ST-JULIEN, P., ET C. HUBERT. 1975. « Evolution of the Taconian Orogen in the Quebec Appalachians ». *American Journal of Science*, vol. 275-A, p. 337-362.
- STONE, P. H., ET J. H. CARLSON. 1979. « Atmospheric Lapse Rate Regimes and Their Parameterization ». *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 36, p. 415-423.
- TARDIF, R. 2012. « Évaluation de fiches signalétiques concernant des additifs de forage (Évaluation des dangers) ». Rapport soumis à Petrolia, 29 p.
- TAYLOR, S. W., B. SHERWOOD LOLLAR ET I. WASSENAAR. 2000. « Bacteriogenic ethane in near-surface aquifers: Implications for leaking hydrocarbon well bores ». *Environmental Science & Technology*, vol. 34, n° 22, p. 4727-4732.
- TECHNOREM INC. 2013. *Caractérisation hydrogéologique des secteurs Haldimand et Tar Point, Gaspé, Québec, Phase I*. Rapport final, Réf. : PR11-92, 121 p. + tableaux, figures et annexes.
- TERZAGHI, R. D. 1965. « Sources of errors in joint surveys ». *Geotechnique*, vol. 15, p. 287-304.
- TÔTH, J. 1999. « Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations ». *Hydrogeology Journal*, vol. 7, no 1, p. 1-14.
- US EPA. 2012. *Study of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources: Progress Report*. EPA 601/R-12/011, 262 p. En ligne. <www.epa.gov/hfstudy>.
- USGS. 2014. « The Reston Chlorofluorocarbon Laboratory ». En ligne. <http://water.usgs.gov/%20lab/software/air_curve/>. Consulté le 27 mars 2014.
- VEILLETTE, J. J., ET M. CLOUTIER. 1993. « Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec ». Commission géologique du Canada, Carte 1804A, échelle 1:250 000.
- WATSON, T. 2013. « Alberta regulations: Wellbore integrity issues driving regulatory change ». North American Wellbore Integrity Workshop, tenu les 16 et 17 octobre 2013 à Denver (Colorado), aux États-Unis.
- WHITICAR, M. J. 1999. « Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane ». *Chemical Geology*, vol. 161, no 1-3, p. 291-314.

- WILLIAMS, H. 1979. « Appalachian Orogen in Canada ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 16, p. 792-807.
- WINSTON, R. B. 2000. « GW_Chart Piper Graph (Version 1.25.3.0). Graphical User Interface for MODFLOW, Version 4 ». U.S. Geological Survey Open File Report 00-315, 27 p. En ligne. <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/GW_Chart/GW_Chart.html>.
- Zoback, M. D. 2010. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 461 p.
- ZUBER, A., K. ROZANSKI, J. KANIS ET R. PURTSCHERT. 2010. « On some methodological problems in the use of environmental tracers to estimate hydrogeologic parameters and to calibrate flow and transport models ». *Hydrogeology Journal*, vol. 19, n° 1, p. 53-69.

CARTES



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

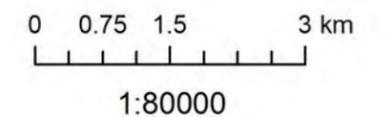
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

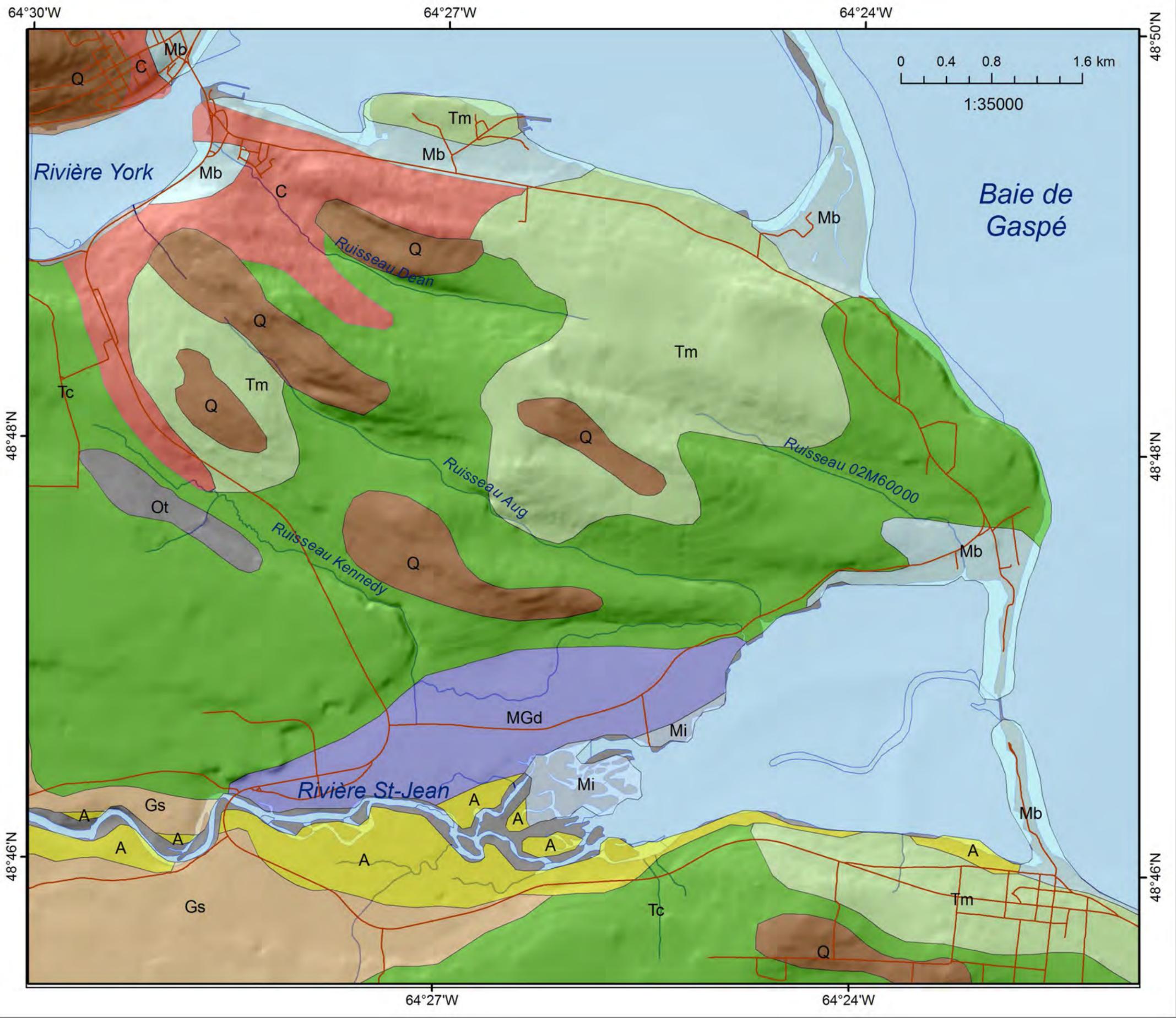
Carte 1

Localisation de la région d'étude

Modèle numérique de terrain utilisé
en fond de carte

- Routes
- Cours d'eau
- Cadre pour la figure des aires d'alimentation
- Région d'étude
- Puits d'alimentation forages pétroliers
- Futurs puits d'alimentation de Gaspé
- Puits municipal - Plage
- Prélèvement d'eau municipal
- Coupe AB - Modèle conceptuel hydrogéologique
- Coupe CD - Coupe 2D modélisée





**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

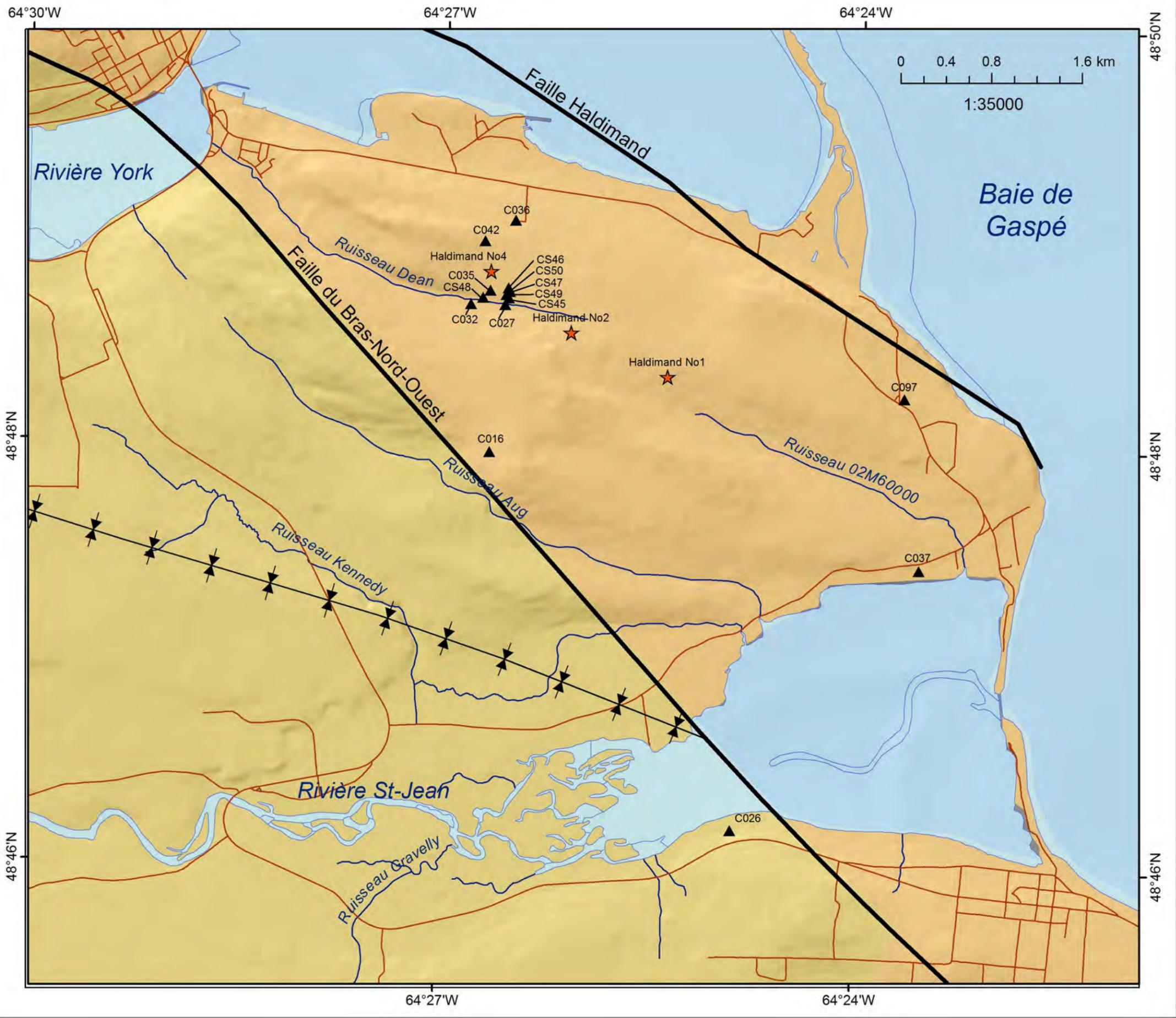
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 2

Géologie du quaternaire
(Veillette et Cloutier, 1993)

- C - Dépôts de versant non différenciés
- Ot - Sédiments de tourbières
- A - Alluvions non différenciées
- Mi - Sédiments intertidaux
- Mb - Sédiments littoraux
- MGd - Sédiments deltaïques et prodeltaïques
- Gs - Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique
- Tc - Till en couverture généralement continue
- Tm - Till en couverture mince et discontinue
- Q - Roc altéré



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 3

Géologie du roc (Brisebois et al., 1991)

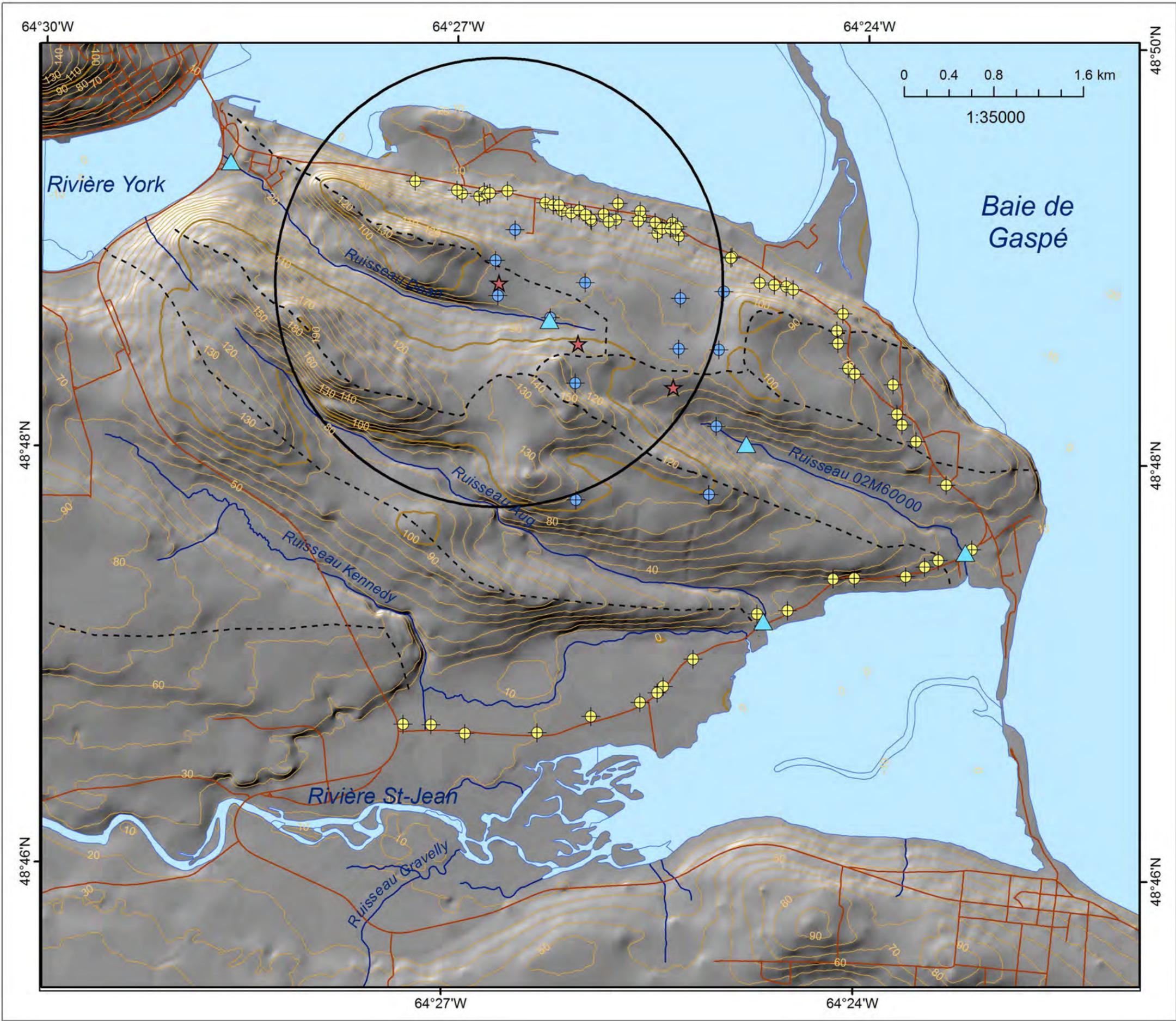
- ★ Sites de forage pétrolier Pétrolia
- ▲ Anciens forages pétroliers (SIGPEG, Pétrolia)

Linéaments

- ▲ Trace axiale d'une synforme, position certaine
- Faille du Bras-Nord-Ouest (Brisebois et al., 2001)
- Faille Haldimand (Pinet et al., 2005)

Formation géologique

- Formation de Battery Point
- Formation de York River



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

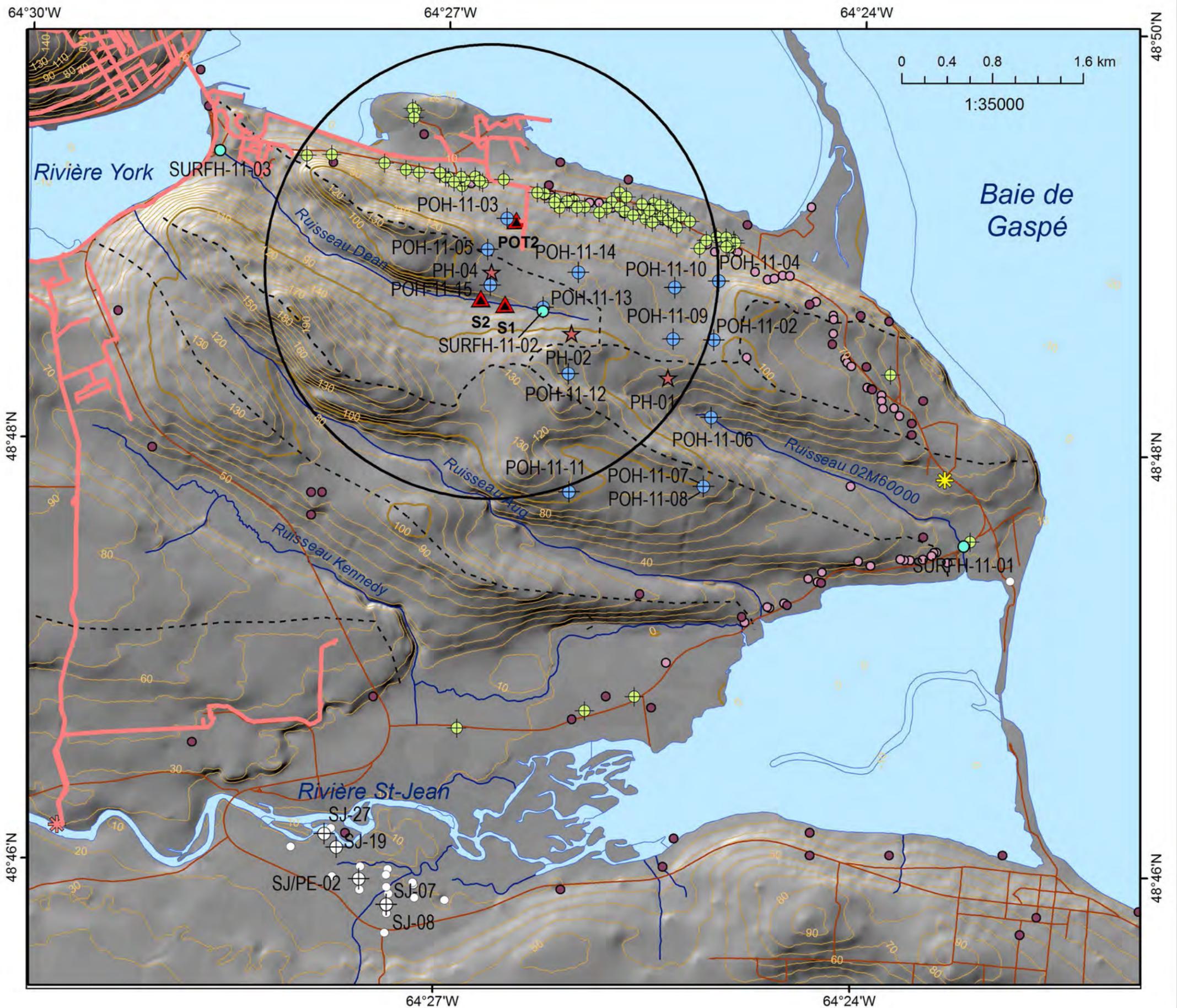
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 4

Localisation des sites d'échantillonnage
de TechnoRem (2013)

Modèle numérique de terrain utilisé
en fond de carte

- Rayon de 2 km du PH-04
- Sites échantillonnés - TechnoRem (2012)**
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- ▲ Eau de surface
- ⊕ Puits d'observation foré
- ⊕ Puits résidentiel
- Topographie**
- Contour élévation au 100 m
- Contour élévation au 10 m
- Ligne de partage des eaux



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

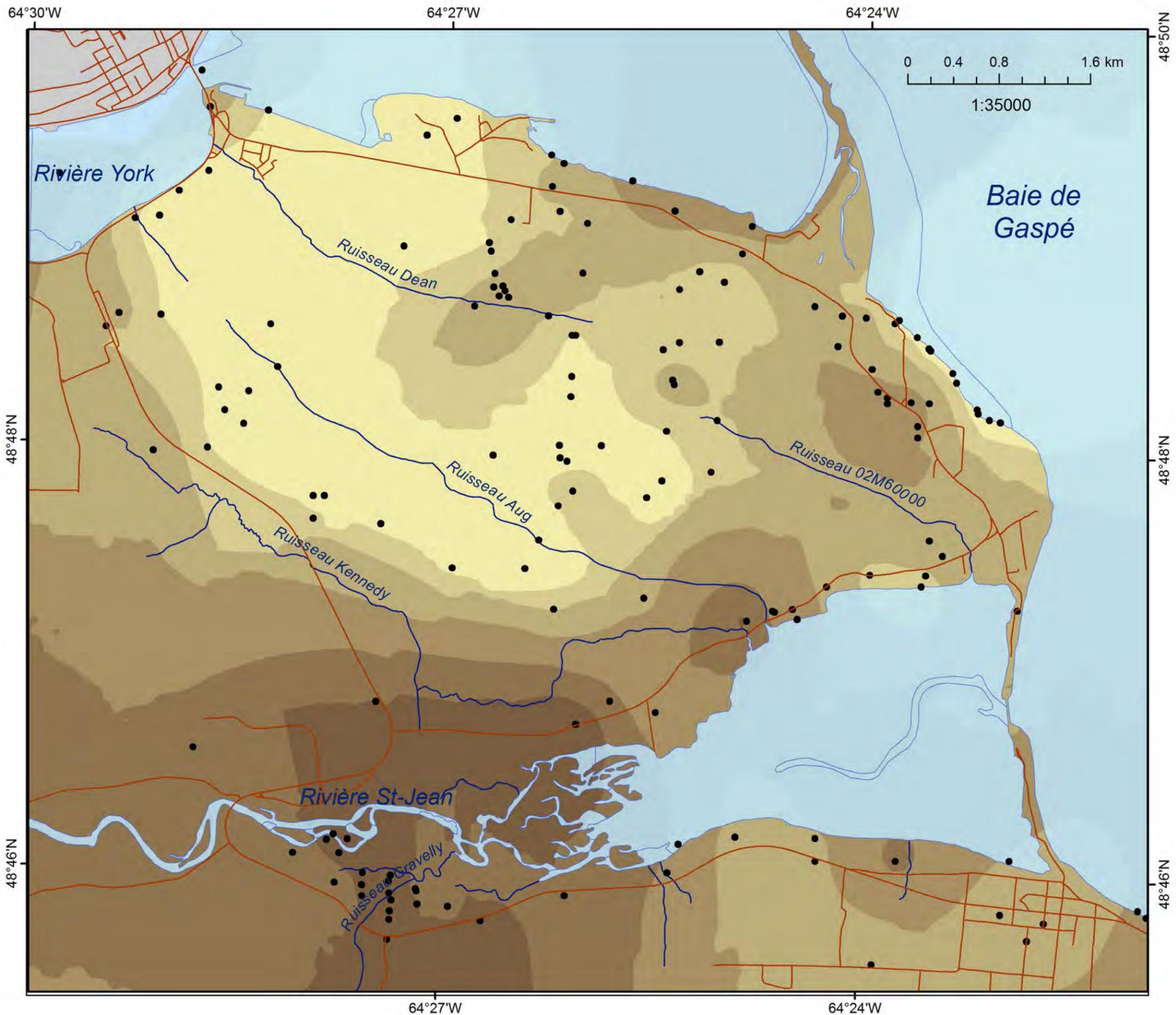
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 5

Localisation des sites d'échantillonnage
du MDDEFP 2013

Modèle numérique de terrain utilisé
en fond de carte

- Rayon de 2 km du PH-04
- Réseau d'aqueduc
- Prélèvements d'eau - Ville de Gaspé**
- ✱ Prise d'eau actuelle (Eau de surface)
- ✱ Terrain de jeu Haldimand (Puits tubulaire)
- Sites échantillonnés**
- ⊕ Puits d'observation
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- ⊕ Puits et piézomètres municipaux
- ⊕ Puits résidentiel
- Eau de surface
- Sites non échantillonnés**
- Puits et piézomètres municipaux (Arrakis, 2011)
- Puits résidentiels (LNA, 2008)
- Données SIH
- ▲ Suintements échantillonnés
- - Ligne de partage des eaux
- Topographie**
- Contour élévation au 100 m
- Contour élévation au 10 m



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

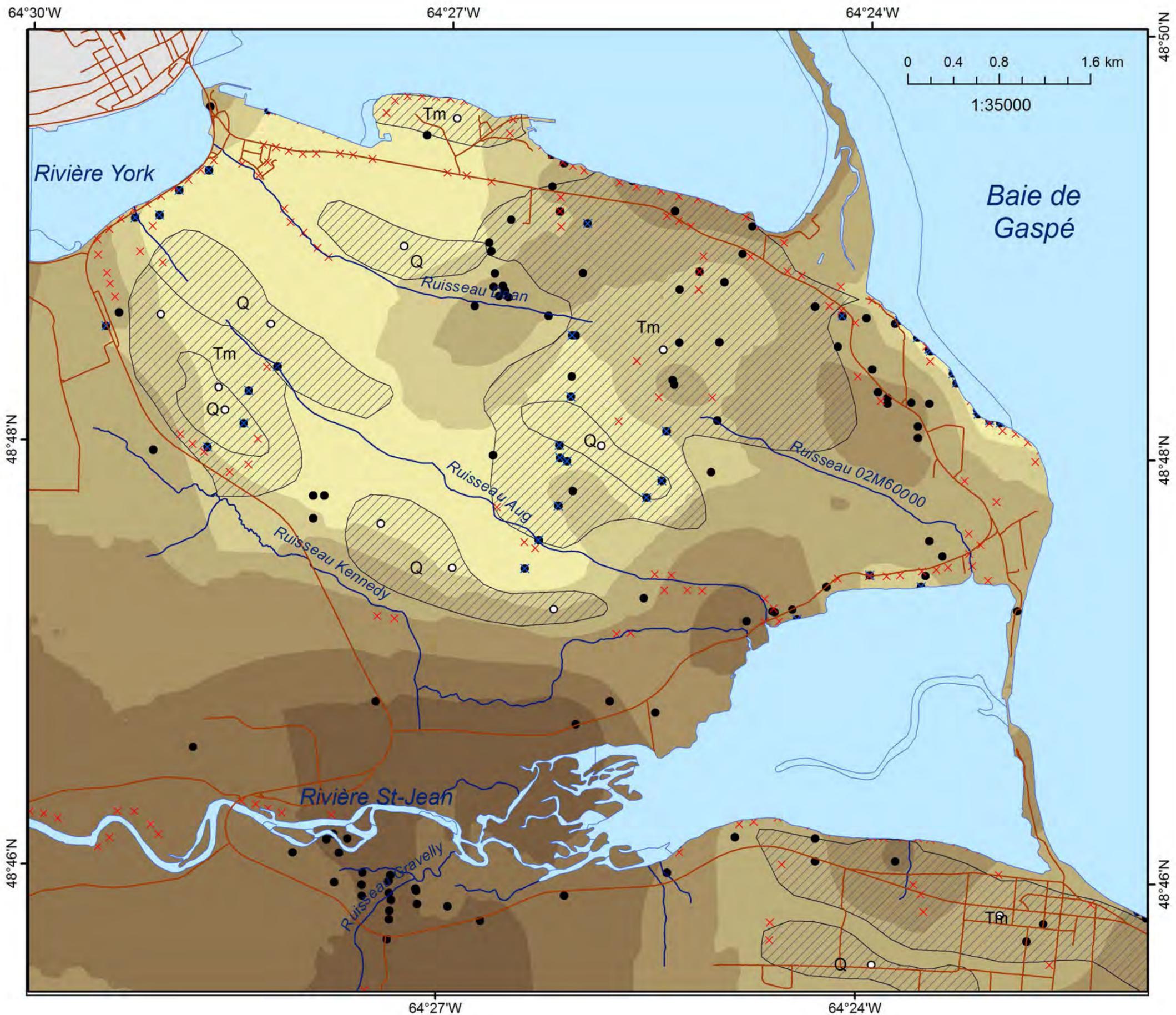
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 6

Épaisseur des dépôts quaternaires

- Routes
 - Données utilisées
- Épaisseur (m)**
- 0 - 1
 - 1 - 2
 - 2 - 4
 - 4 - 7
 - 7 - 10
 - 10 - 20
 - >20

La carte des épaisseurs a été interpolée par un krigeage ordinaire sur les données de profondeur au roc. Les données utilisées pour le krigeage sont représentées sur la carte. La validation croisée indique une incertitude de 3 m.



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

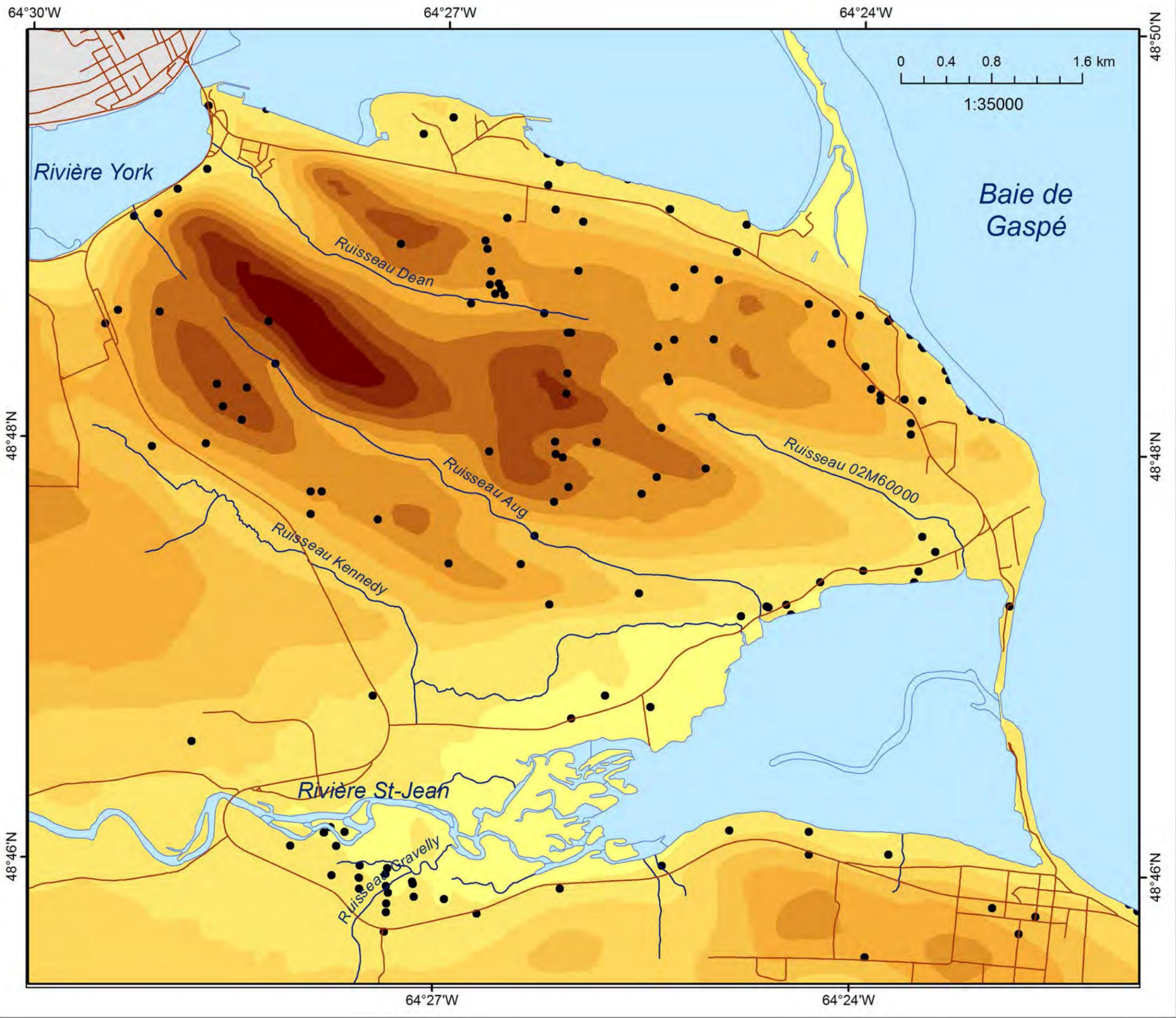
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 7

Contrôles sur les épaisseurs

- Routes
- Données utilisées pour le krigeage**
 - Données Quaternaire Attribuées
 - Données forage
- Données de contrôle**
 - × Affleurements McGerrigle (1950)
 - × Affleurements Brisebois (2011)
 - ▨ Dépôts quaternaires minces (< 1 m)
- Épaisseur (m)**
 - 0 - 1
 - 1 - 2
 - 2 - 4
 - 4 - 7
 - 7 - 10
 - 10 - 20
 - >20

Un contrôle de la carte des épaisseurs krigées a été réalisé en comparant les données d'affleurements disponibles et les zones de dépôts minces tirées de la carte de la géologie du quaternaire.



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 8

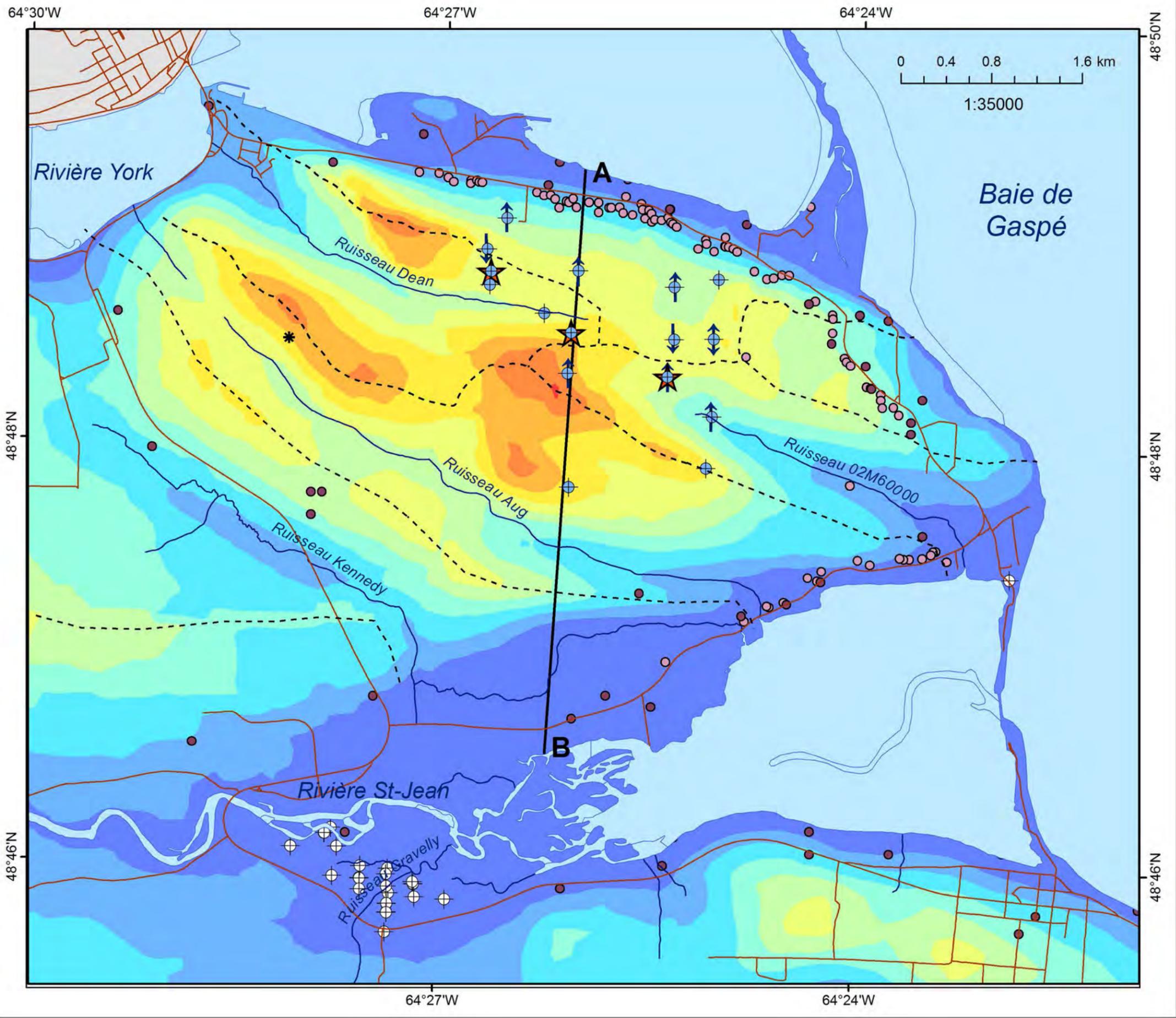
Élévation de la surface du roc

- Routes
- Données utilisées

Élévation (m)

< 0
0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100
100 - 120
120 - 140
140 - 160
> 160

La carte de l'élévation du roc a été réalisée à partir de la soustraction de la topographie du terrain donné par le MNT et de l'épaisseur des dépôts quaternaires.



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 9

Piézométrie de l'aquifère au roc

- Coupe AB - Modèle conceptuel hydrogéologique
- - Ligne de partage des eaux souterraines

Données utilisées

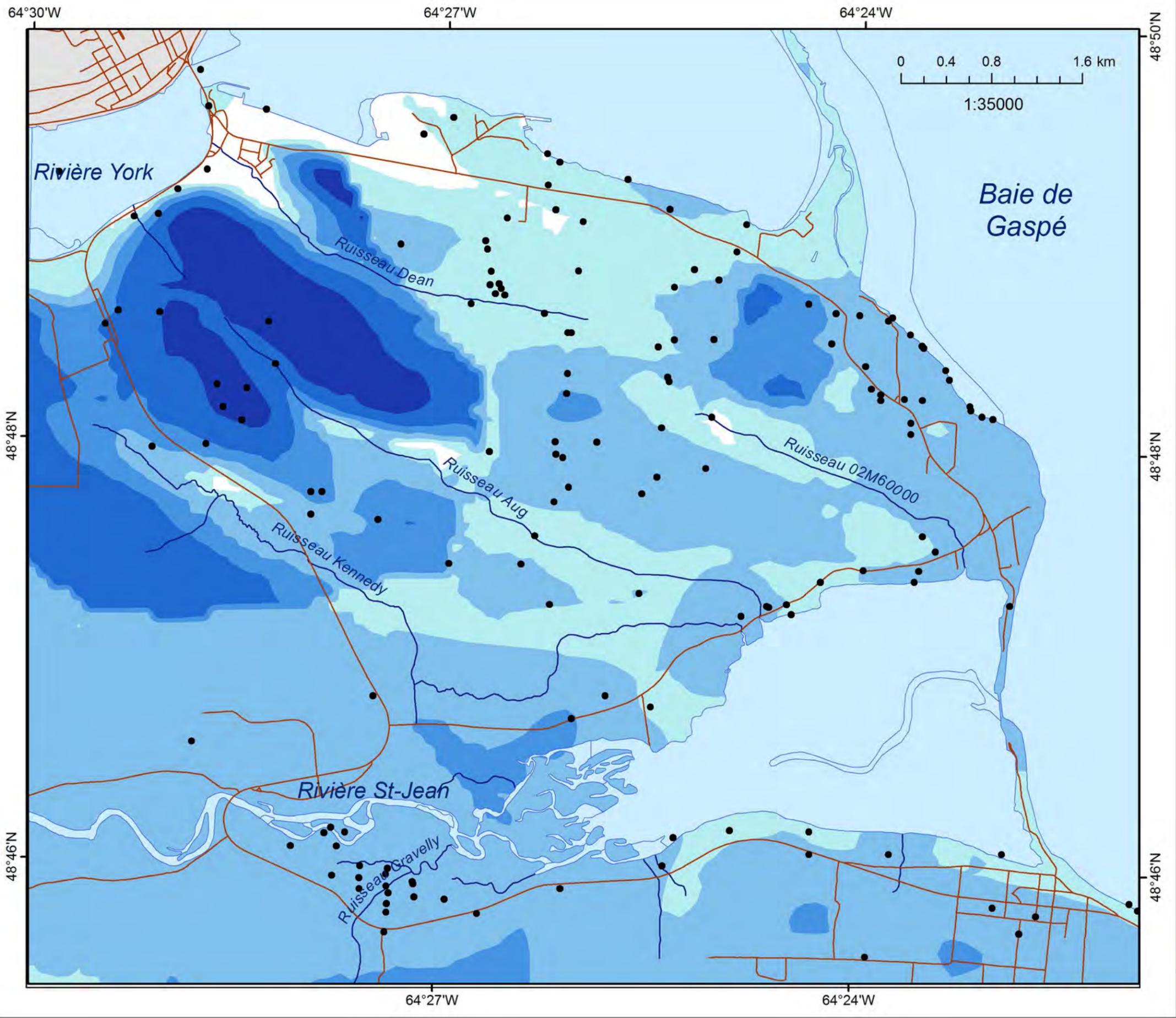
- ⊕ Puits d'observation (Septembre 2013)
- ⊕ Puits municipaux (Arrakis, 2011)
- Puits résidentiels (LNA, 2008)
- Données SIH
- * Contrainte fixée
- ★ Sites de forage pétrolier Pétrolia

**Écoulement vertical dans les puits
(mesuré par débitmètre)**

- ↓ Vers le bas
- ↑ Vers le haut
- ↕ Haut/Bas

Piézométrie (m NMM)

- 0 - 15
- 15 - 30
- 30 - 45
- 45 - 60
- 60 - 75
- 75 - 90
- 90 - 105
- 105 - 120
- 120 - 135
- 135 - 150



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

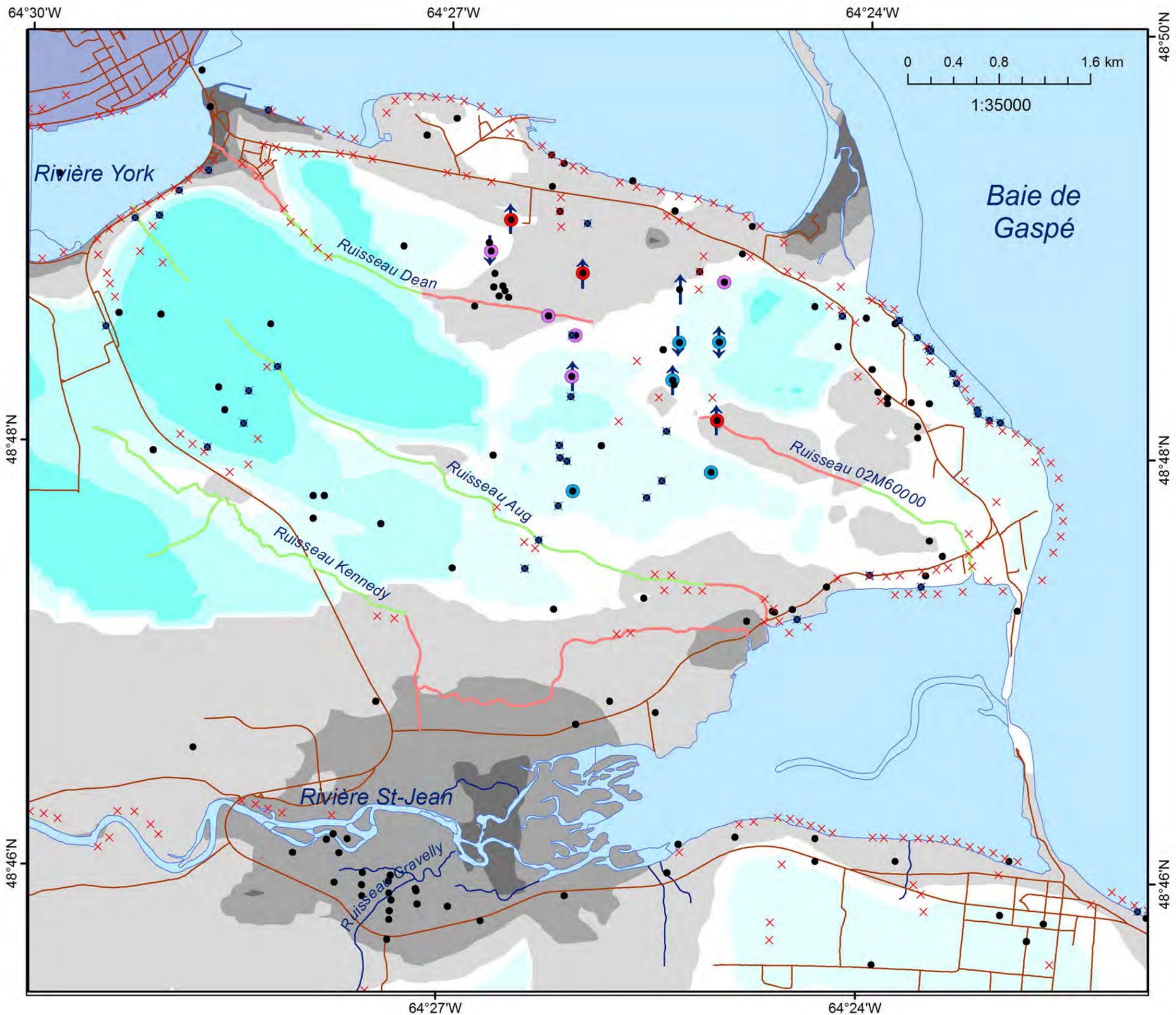
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 10

Profondeur de la nappe

- Données utilisées
- Profondeur (m)**
- 0 - 2
 - 2 - 6
 - 6 - 12
 - 12 - 20
 - 20 - 35
 - >35

La profondeur de la nappe a été obtenue par soustraction de la piézométrie à la topographie du terrain donnée par le MNT pour les zones en condition de nappe libre. Dans les zones en condition captives, l'élévation du roc a été soustraite à la topographie du terrain.



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

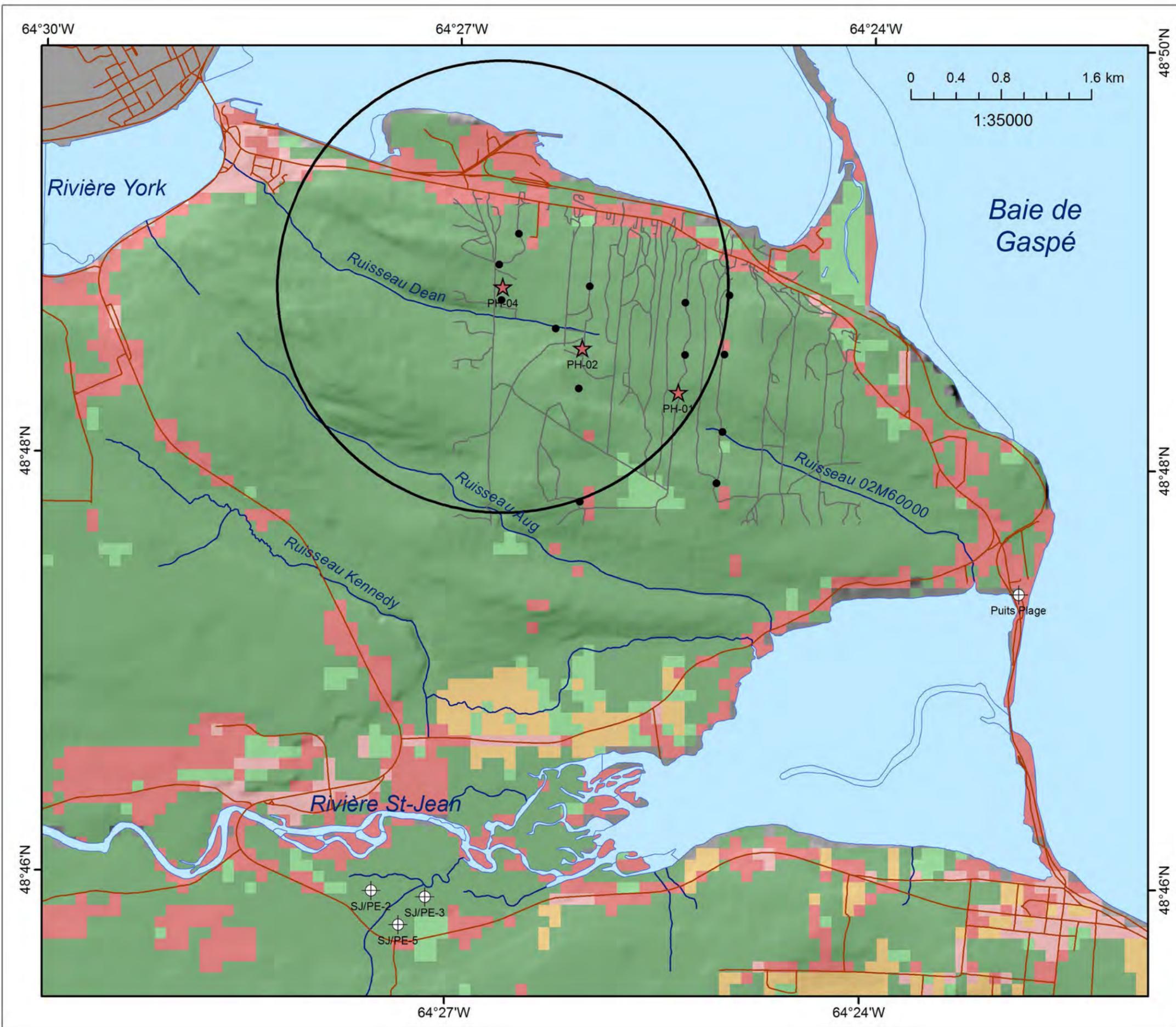
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 11

**Conditions de confinement
de l'aquifère au roc**

- Données utilisées
- × Affleurements McGerrigle (1950)
- × Affleurements Brisebois (2011)
- Condition de la nappe**
- Captive
- Semi-captive
- Libre
- Lien hydraulique avec l'aquifère**
- Lien diffus
- Lien direct
- Écoulement vertical dans les puits
(mesuré par débitmètre)**
- ↓ Vers le bas
- ↑ Vers le haut
- ↕ Haut/Bas
- Confinement (m)**
- -20 - -10
- -10 - -5
- -5 - 2.5
- 2.5 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- >20
- Conditions captives
- Conditions libres
Zones de recharge

La carte de confinement au roc a été obtenue par une soustraction de la carte de l'élévation du roc à la carte de la piézométrie au roc.



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

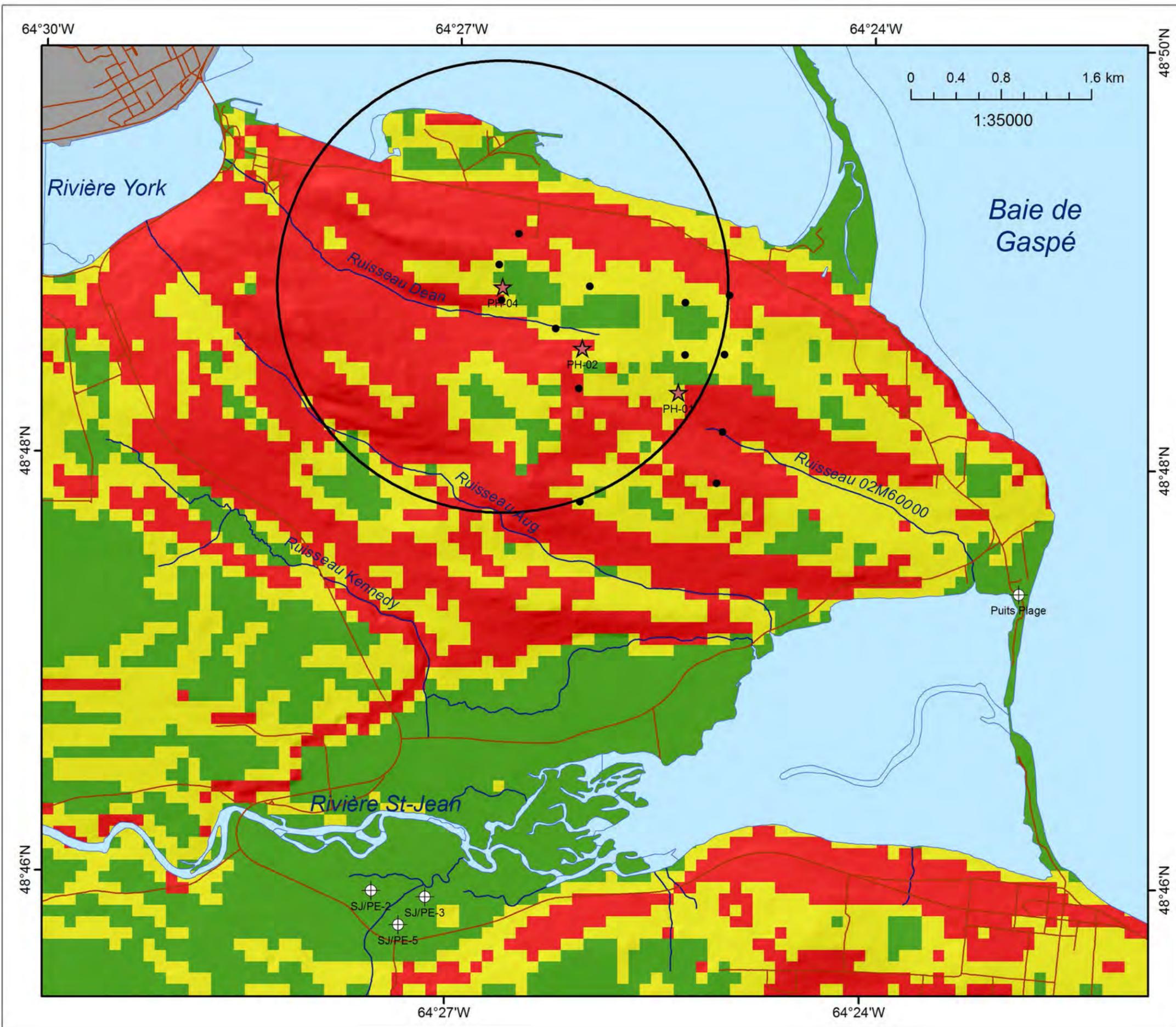
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 12

Utilisation du sol
(Carte de couverture du sol, Géobase, 2009)
Pour le calcul du coefficient de ruissellement
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
 - ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - Routes
 - Chemins forestiers
- Utilisation du sol**
- Culture intensive
 - Culture extensive
 - Boisé
 - Urbain peu dense
 - Urbain dense



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

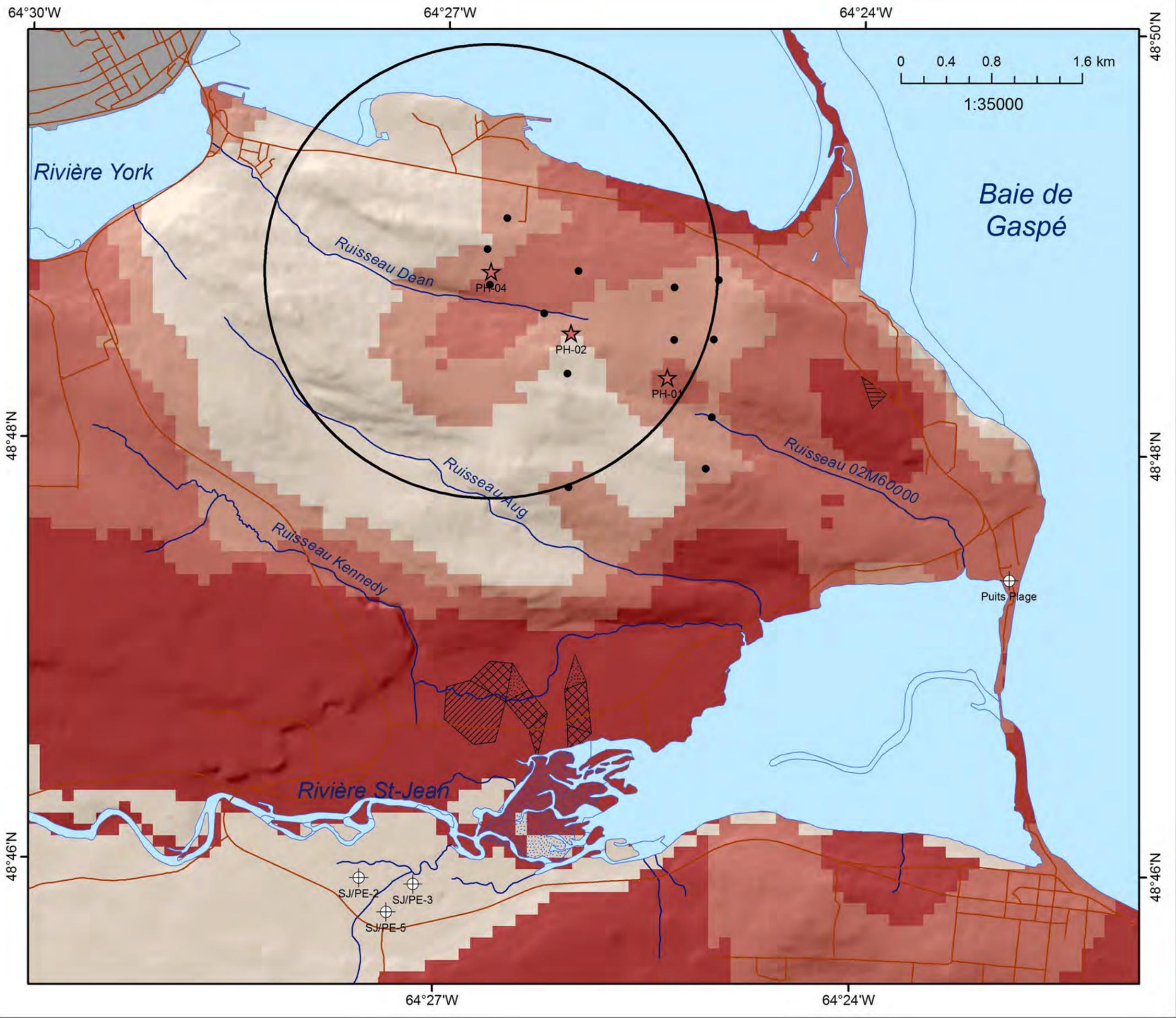
Carte 13

Pente de la surface du sol
Pour le calcul du coefficient de ruissellement
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04

Pente (%)

- 1 (<math>< 3\%</math>)
- 2 (3-8%)
- 3 (>8%)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 14

Groupes hydrologiques
Pour le calcul du coefficient de ruissellement
(Résolution de 100 m x 100 m)

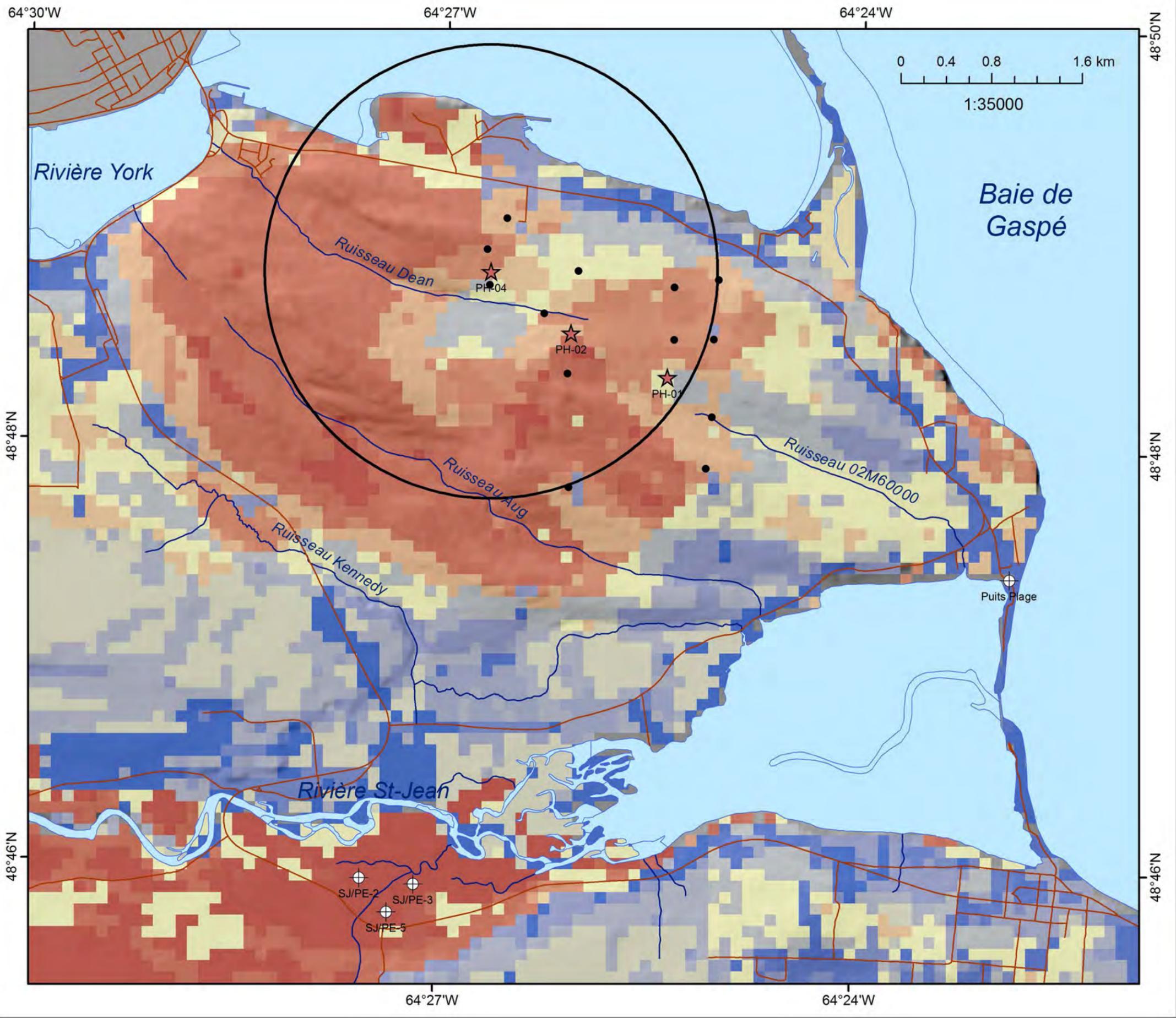
- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04

Groupe hydrologique (Monfet, 1979)

- A
- B
- C
- D

Pédologie (IRDA) - Zone cartographiée

- ▨ Alluvions mal drainées (ALLw)
- ▩ Substratum graveleux - loam sableux (DRId2)
- ▧ Loam sableux (MA)
- ▤ Loam limoneux (HA)
- ▦ Île (ILE)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

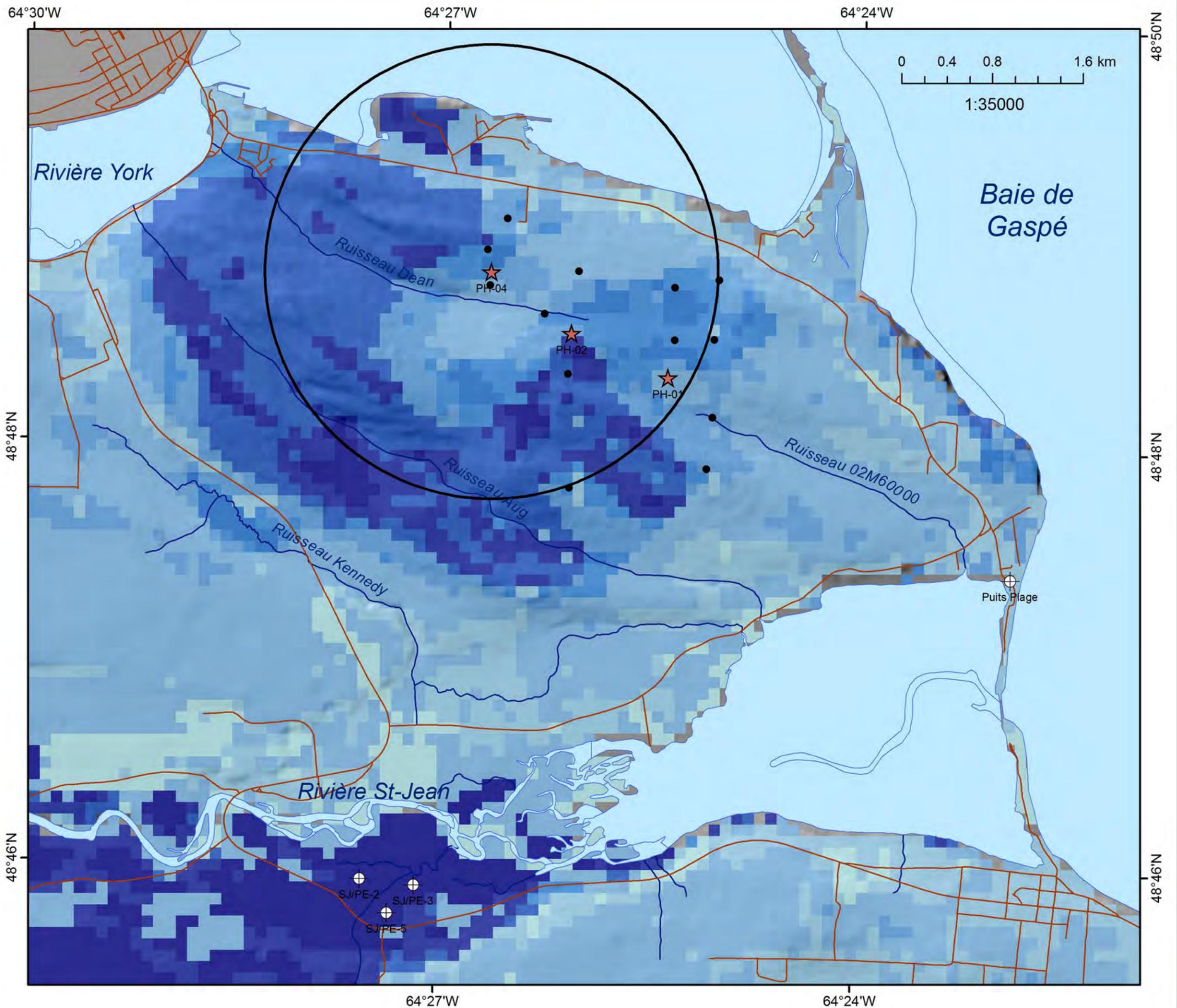
Carte 15

Coefficients de ruissellement
D'après le tableau modifié de Monfet
par Croteau (2006)
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
- Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04

Coefficient de ruissellement (%)

- 24
- 32
- 33
- 44
- 54
- 59
- 64
- 65
- 66
- 68
- 70
- 72
- 73
- 74
- 76
- 77
- 78
- 79
- 82
- 83
- 84
- 86
- 87
- 88
- 90



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

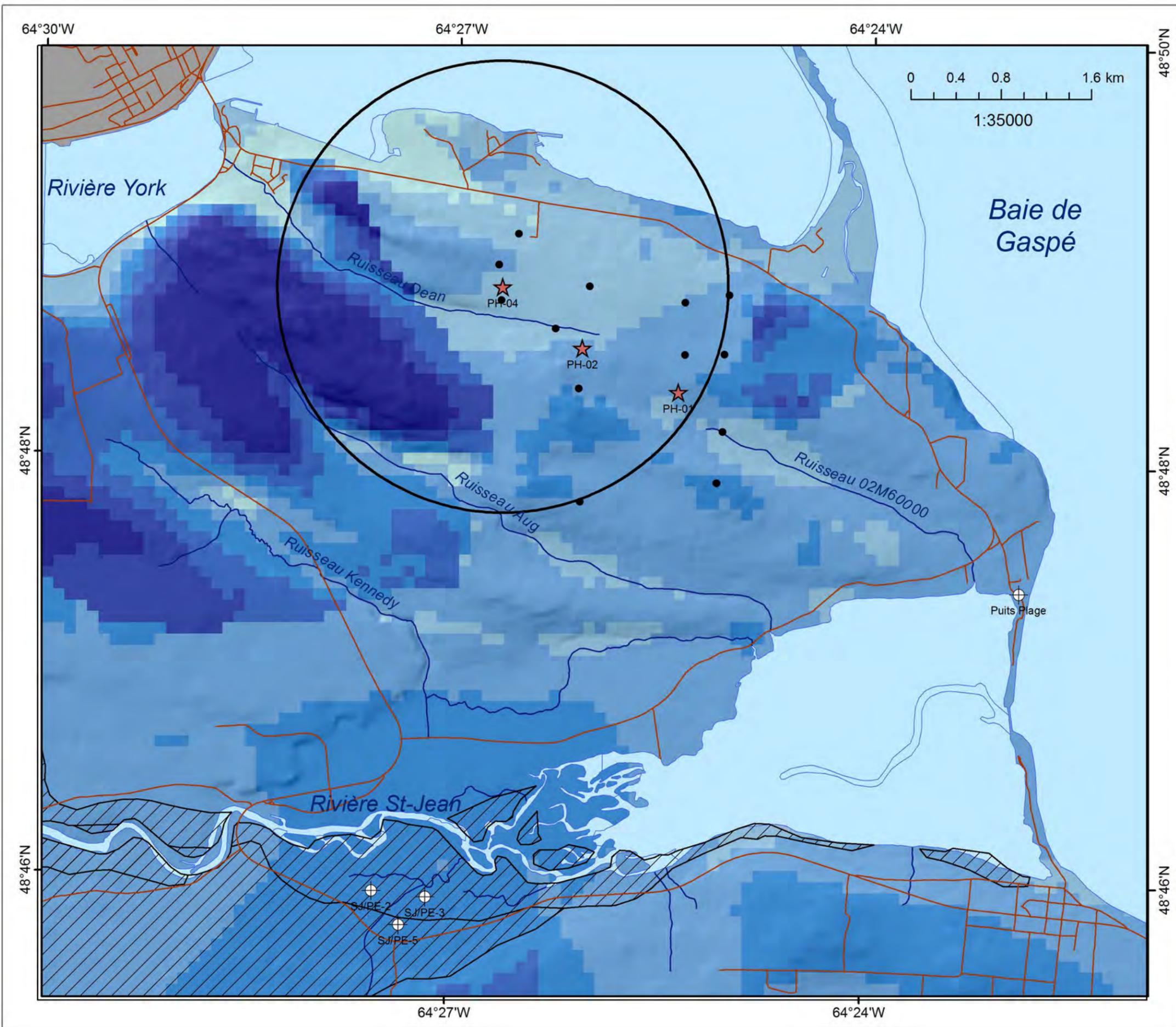
Carte 16

Recharge totale
Estimée à partir d'un bilan hydrologique
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04

Recharge (mm/an)

- 40 - 50
- 50 - 100
- 101 - 150
- 151 - 200
- 201 - 250
- 251 - 300
- 301 - 350
- 351 - 400
- 401 - 450
- 451 - 515



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

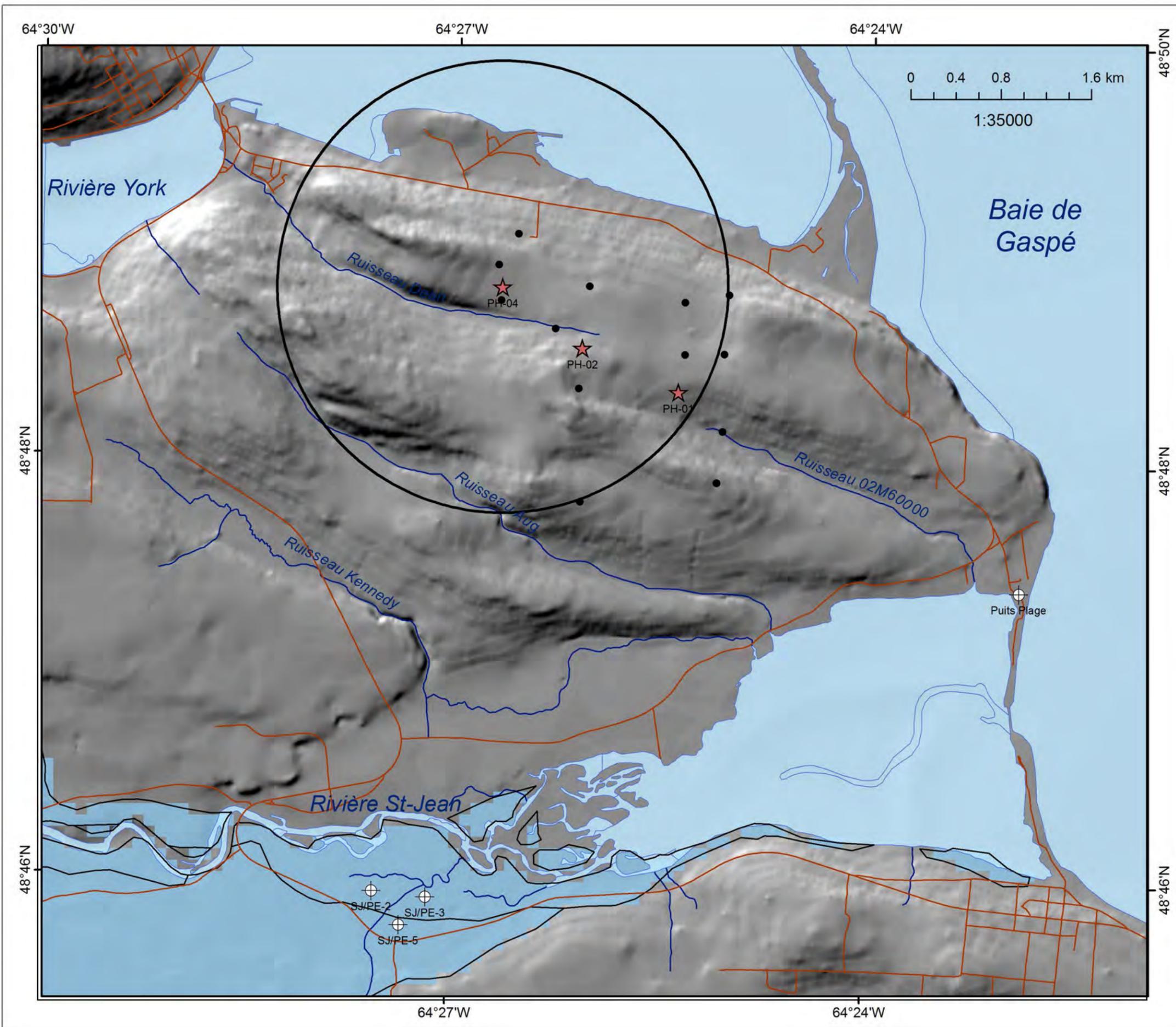
Carte 17

Cotes de la profondeur de la nappe
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
- Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc

Cote DRASTIC (profondeur de la nappe)

- 1 (>30,5 m)
- 2 (22,8 à 30,5 m)
- 3 (15,2 à 22,8 m)
- 5 (9,1 à 15,2 m)
- 7 (4,6 à 9,1 m)
- 9 (1,5 à 4,6 m)
- 10 (0 à 1,5 m)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

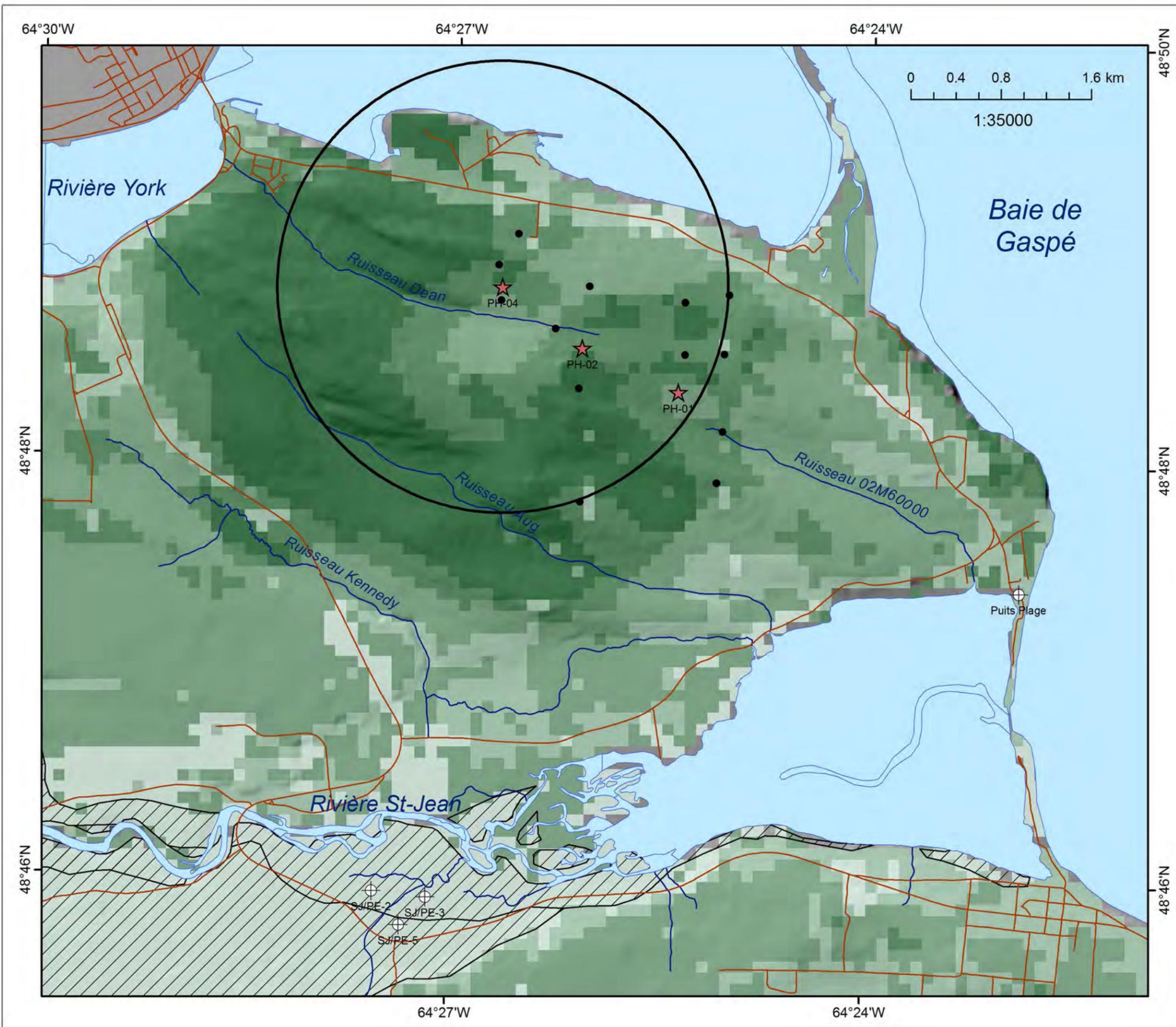
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 18

Cotes de la profondeur de la nappe
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
 - ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - Limite de l'aquifère granulaire
- Cote DRASTIC (profondeur de la nappe)**
- 9 (1,5 à 4,6 m)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

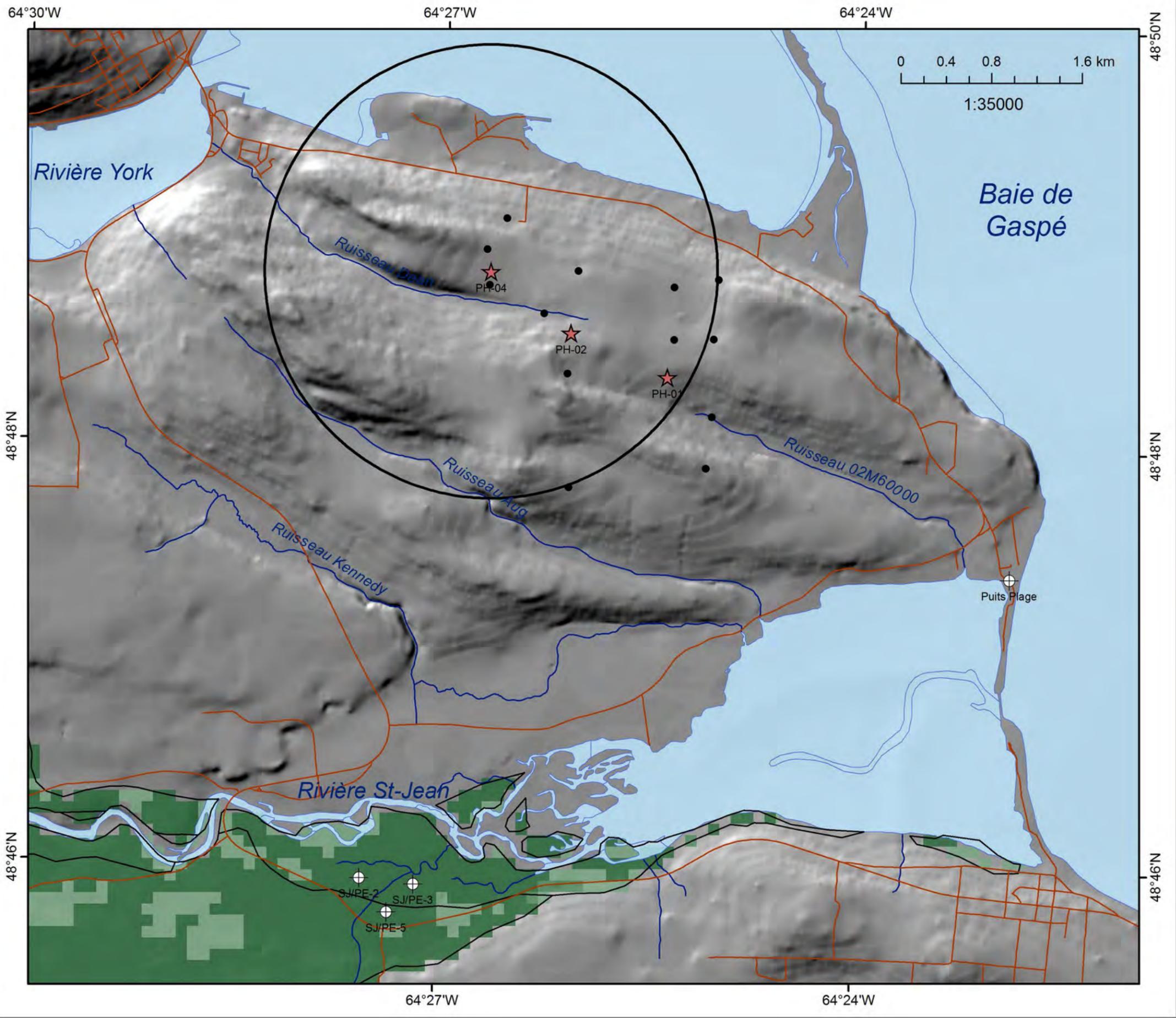
Carte 19

Cotes de la recharge
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- ▨ Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc

Cote DRASTIC (Recharge)

- 1 (0-50 mm/an)
- 3 (50-102 mm/an)
- 6 (102-178 mm/an)
- 8 (178-254 mm/an)
- 10 (>254 mm/an)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

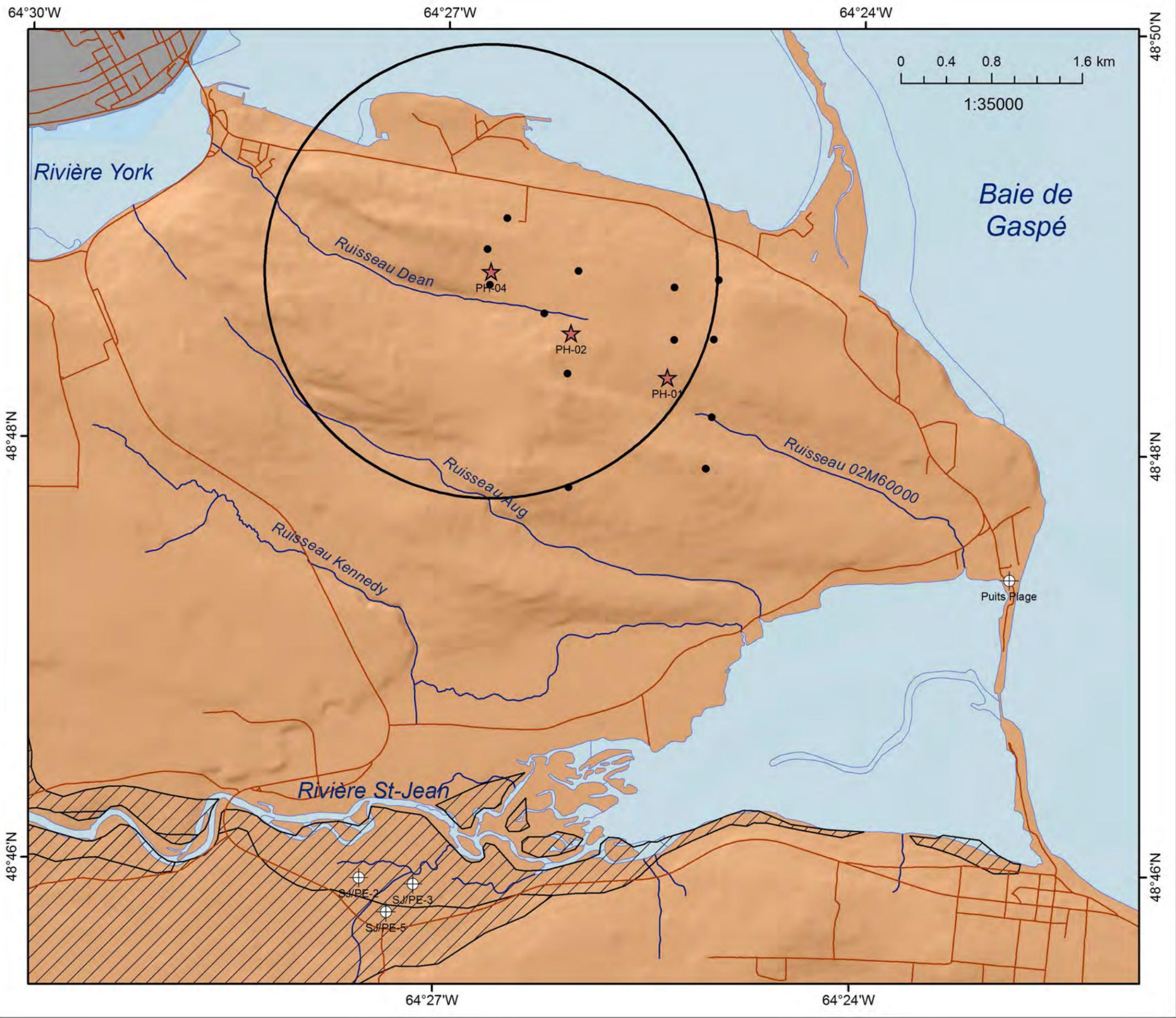
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 20

Cotes de la recharge
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
 - ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - Limite de l'aquifère granulaire
- Cote DRASTIC (Recharge)**
- 6 (102-178 mm/an)
 - 8 (178-254 mm/an)
 - 10 (>254 mm/an)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

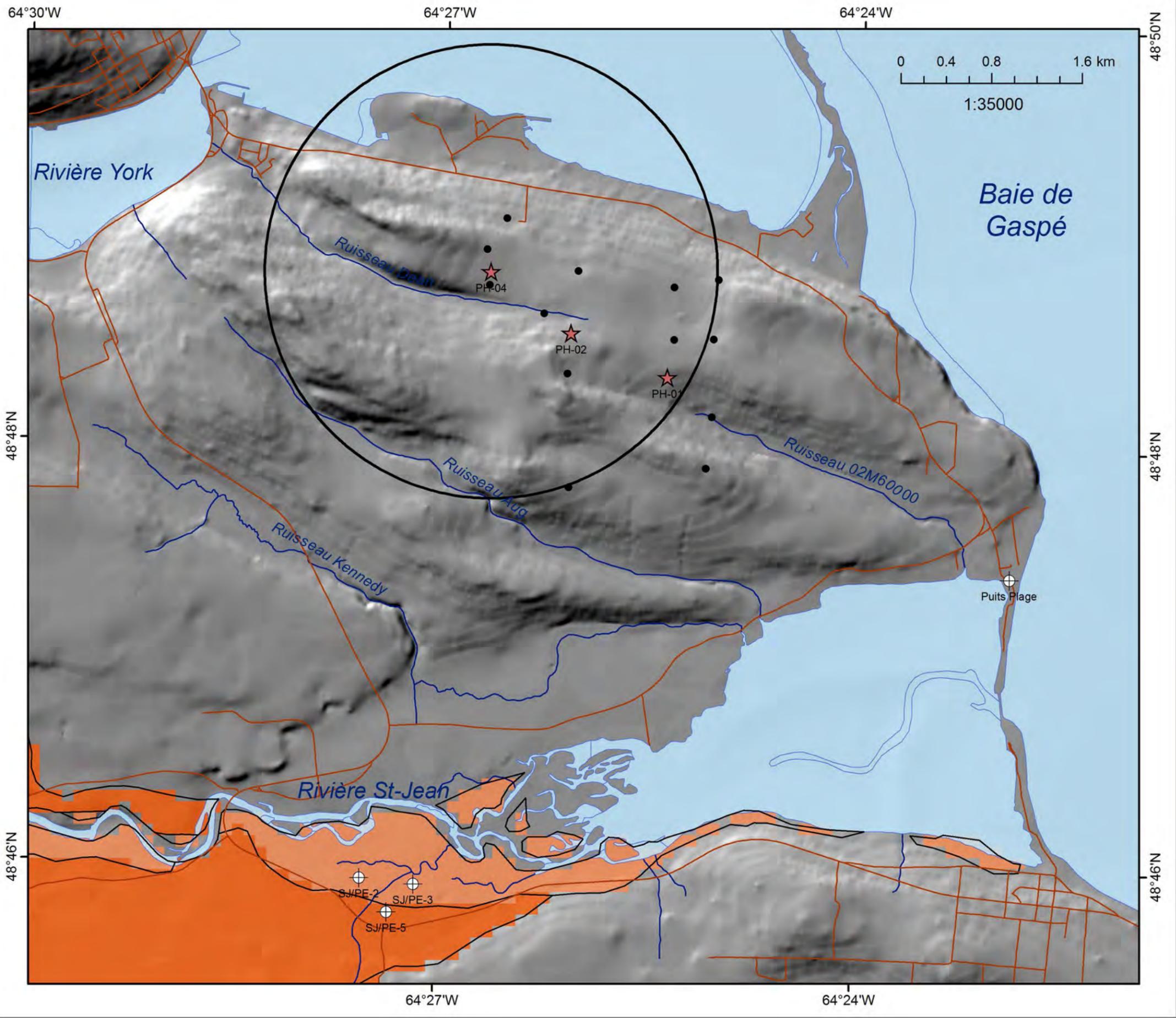
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 21

Cotes des types d'aquifère
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
 - Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc
- Cote DRASTIC (Type d'aquifère)**
- 6 (Grès fracturé)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

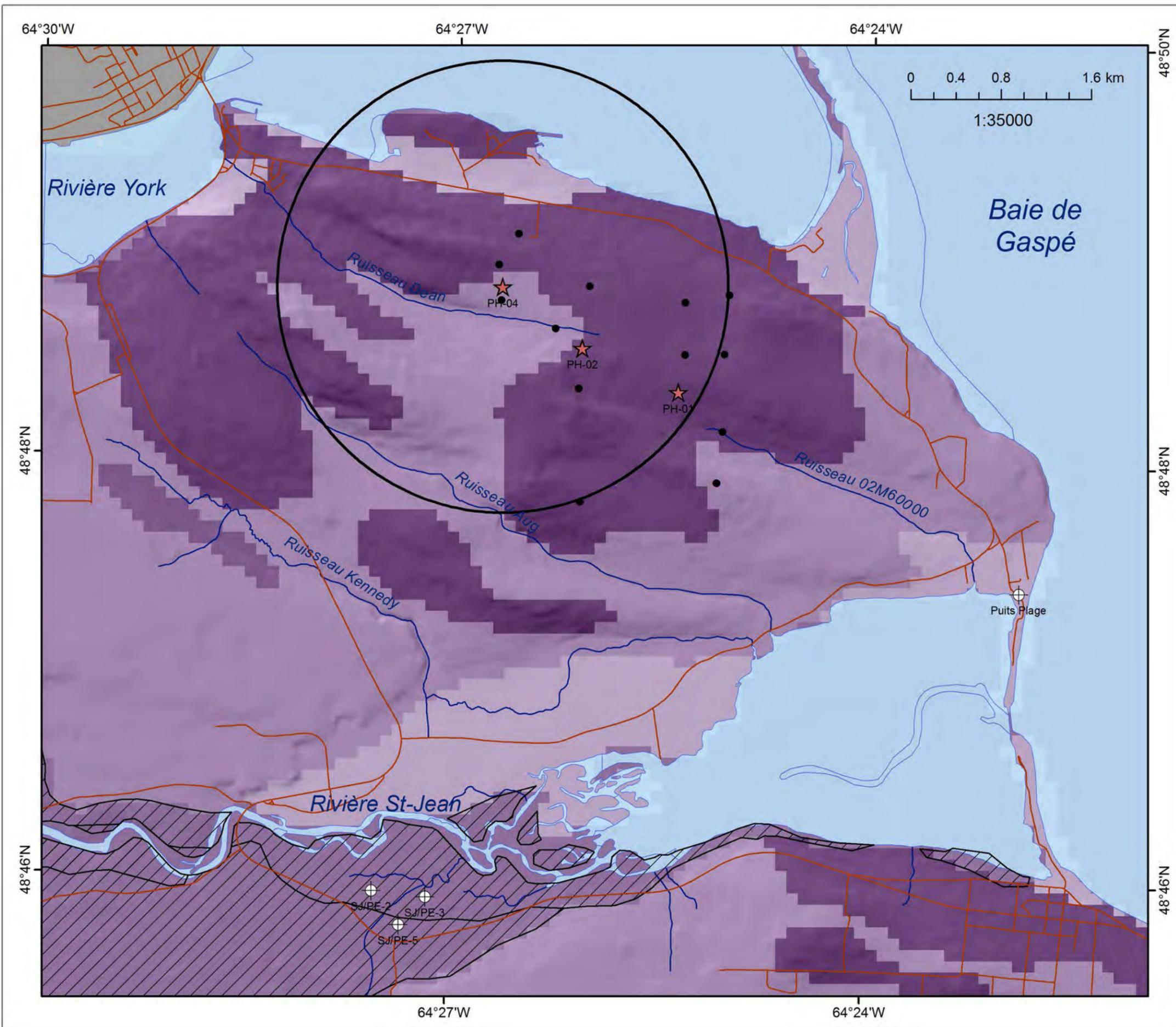
Carte 22

Cotes des types d'aquifère
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Limite de l'aquifère granulaire

Cote DRASTIC (Type d'aquifère)

- 7 (Sable et gravier et grès fracturé)
- 8 (Sable et gravier)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

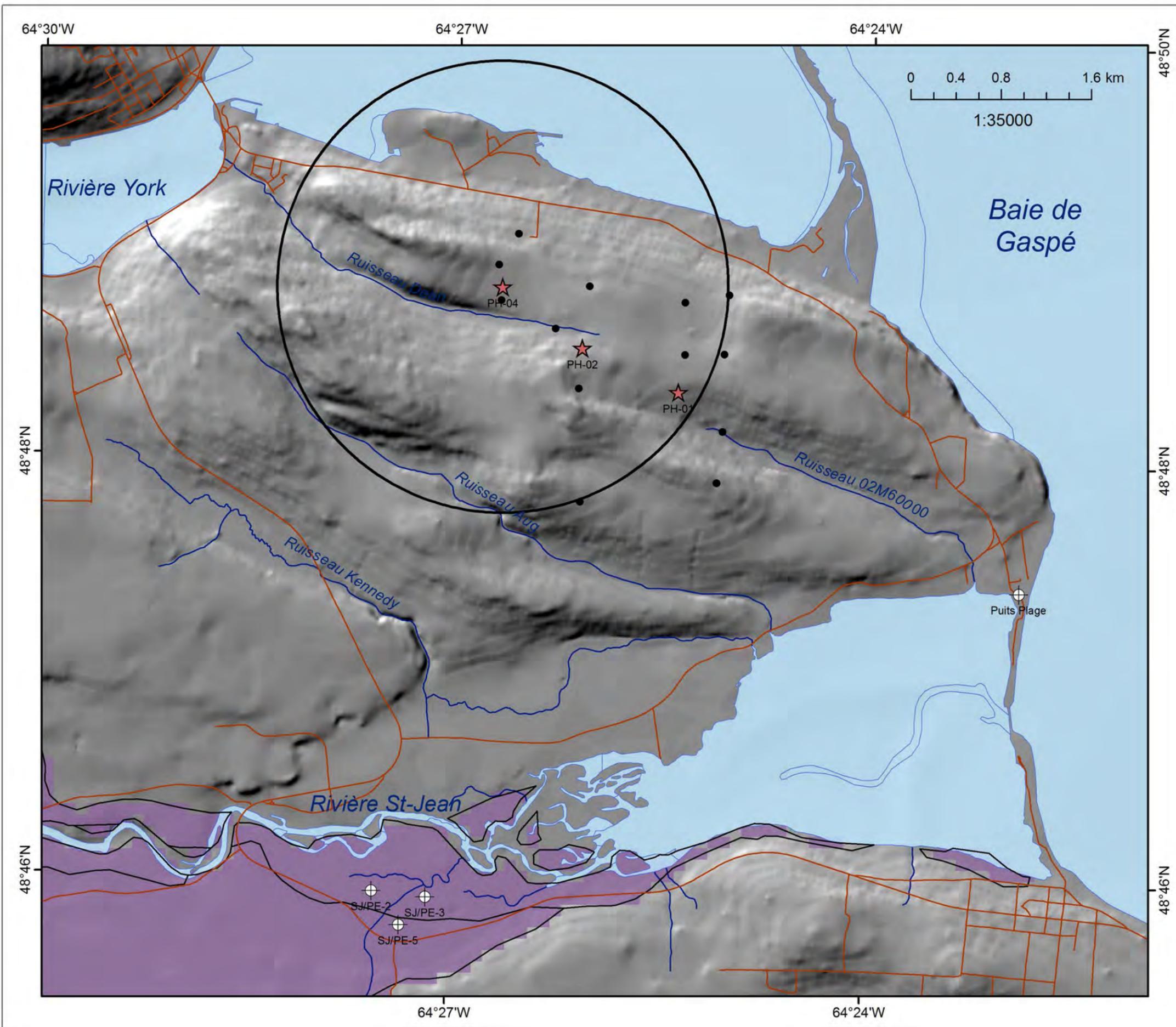
Carte 23

Cotes des types de sols
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
- Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc

Cote DRASTIC (Type de sol)

- 4 (Loam silteux)
- 5 (Loam)
- 6 (Loam sableux)
- 8 (Tourbière)
- 10 (mince ou absent)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

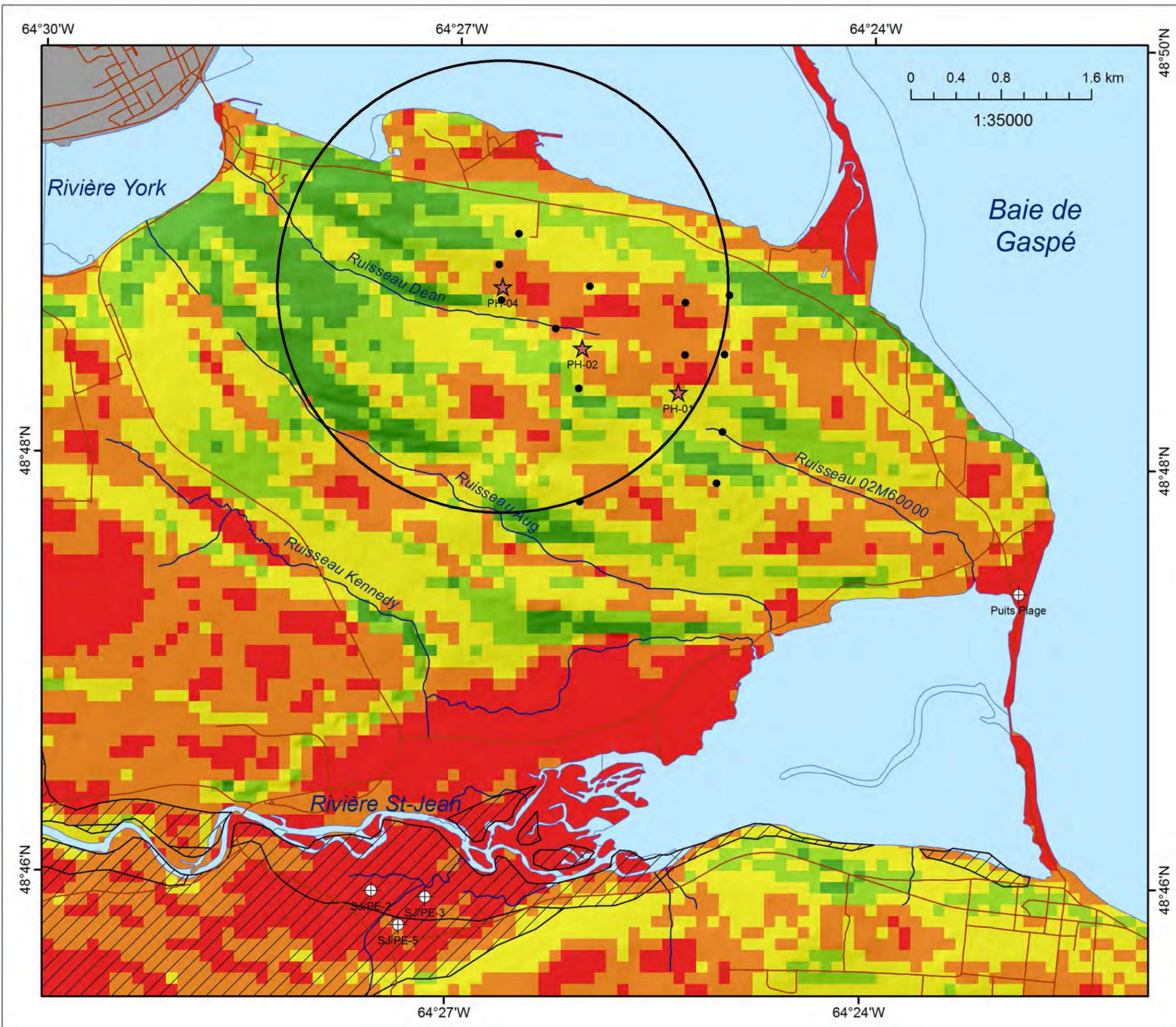
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 24

Cotes des types de sols
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
- Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Limite de l'aquifère granulaire
- Cote DRASTIC (Type de sol)**
- 6 (Loam sableux)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

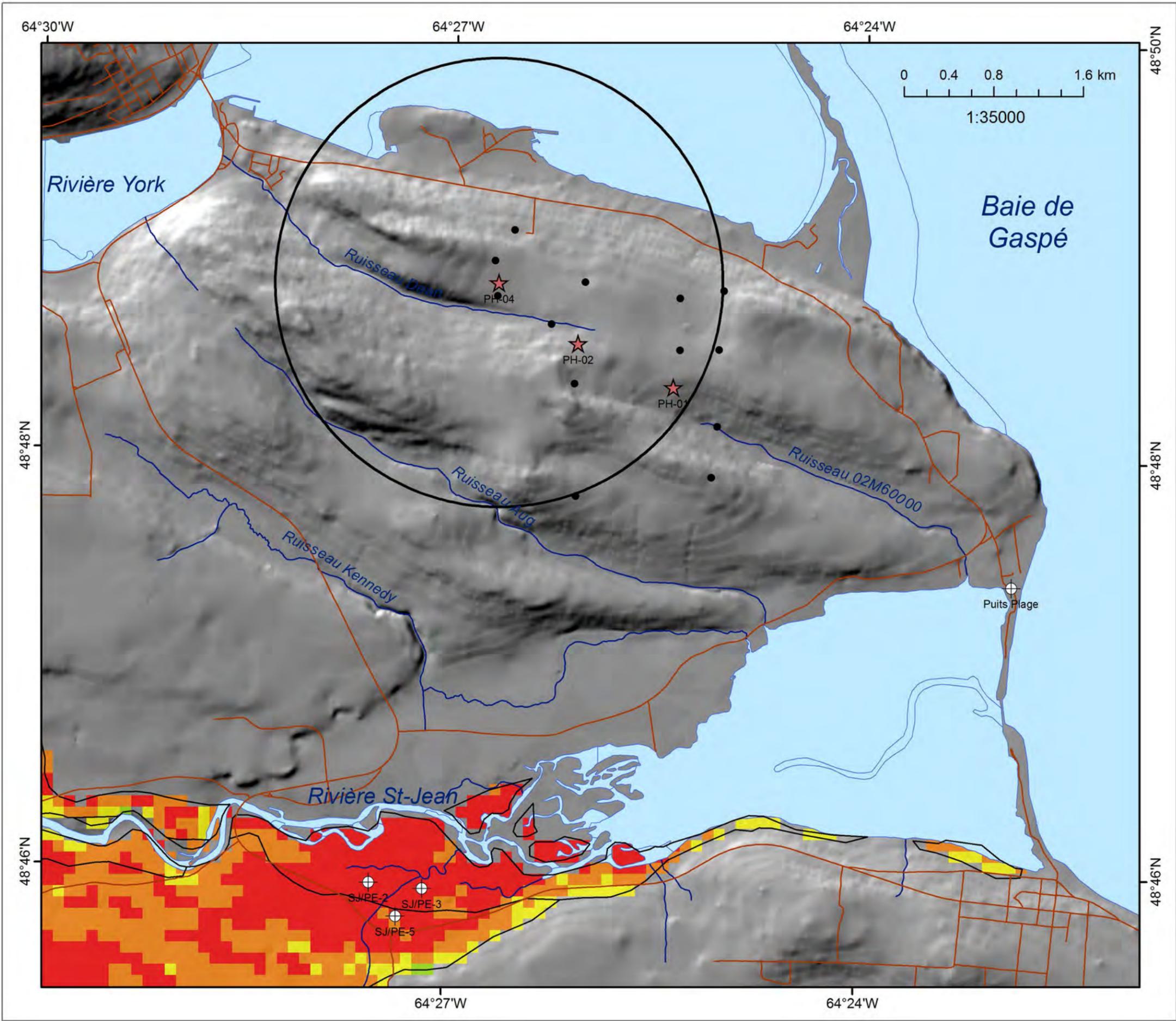
Carte 25

Cotes de la topographie (pente)
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
- Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc

Cote DRASTIC (% pente)

- 1 (>18%)
- 3 (12-18%)
- 5 (6-12%)
- 9 (2-6%)
- 10 (0-2%)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

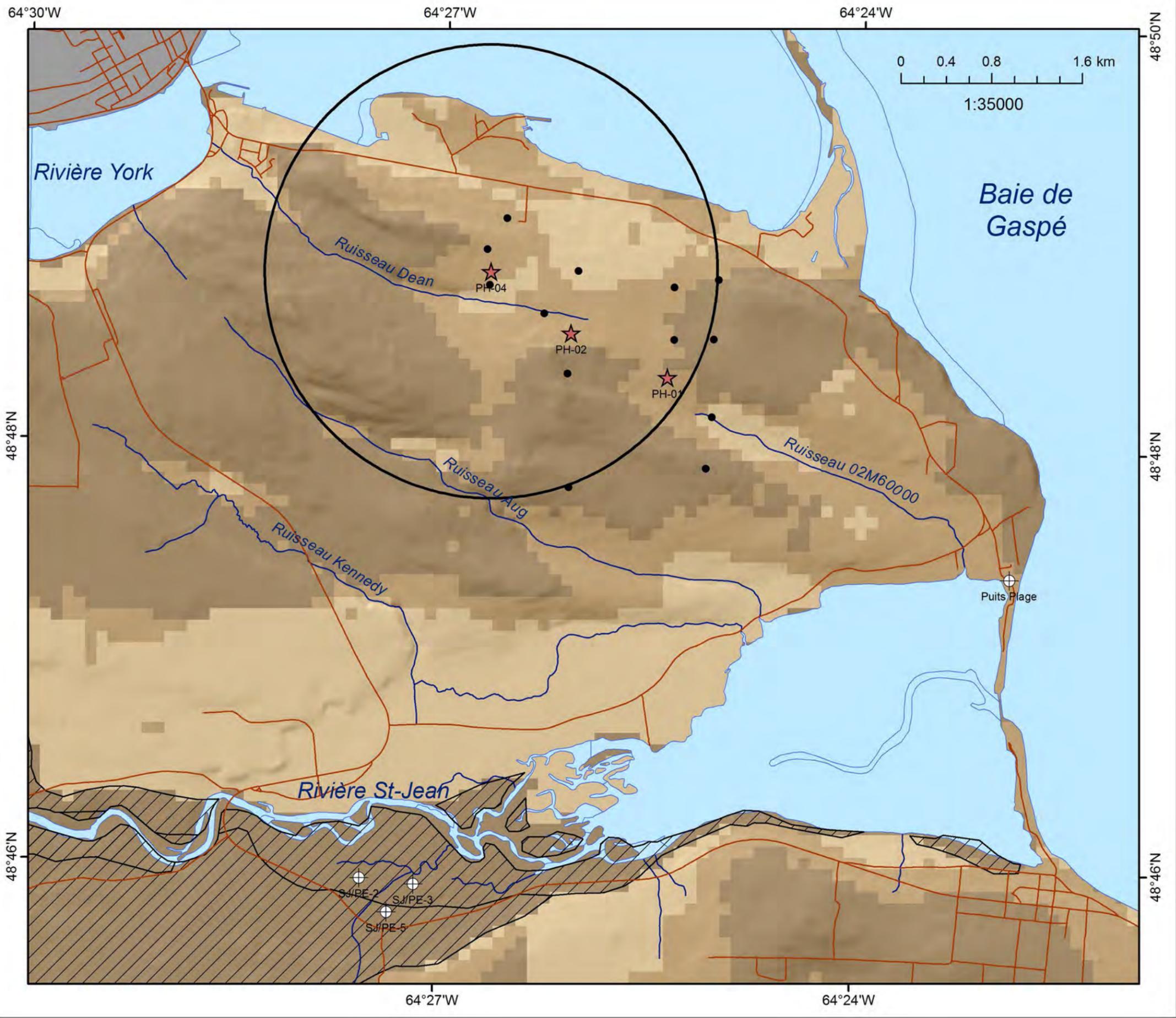
Carte 26

Cotes pour la topographie (pente)
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Limite de l'aquifère granulaire

Cote DRASTIC (% pente)

- 1 (>18%)
- 3 (12-18%)
- 5 (6-12%)
- 9 (2-6%)
- 10 (0-2%)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

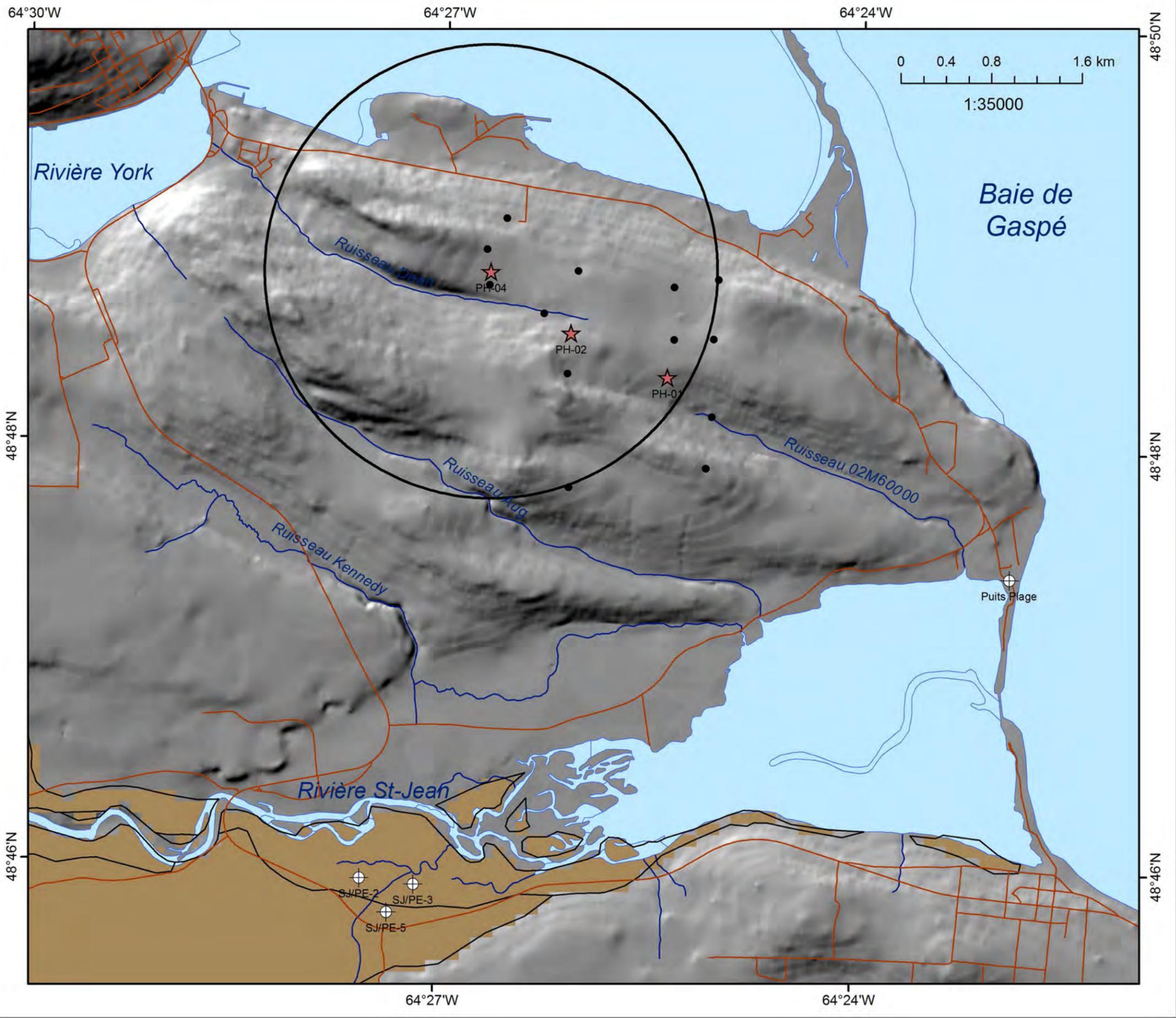
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 27

Cotes pour la zone vadose
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
 - ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - ▨ Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc
- Cote DRASTIC (Impact de la zone vadose)**
- 1 (Aquifère confiné)
 - 5 (Till)
 - 8 (Sable et gravier silteux)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

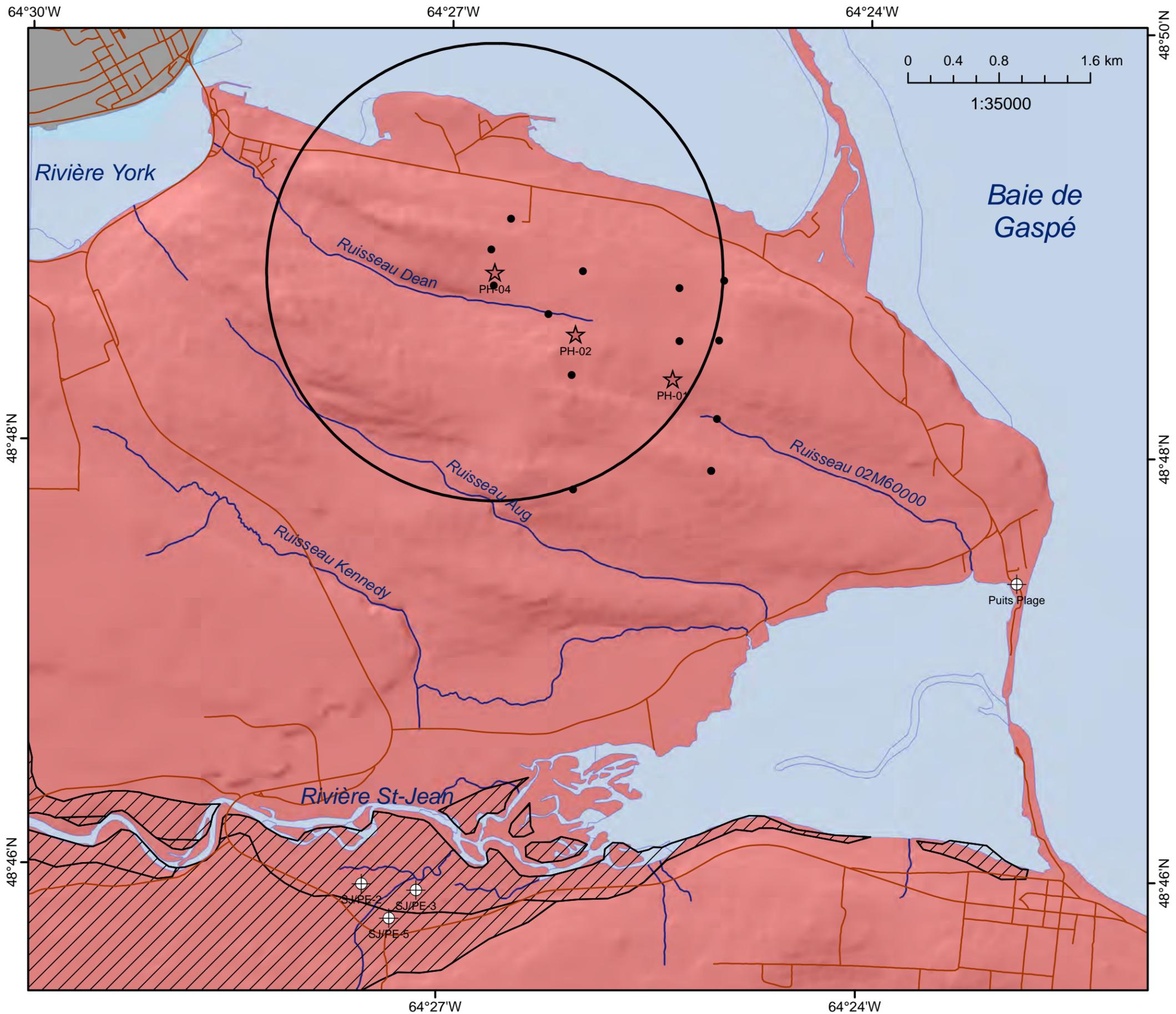
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 28

Cotes pour la zone vadose
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
- Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- Limite de l'aquifère granulaire
- Cote DRASTIC (Impact de la zone vadose)**
- 8 (Sable et gravier silteux)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

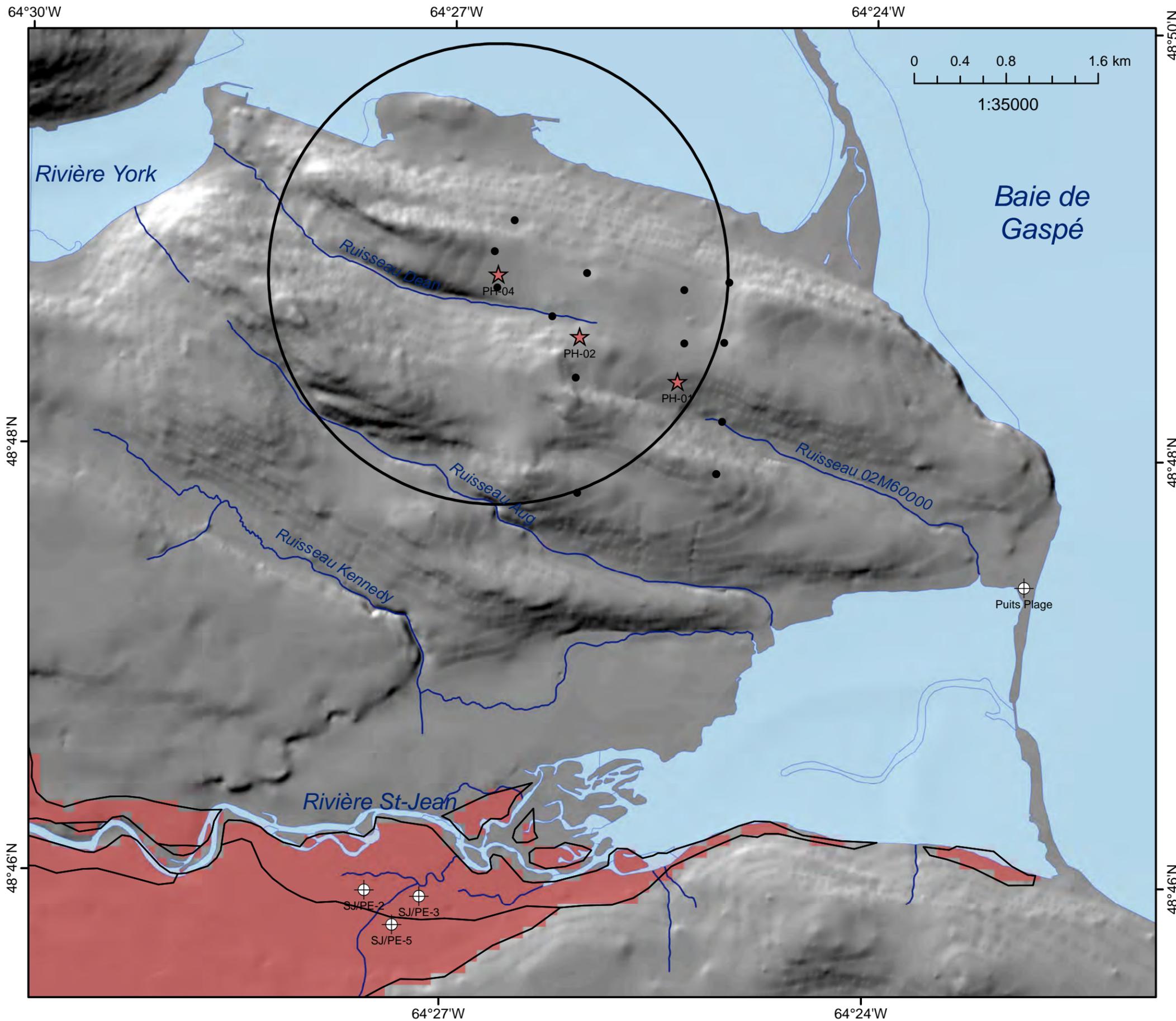
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 29

Cotes pour la conductivité hydraulique
Indice DRASTIC pour l'aquifère au roc
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
 - Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc
- Cote DRASTIC (Conductivité hydraulique)**
- 1 (4.72×10^{-7} à 4.72×10^{-5} m/s)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

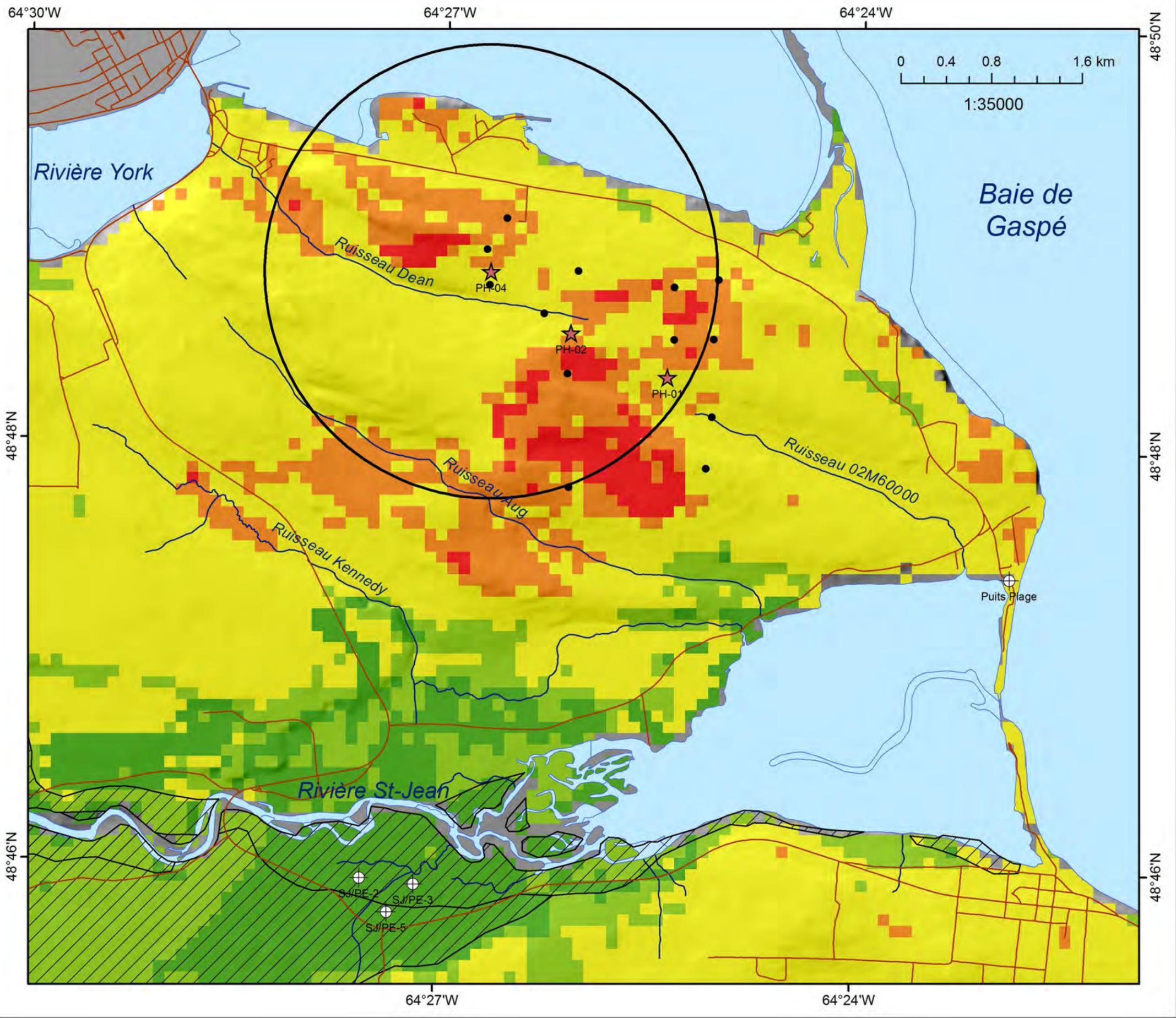
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 30

Cotes pour la conductivité hydraulique
Indice DRASTIC pour l'aquifère granulaire
(Résolution de 100 m x 100 m)

- Puits municipaux
 - Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - Limite de l'aquifère granulaire
- Cote DRASTIC (Conductivité hydraulique)**
- 10 (>9.43x10⁻⁵ m/s)



Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

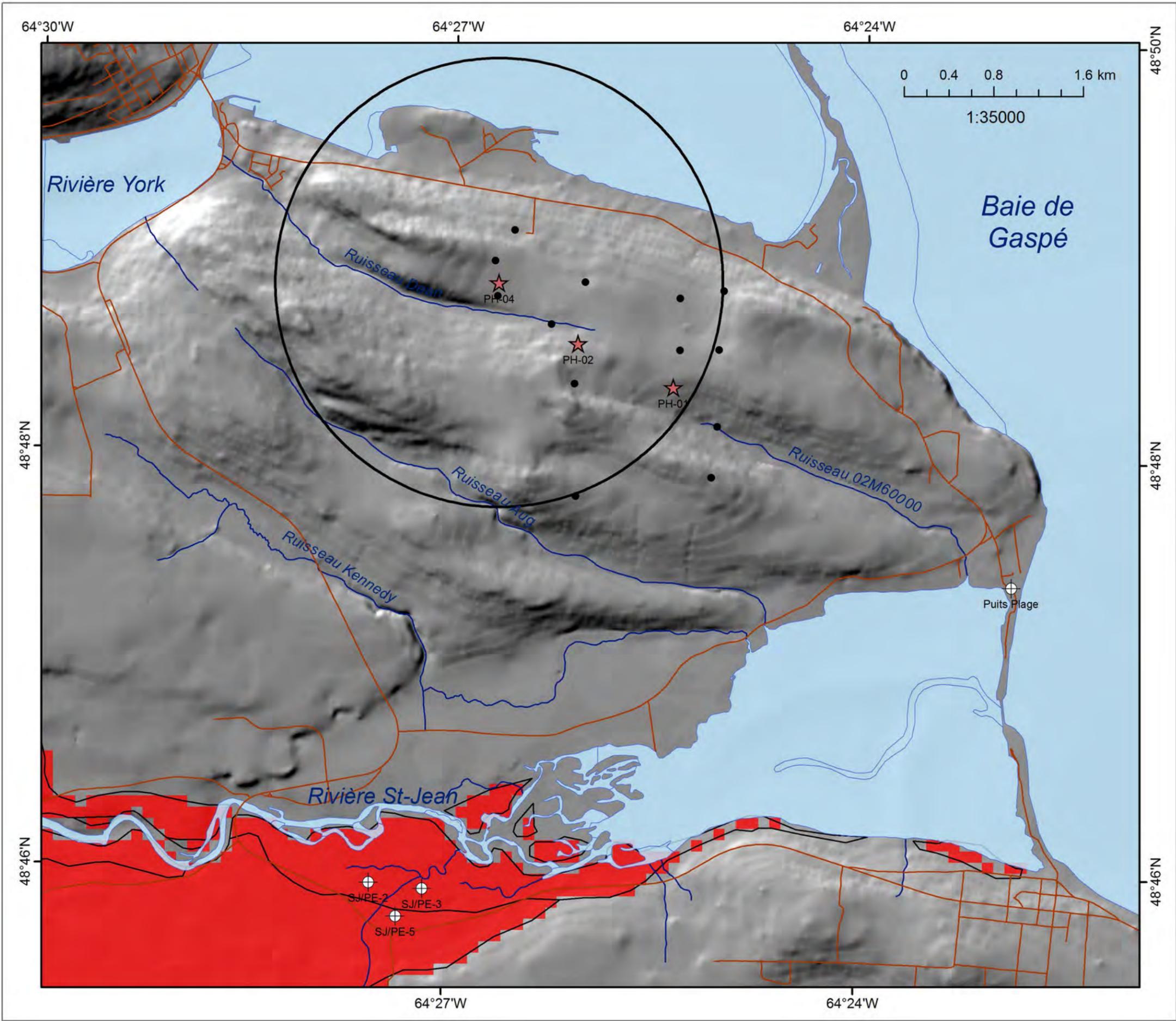
Carte 31

Indice DRASTIC de vulnérabilité
Aquifère au roc
(Aller et al., 1987)
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04
- ▨ Aquifère granulaire au-dessus de l'aquifère au roc

Indice DRASTIC (Vulnérabilité)

- < 85 (très faible)
- 85 - 100 (faible)
- 100 - 145 (moyenne)
- 145 - 160 (élevée)
- > 160 (très élevée)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

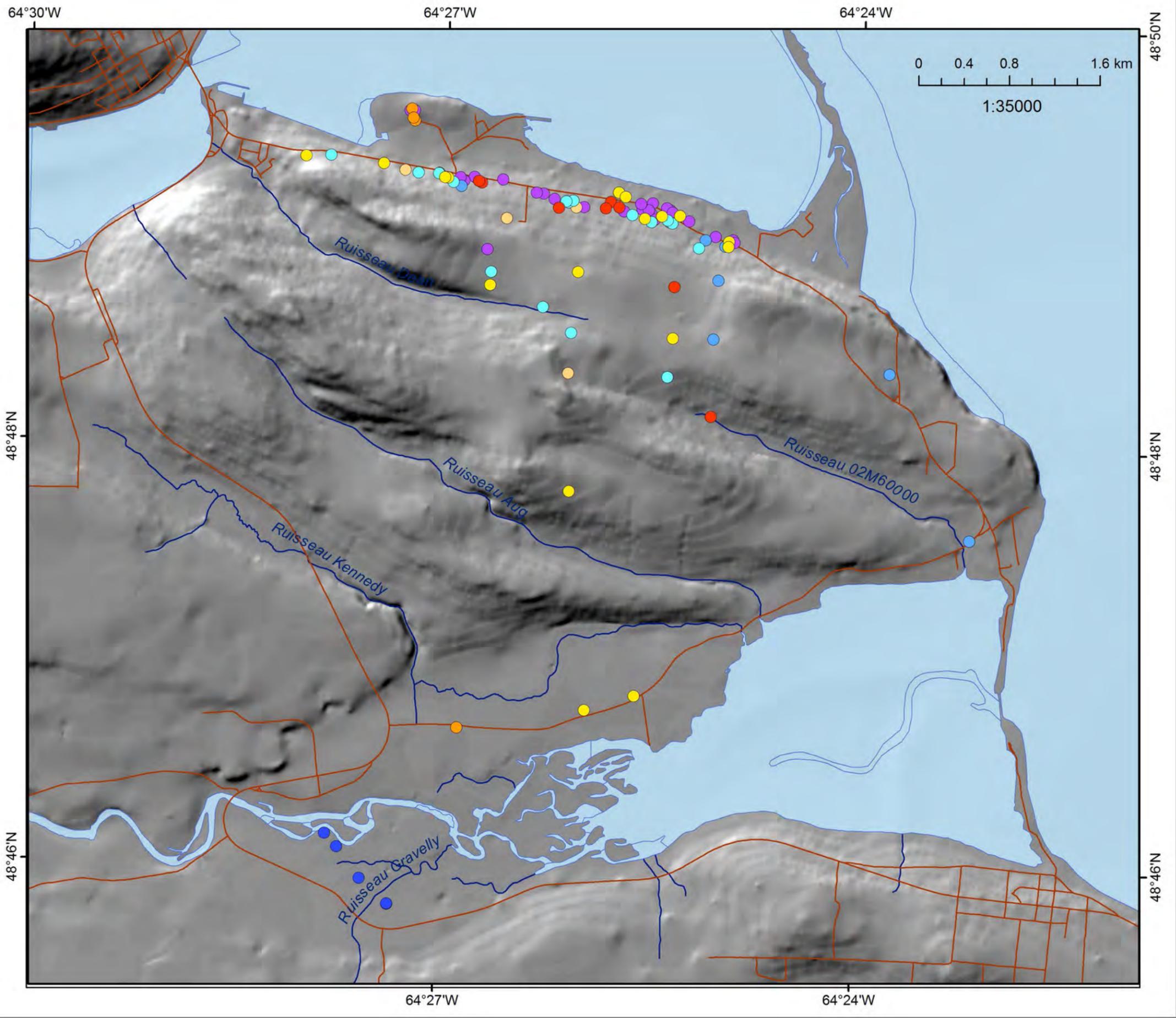
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 32

Indice DRASTIC de vulnérabilité
Aquifère granulaire
(Aller et al., 1987)
(Résolution de 100 m x 100 m)

- ⊕ Puits municipaux
 - ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
 - Puits d'observation
 - Rayon de 2 km du PH-04
 - ⊔ Limite de l'aquifère granulaire
- Indice DRASTIC (Vulnérabilité)**
- < 85 (très faible)
 - 85 - 100 (faible)
 - 100 - 145 (moyenne)
 - 145 - 160 (élevée)
 - > 160 (très élevée)



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

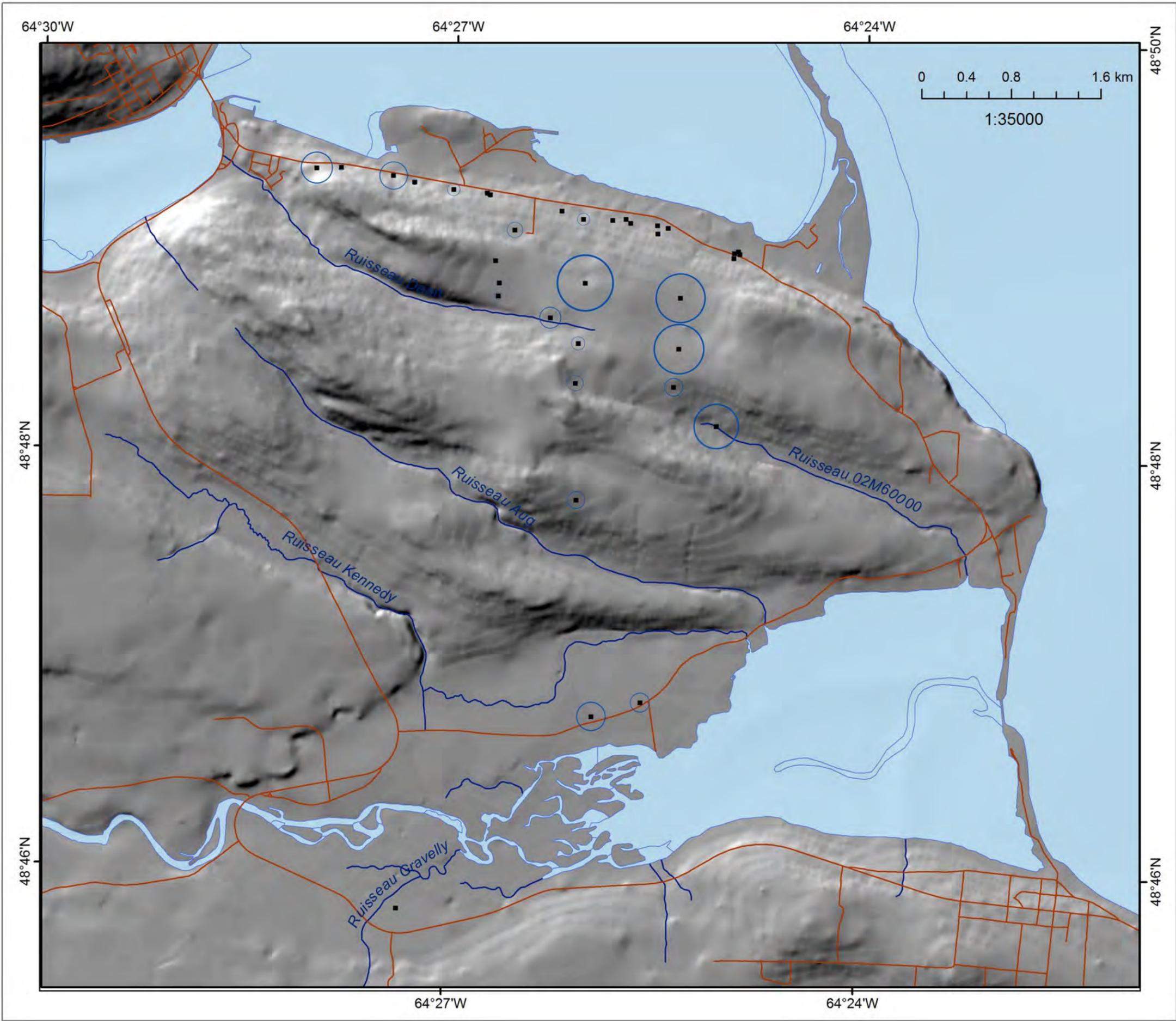
Carte 33

Distribution des groupes d'eau

Modèle numérique de terrain utilisé
en fond de carte

Groupes d'eau

- D1
- D2
- D3
- D4
- S1
- S2
- S3
- S4



**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 34

Concentrations en méthane
dans l'eau souterraine

Modèle numérique de terrain utilisé
en fond de carte

- Méthane détecté
- Concentration méthane (µg/l)**
- 10
- 100
- 500
- 1,000
- 5,000
- 10,000

Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final

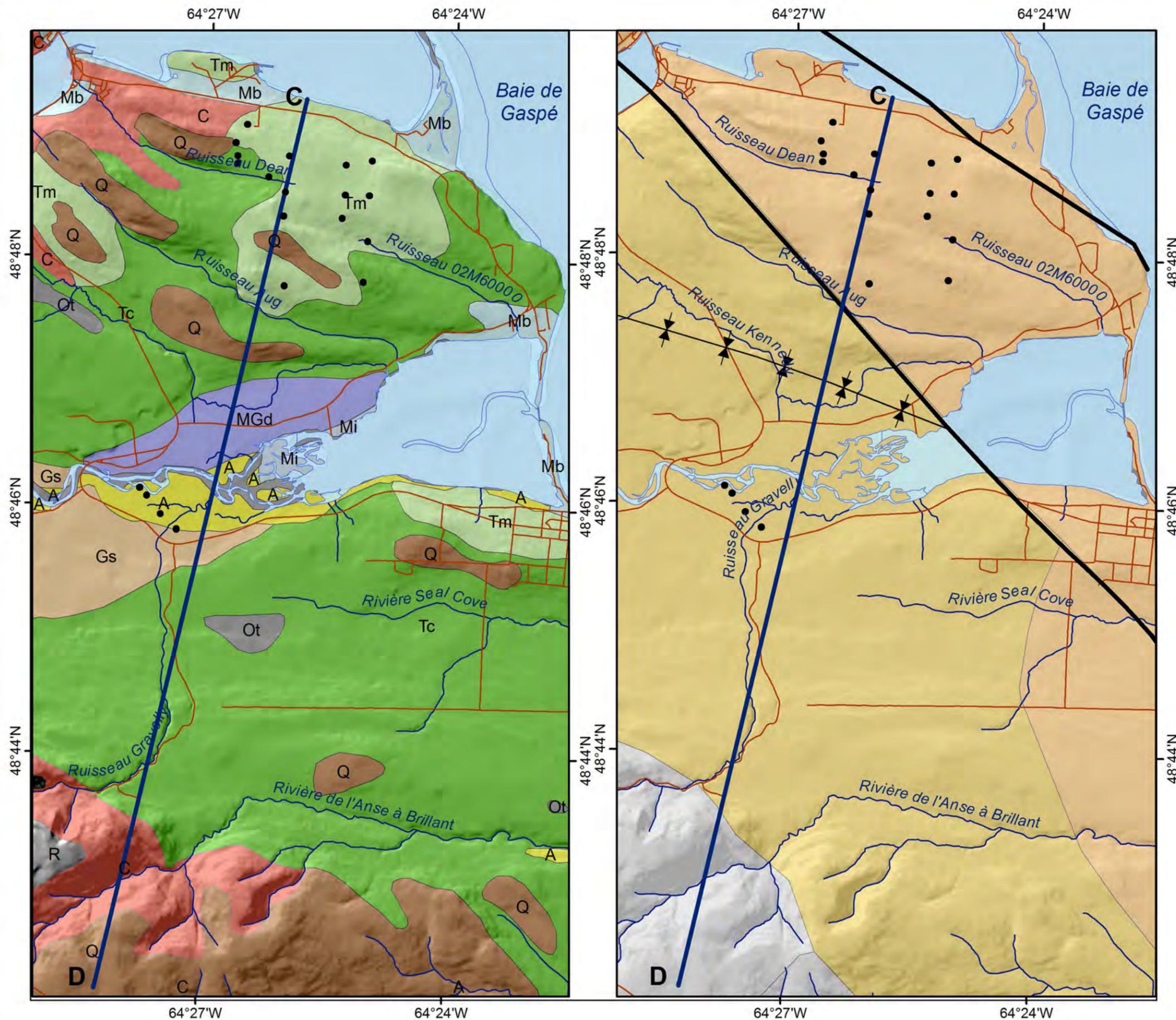
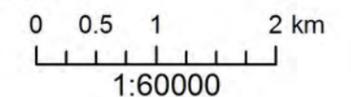
Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

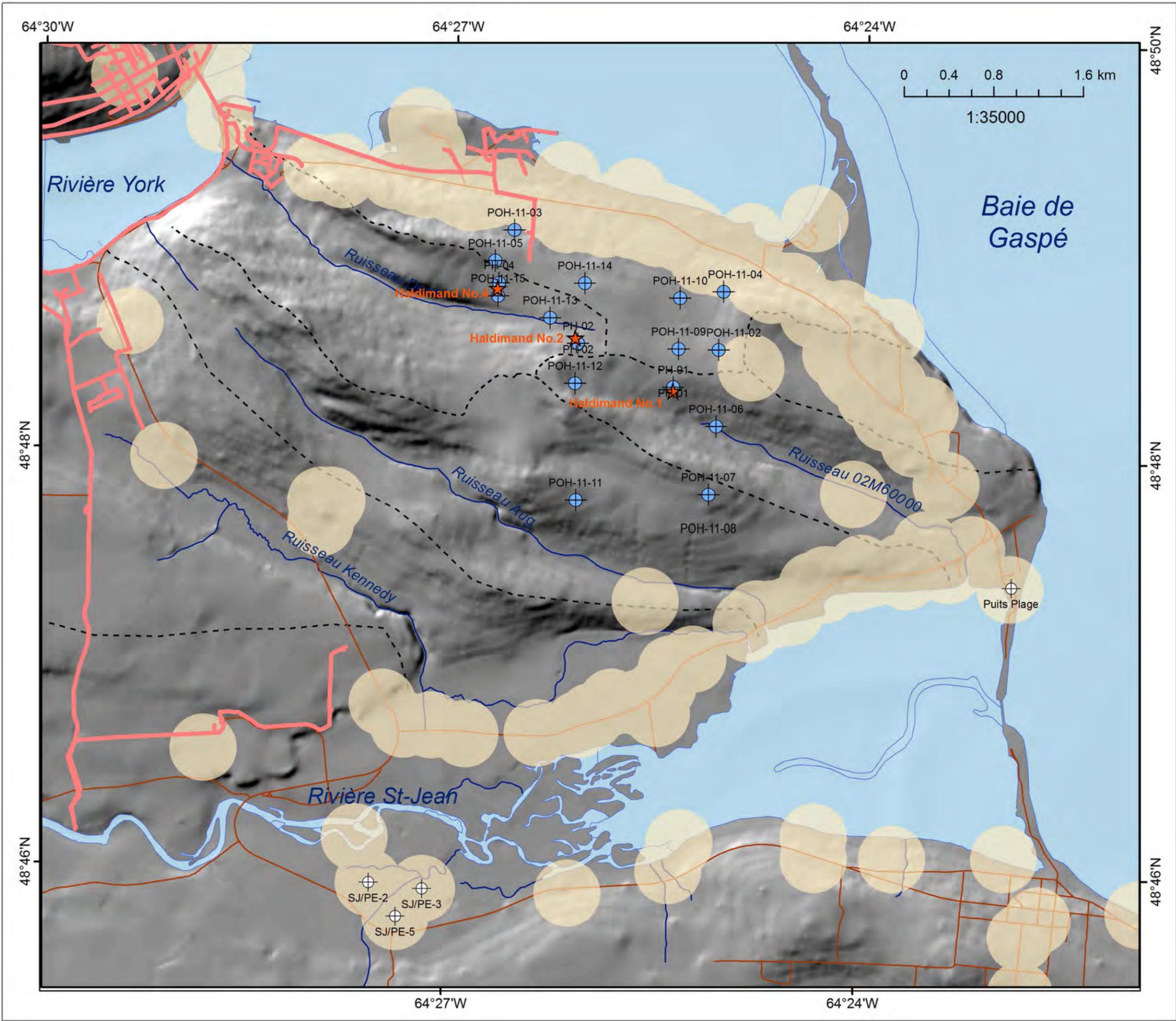
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 35

Dépôts quaternaires et géologie
le long de la coupe modélisée

- PuitsPOH-Gaspe
 - Coupe CD modélisée
- Linéaments**
- Trace axiale d'une synforme, position certaine
 - Faille du Bras-Nord-Ouest (Brisebois et al., 2001)
 - Faille Haldimand (Pinet et al., 2005)
- Formation d'Indian Cove
 - Formation de Battery Point
 - Formation de York River
 - C - Dépôts de versant non différenciés
 - Ot - Sédiments de tourbières
 - A - Alluvions non différenciées
 - Mi - Sédiments intertidaux
 - Mb - Sédiments littoraux
 - MGd - Sédiments deltaïques et prodeltaïques
 - Gs - Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique
 - Tc - Till en couverture généralement continue
 - Tm - Till en couverture mince et discontinue
 - Q - Roc altéré





**Caractérisation hydrogéologique
du secteur Haldimand
Rapport final**

Mélanie Raynauld, Morgan Peel,
René Lefebvre, Heather Crow,
John Molson, Jason Ahad
et Erwan Gloaguen

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Rapport de recherche R-1497
VERSION FINALE
Mai 2014

Carte 36

Distances séparatrices des
puits d'approvisionnement en eau

Modèle numérique de terrain utilisé
en fond de carte

- ★ Site forage pétrolier Pétrolia
- Réseau d'aqueduc
- ⊕ Puits Observations
- ⊕ Puits municipaux
- Rayon de 300 m d'un puits résidentiel
- - Ligne de partage des eaux

Annexe 1 – Protocoles (version complète sur CD)
Protocoles d'échantillonnage
Programme analytique Haldimand
Protocoles d'analyse
Protocole de production des cartes DRASTIC

Tableau A1-1 Programme analytique de base et comparaison des analyses réalisées par TechnoRem (2013) et le MDDEFP pour les puits d'observation

Échantillonnage selon l'annexe II du projet de règlement	PH-01	PH-02	PH-04	POH-11-02	POH-11-03	POH-11-03	POH-11-04	POH-11-05	POH-11-06	POH-11-07	POH-11-08	POH-11-09	POH-11-10	POH-11-11	POH-11-12	POH-11-13	POH-11-14	POH-11-15
Physicochimie <i>in situ</i>																		
1° Conductivité électrique spécifique	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2° pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3° Potentiel d'oxydo-réduction	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4° Température	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1° Les composés organiques :																		
a) BTEX (Benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes totaux)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
b) Carbone (C) organique total	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
c) Éthane (C ₂ H ₆)																		
d) Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
e) Hydrocarbures pétroliers (C ₁₀ -C ₅₀)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
f) Méthane (CH ₄) dissous et signature isotopique stable (δ ¹³ C) du méthane, le cas échéant																		
g) Propane (C ₃ H ₈)																		
2° Les composés inorganiques :																		
a) Aluminium (Al)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
b) Antimoine (Sb)																		
c) Argent (Ar)																		
d) Arsenic (As)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
e) Baryum (Ba)			x			x		x										x
f) Béryllium (Be)																		
g) Bismuth (Bi)																		
h) Bore (B)																		
i) Bromures																		
j) Cadmium (Cd)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
k) Calcium (Ca)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
l) Chlorure	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
m) Chrome (Cr)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
n) Cobalt (Co)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
o) Cuivre (Cu)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
p) Étain (Sn)																		
q) Fer (Fe)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
r) Fluorure (F)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
s) Lithium (Li)																		
t) Magnésium (Mg)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
u) Manganèse (Mn)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
v) Molybdène (Mo)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
w) Nickel (Ni)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x) Nitrites + nitrates	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
y) Plomb (Pb)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
z) Potassium (K)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
aa) Radium (Ra) total																		
bb) Sélénium (Se)																		
cc) Silicium (Si)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dd) Sodium (Na)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ee) Strontium (Sr)																		
ff) Sulfate	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
gg) Sulfures	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
hh) Thallium (Tl)																		
ii) Thorium total (Th)																		
jj) Titane (Ti)																		
kk) Uranium (U)																		
ll) Vanadium (V)																		
mm) Zinc (Zn)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3° Les paramètres :																		
a) Alcalinité	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
b) Solides dissous et en suspension ¹	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
c) Turbidité																		
Autres paramètres analysés²																		
Bicarbonates	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Phosphore total (P-PO ₄ ³⁻)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
COV mesuré <i>in situ</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x Analyses réalisées par TechnoRem (2012).

¹ L'analyse a été réalisée pour les solides totaux dissous.

² Paramètres analysés par TechnoRem non prévus dans l'annexe II du projet de règlement.

Tableau A1-2 Programme analytique spécialisé

IDENTIFICATION ÉCHANTILLON	Nad83 MTM5 Est	Nad83 MTM5 Nord	DESCRIPTION	Organiques extractibles à l'acide		Tritium		Carbone- 14		Isotopes stables		CFC/ SF ₆ / Gaz nobles	MDDEFP (Été 2013)	
				Aut. 2012	Été 2013	Aut. 2012	Été 2013	Aut. 2012	Été 2013	Aut. 2012	Été 2013		Été 2013	Avec gaz dissous
Puits d'observation														
POH-11-02	310853	5407816	Puits d'observation		X		X		X		X	X	X	
POH-11-03	309011	5408848	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
POH-11-04	310887	5408337	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
POH-11-05	308843	5408575	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
POH-11-06	310842	5407134	Puits d'observation			X		X		X		X	X	
POH-11-07	310786	5406525	Puits d'observation										X	
POH-11-08	310790	5406526	Puits d'observation											
POH-11-09	310493	5407819	Puits d'observation									X	X	
POH-11-10	310500	5408270	Puits d'observation		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
POH-11-11	309603	5406453	Puits d'observation		X		X		X		X	X	X	X
POH-11-12	309576	5407495	Puits d'observation			X		X		X		X	X	
POH-11-13	309343	5408073	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
POH-11-14	309647	5408389	Puits d'observation		X		X		X		X	X	X	
POH-11-15	308871	5408260	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
PH-01	310455	5407476	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
PH-02	309595	5407850	Puits d'observation		X		X		X		X	X	X	
PH-04	308878	5408377	Puits d'observation	X		X		X		X		X	X	
Puits municipaux														
SJ/PE-02	307815	5403011	Puits municipal (roc)		X		X		X		X	X	X	
SJ-7	308061	5402788	Puits d'observation (roc)				X		X		X	X	X	
SJ-8	308061	5402791	Puits d'observation (dépôts)				X		X		X	X	X	
SJ-19	307611	5403287	Puits d'observation (roc)				X		X		X	X	X	
SJ-27	307501	5403403	Puits d'observation (dépôts)				X		X		X	X	X	
Pétrole brute														
Haldimand n° 1			Forage pétrolier	X										
Suintements														
Suintement POT2	309090	5408833	Rue Forest	X		X		X						
Suintement S1	309004	5408094	Conant (Tête Ruisseau Dean)	X		X		X						
Suintement S2	308790	5408140	Conant (Ruisseau Dean)		X									
Eau de surface														
SURFH-11-01	313090	5406040	Cours d'eau			X		X		X				X
SURFH-11-02	309337	5408039	Cours d'eau			X		X		X				X
SURFH-11-03	306465	5409398	Cours d'eau			X		X		X				X
SURFH-11-04	311126	5406984	Cours d'eau près de POH-11-06			X		X		X				X

Légende
X : échantillon prélevé

***Annexe 2 – Résultats de mesures ou d’analyses
(version complète sur CD)***

Résultats des analyses de carottes

***Résultats d’interprétation d’essais de pompage
(TechnoRem, 2013)***

Résultats analytiques de la campagne du MDDEFP

Résultats analytiques de l’Université de Waterloo

Résultats analytiques de l’Université de Rennes 1

Données de suivi de nappe

Résultats analytiques de l’eau de formation

Tableau A2-1 Résultats des analyses de carottes

Numéro de l'échantillon	Profondeur de l'échantillon (pi)	Profondeur de l'échantillon (m)	Porosité (fraction)	Perméabilité à l'air (mDarcy)	Perméabilité à l'air (m ²)	Densité globale (kg/m ³)	Densité des solides (kg/m ³)	Description (Core Lab)
POH-11-03-1	17,1	5,21	0,078	0,016	1,58E-14	2 510	2 720	ss vf f
POH-11-03-2	34,45	10,50	0,081	0,010	9,87E-15	2 520	2 740	ss vf f
POH-11-03-3	52,5	16,00	0,093	0,030	2,96E-14	2 440	2 690	ss vf f
POH-11-03-4	68,9	21,00	0,047	0,012	1,18E-14	2 580	2 710	ss vf
POH-11-03-5	114,8	34,99	0,038	0,008	7,90E-15	2 630	2 740	ss vf slty
POH-11-03-6	141,4	43,10	0,057	0,009	8,88E-15	2 550	2 710	ss vf

Numéro de l'échantillon	Profondeur de l'échantillon (pi)	Profondeur de l'échantillon (m)	Porosité (fraction)	Perméabilité à l'air (mDarcy)	Perméabilité à l'air (m ²)	Densité globale (kg/m ³)	Densité des solides (kg/m ³)	Description (Core Lab)
POH-11-10-1	14,4	4,39	0,110	0,040	3,95E-14	2 390	2 690	ss vf f
POH-11-10-2	26,4	8,05	0,102	0,070	6,91E-14	2 420	2 690	ss vf f
POH-11-10-3	37,4	11,40	0,096	0,110	1,09E-13	2 420	2 680	ss vf f
POH-11-10-4	37,1	11,31	0,051	0,011	1,09E-14	2 580	2 720	ss vf slty
POH-11-10-5	90,0	27,43	0,062	0,009	8,88E-15	2 550	2 720	ss vf slty
POH-11-10-6	131,2	39,99	0,070	0,010	9,87E-15	2 530	2 720	ss vf slty
POH-11-10-7	154,2	47,00	0,053	0,011	1,09E-14	2 570	2 710	ss vf slty

Tableau A2-2 Codes de Core Lab pour les descriptions des carottes

ACA = Removed for advanced core analysis	ls = Limestone	SPH = Humidity analysis of small plug sample at 60 degrees Celsius and 50 % relative humidity
anhy = Anhydrite	lv = Large vug	SPP = Small plug from preserved section of the core
arg = Argillaceous	m = Medium	SPT = Small Plug used for tracer analysis
AST = Appears similar to	mi = Mud invaded	ss = Sandstone
bit = Bitumen	mv = Medium vug	ssdy = Slightly sandy (<20%)
bk = Break	NA = Not analyzed by request	sshy = Slightly shaly (<20%)
c = Coarse	NR = Not received	sty = Stylolite (ic)
calc = Calcite (calcareous)	OB = Overburden sample (permeability and porosity measured at net overburden stress)	sulf = Sulphur
carb = Carbonaceous	ool = Oolitic	sv = Small vug
cbl = Cobble	pbl = Pebble	TEC = Thermal Extraction Chromatography to determine oil richness
cgl = Conglomerate	PFD = Preliminary Full Diameter sample	TS = Thin section
cht = Chert	ppv = Pinpoint vug	uncons = Unconsolidated
coal = Coal/coal inclusion	PR = Preserved for future studies	vc = Very coarse
coq = Coquina	PSA = Particle size analysis	vf = Very fine
dol = Dolomite	PSP = Preliminary Small Plug sample	vfrac = Vertical fracture
f = Fine	pyr = Pyrite (pyritic)	VIS = Viscosity of oil measured
fc = Filter cake on surface of core sample	pyrbit = Pyrobitumen	VOB = Vertical overburden sample (vertical permeability measured at net overburden stress)
FD = Full diameter analysis including three directional permeabilities, porosity and densities	ru = Rubble	vshy = Very shaly (>40%)
foss = Fossil (fossiliferous)	SA = Sieve analysis	VSP = Vertical small plug drilled from whole core to measure vertical permeability (and occasionally porosity)
frac = Fracture (undifferentiated)	sdyl = Sandy	vug = Vuggy (vuggular)
fri = Friable	SEM = Scanning electron microscope analysis	ws = Water sand
glauc = Glauconite (glauconitic)	sh = Shale	XRD = X-ray diffraction
grnl = Granule	shy = Moderately shaly (20% - 40%)	* = Data unavailable due to poor sample quality
gyp = Gypsum	sid = Siderite	10240 = Permeability >10 Darcies, (maximum routine permeability measurement)
hal = Halite (salt)	sltst = Siltstone	
hfrac = Horizontal fracture	slty = Silty	
i = Intercrystalline	SP = Small plug (sample drilled from core in maximum horizontal direction and parallel to bedding plane where possible) permeability porosity, and grain density are measured	
IFD = Inner Full Diameter (Full diameter sample is drilled from the bulk portion of the core in the vertical direction for permeability and porosity measurements)	SPA = (Prefix A) Horizontal matrix permeability measured by pressure decay profile permeametry through a probe tip due to sample quality	
incl = Inclusions		
lam = Laminae (laminated)		

***Annexe 3 – Informations sur les puits d’observation
(version complète sur CD)***

Tableau des caractéristiques des puits

Résumé des spécifications des puits

Description des forages

Caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand

Annexe 3 - Informations sur les puits

Tableau des caractéristiques des puits échantillonnés par le MDDEFP

Puits	Profondeur (m)	Date de construction	Puits	Profondeur (m)	Date de construction	Puits	Profondeur (m)	Date de construction	Puits	Profondeur (m)	Date de construction	Puits	Profondeur (m)	Date de construction
GASP-01	15	2001	GASP-26	21.3	2011	GASP-48	14.6	NC	GASP-69	11	1986	POH-11-02	42.1	2011
GASP-02	19.8	1994	GASP-27	30.5*	1994	GASP-49	16	1982	GASP-70	38	2006	POH-11-03	50.4	2012
GASP-04	65	1996	GASP-28	14.5*	NC	GASP-50	15	1950	GASP-71	NC	NC	POH-11-04	41.5	2011
GASP-05	NC	2010	GASP-29	35	1991	GASP-51	14	NC	GASP-72	NC	NC	POH-11-05	42.7	2012
GASP-06	7.6	1960	GASP-30	NC	NC	GASP-52	NC	2006	GASP-73	NC	NC	POH-11-06	36.0	2011
GASP-07	NC	NC	GASP-31	30*	NC	GASP-53	15	NC	GASP-74	NC	NC	POH-11-07	52.7	2011
GASP-08	NC	NC	GASP-32	~53	1975	GASP-54	NC	NC	GASP-75	37	1976	POH-11-08	36	2011
GASP-10	21.3	1970	GASP-33	NC	NC	GASP-55	13	1970	GASP-76	15	NC	POH-11-09	46.3	2011
GASP-11	12	1962	GASP-34	30.5	1985	GASP-56	30	1950	GASP-77	26	NC	POH-11-10	53.3	2012
GASP-12	NC	NC	GASP-35	5.45	~1950	GASP-57	24	1999	GASP-78	20	NC	POH-11-11	91.4	2011
GASP-13	~10	~1970	GASP-36	27.5	1995	GASP-58	21	1982	GASP-79	NC	NC	POH-11-12	40.2	2011
GASP-14	20.7	~1970	GASP-37	13.7	1961	GASP-59	17	1990	GASP-80	24	1970	POH-11-13	41.1	2011
GASP-15	NC	NC	GASP-38	24.3	1998	GASP-60	27	2011	GASP-81	22.9	1970	POH-11-14	40.0	2011
GASP-16	18	2010	GASP-39	NC	1995	GASP-61	NC	1969	GASP-82	NC	NC	POH-11-15	19.8	2012
GASP-17	9	NC	GASP-40	19.8	1994	GASP-62	NC	1990	GASP-83	20	1941	SJ-07	42.5	2008
GASP-18	~15	NC	GASP-41	25.9	1983	GASP-64	43	1980	GASP-84	NC	NC	SJ-08	11.3	2008
GASP-19	20	2008	GASP-42	18.5*	1994	GASP-65	10	1979	GASP-85	21	2004	SJ-19	13.7	2009
GASP-20	11.2	1963	GASP-43	36.6	1980	GASP-66	>18	2001	PH-01	46.8	NC	SJ-27	10.7	2010
GASP-21	11.2	1960	GASP-45	24.7	1964	GASP-67	NC	NC	PH-02	28.5	NC	SJ/PE-02	18.3	2009
GASP-25	24.4	1978	GASP-47	NC	2003	GASP-68	22	1971	PH-04	39.6	2012.0			

* Données tirées de LNA (2008)

NC: Inconnu

TABLEAU 2-2

FORAGES ET TRAVAUX DE CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE AUX SITES HALDIMAND N^{OS} 1, 2, 3 ET TAR POINT

Nom des puits	Type de forage prévu		Longueur forage réalisée (pied)			Longueur forage réalisée (m)			Longueur total tubage		Longueur cuvelée dans le roc	Longueur margelle	Profondeur fractures rencontrées					Capacité estimée	Commentaires		
	Rotatif à l'air (6")	Carottier (3")	total	dépôt	roc	total	dépôt	roc	(pied)	(m)	(m)	(m)	(pied)					(galUS/min)			
SITE HALDIMAND																					
POH-11-02	x		138	2	136	42	1	41	10	3.05	1.79	0.65	93	-	-	-	-	-	3 à 4	-	-
POH-11-03		x	166	1	165	51	0	50	17.2	5.23	3.75	1.18									-
POH-11-04	x		136	3	133	41	1	41	11	3.35	1.69	0.75	33	-	-	-	-	-	1	-	Gaine PVC de 4" a dû être insérée dans le puits pour limiter l'éboulement de fragments de roches dans le trou. Crépiné sur les derniers 20 pieds
POH-11-05	x		140	6	134	43	2	41	16	4.88	2.45	0.6	52	57.5	68	91	123	-	1 à 2		
POH-11-06	x		118	8	110	36	2	34	21	6.40	3.46	0.5	66	72	85	-	-	-	300 à 400	-	Capacité de 300 galUS/min à 85 pieds de profondeur. Puits en condition artésienne. Packer présent pour arrêter l'écoulement.
POH-11-07	x		173	2	171	53	1	52	10.5	3.20	1.93	0.66	108	144	-	-	-	-	5	-	Puits voisin de POH-11-08 (12 pieds entre les deux puits).
POH-11-08	x		106	1	105	32	0	32	10.5	3.20	2.31	0.59	95	-	-	-	-	-	0.5	-	Puits voisin de POH-11-07 (12 pieds entre les deux puits).
POH-11-09	x		152	3	149	46	1	45	21	6.40	5.02	0.47	56	89	136	-	-	-	1.3	21	Capacité de 1,3 galUS/min entre 25 et 27 pieds de profondeur et de 21 galUS/min à 136 pieds de profondeur. Odeur de soufre.
POH-11-10		x	170	4.2	165.8	52	1	51	19.9	6.07	4.19	0.60									
POH-11-11	x		300	18	282	91	5	86	21	6.40	0.25	0.66	43	104	150	244	282		64	-	-
POH-11-12	x		132	4	128	40	1	39	21	6.40	4.70	0.48	42	50	88	-	-	-	19	-	-
POH-11-13	x		135	3	132	41	1	40	13	3.96	2.12	0.925	19	52	132	-	-	-	4	-	-
POH-11-14	x		134	17	117	41	5	36	21	6.40	0.45	0.77	38	-	-	-	-	-	28	-	Retour le 6 décembre pour aller souder un tubage de 6" à la margelle qui ne fait que 6" de haut.
POH-11-15	x		65	0	65	20	0	20	7	2.13	1.62	0.51	28	33	43	46	57		1 à 2		Mise en place d'une gaine pour limiter l'éboulement de fragments de roches dans le trou de forage. Crépiné sur les derniers 20 pieds
PH-04	x		130	0	130	40	0	40	10.5	3.20	2.64	0.56	18	32.5	40	46	79	88	10		Mise en place d'une gaine pour limiter l'éboulement de fragments de roches dans le trou de forage. Crépiné sur les derniers 20 pieds
PH-02 ¹	puits existant		45	-	-	-	-	-	-	-	-	0.485	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PH-01 ²	puits existant		42	-	-	-	-	-	-	-	-	0.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SITE TAR POINT																					
PT-01 ³	puits existant											0.6									Puits en condition artésienne au printemps et dès qu'il pleut.
POT-11-01	x		141	10	131	43	3	40	21	6.4008	2.79	0.56	-	-	-	-	-	-	4.5	-	
POT-11-02	x		141	9	132	43	3	40	21	6.4008	2.63	1.03	115	-	-	-	-	-	32	-	Puits en condition artésienne, environ 2 gal.US/min par dessus le puits. Packer présent pour arrêter l'écoulement.
POT-11-03	x		150	19	131	46	6	40	21	6.4008		1.39	33	47	54	110	115	-	60	300	Capacité de 60 galUS/min à 54 pieds et de 300 gal US/min entre 110 et 115 pieds. Puits en condition artésienne, tubage de 3 pieds soudé (5 pieds au total). Packer présent pour arrêter l'écoulement.

Notes ;

¹ : Le puits PH-02 aurait de 5 à 6" de diamètre. Il serait profond de 45 mètres et aurait un niveau statique de 18 mètres.(Danile Brisebois, 20 septembre 2011). Une utilisation de l'ordre de 15 m³/jour en aurait été faite en moyenne lors du forage du puits pétrolier Haldimand #2. Gordon Delhanty aurait foré le puits. Il aurait dit que le puits fournissait suffisamment d'eau pour les besoins de Pérolia. Une pompe de 2 hp, 4" de marque Groundfos tirant 73 galUS/min (400 m³/jour) aurait été utilisée. (Pierre Houle, 11 octobre 2011).

² : Le puits PH-01 aurait 6" de diamètre. Il serait profond de 130' à 150'. Il aurait été foré durant le mois de mars 2010. Aucun volume d'eau n'a été calculé pour ce puits (Pierre Houle, 11 octobre 2011).

³ : Une utilisation de l'ordre de 11,2 m³/jour en aurait été faite en moyenne lors du forage du puits pétrolier Tar Point. Gordon Delhanty aurait foré le puits. Il aurait dit que le puits fournissait suffisamment d'eau pour les besoins de Pérolia. Une pompe de 2 hp, 4" de marque groundfos tirant 73 galUS/min (400 m³/jour) aurait été utilisée. (Pierre Houle, 11 octobre 2011).

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-02

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pérolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-02

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 5 Décembre 2011

Élévation du sol (m): 93,98

Élévation du tubage protecteur (m): 94,63

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 12,58

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 395 920,92

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 159,01

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
94.98	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier. Élévation du niveau d'eau: 82,04 m (26 octobre 2012). Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.
93.523	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse avec un peu de gravier anguleux.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge, à grains fins à grossiers et de mudrock verte ou grise. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à moyen). Présences de fractures.		2	G	-	-			
	5			3	G	-	-			
	7			4	G	-	-			
	9			5	G	-	-			
	11			6	G	-	-			
	13			7	G	-	-			
	15			8	G	-	-			
	17			9	G	-	-			
	19			10	G	-	-			
	21			11	G	-	-	15,24 m:très peu d'eau		
	23			12	G	-	-			
	25			13	G	-	-			
	27			14	G	-	-			
	29			15	G	-	-			
	31			16	G	-	-			
	33			17	G	-	-			
	35			18	G	-	-			
	37			19	G	-	-			
	39			20	G	-	-	29,0 m: 10 L/min		
	41			21	G	-	-			
	43			22	G	-	-			
63.48	31	Présence de lits de grès conglomératique, apparence consolidée, présence de fractures.		23	G	-	-			
	33			24	G	-	-			
	35			25	G	-	-			
	37			26	G	-	-			
	39			27	G	-	-			
	41			28	G	-	-	40,5 m: 10 L/min		
57.38	37	Alternance de lits de grès vert, gris et rouge à grains fins à très fins. Présence de fractures.								
	43	Fin du sondage								
51.92										

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-03

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-03

Méthode de forage: Casing "NW" et Carottier "NQ"

Foré par: Forage Géo

Date du forage: 16 Octobre 2012

Élévation du sol (m): 60,36

Élévation du tubage protecteur (m): 61,54

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 0,97

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 394 098,43

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 408 227,59

Diamètre du forage (mm): 152 / 89

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
61.36										
60.08	-1	Surface du Sol								
	1	Dépôts meubles Argile silteuse.		1		0	100			Élévation du niveau d'eau: 60.57 m (26 octobre 2012). Tubage en acier de 89 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 152 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier.
	3	Roc Grès vert à grains fins à moyens, litage grand à serré, joints oblique et subhorizontaux, roc non consolidé à moyennement fracturé.		2		18	75			
	5			3		28	88			
	7			4		55	90			
	9			5		55	98			
50.86	9			6		75	95	10,0 m		
	11	Roc sain à très sain.		7		80	90			
	13			8		83	96			
	15			9		89	90			
	17			10		95	100	16,5 m		
43.59	17			11		87	100			
	19	Alternance de lits de moyenne à grande épaisseur de mudrock verte ou rouge à grains fins et de grès vert ou gris à grains très fins à moyens. Litage grand à serré, joints subhorizontaux en escaliers et obliques. Roc sain à très sain.Présence de fractures.		12		92	100			
	21			13		96	100			
	23			14		100	100			
	25			15		80	100			
	27			16		93	100			
	29			17		92	100			
	31			18		98	100			
	33			19		84	100			
	35			20		100	100			
	37			21		100	100			
	39			22		100	100			
	41			23		87	93			
	43			24		89	100			
	45			25		100	100	39,63 m		
	47			26		89	100	41,16 m		
	49			27		100	100	42,25 m		
	51			28		95	100			
				29		95	100			
				30		100	100			
				31		100	100			
9.9				32		89	94			
	51	Fin du sondage								

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-04

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pérolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-04

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 5 Décembre 2011

Élévation du sol (m): 76,52

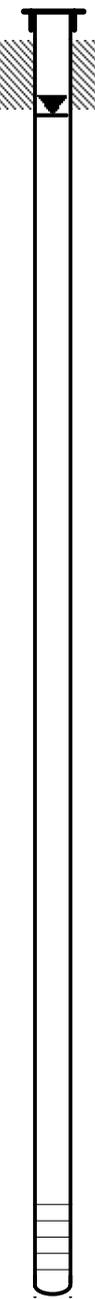
Élévation du tubage protecteur (m): 77,27

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 3,21

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 395 965,30

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 683,47

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
77.52	-1	Surface du Sol							9,91 m: 2 L/min	 <p>Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Élévation du niveau d'eau: 74,06 m (26 octobre 2012). Fin du tubage d'acier.</p> <p>Forage de 152 mm de diamètre avec tubage de CPV de 114 mm de diamètre.</p> <p>Crépine en CPV de 114 mm de diamètre.</p>
75.606	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès vert ou gris, à grains fins à moyens et de mudrock grise. Variation du degré de consolidation apparent (faible à bon). Présences de fractures.		2	G	-	-			
	5			3	G	-	-			
	7			4	G	-	-			
	9			5	G	-	-			
	11			6	G	-	-			
	13			7	G	-	-			
	15			8	G	-	-			
	17			9	G	-	-			
	19			10	G	-	-			
	21			11	G	-	-			
	23			12	G	-	-			
	25			13	G	-	-			
	27			14	G	-	-			
	29			15	G	-	-			
52.12	25	Grès conglomératique gris à grains fins. Consolidation apparente bonne à moyenne.		16	G	-	-			
	27			17	G	-	-			
	29			18	G	-	-			
	31			19	G	-	-			
	33			20	G	-	-			
	35			21	G	-	-			
	37			22	G	-	-			
39.92	37	Alternance de lits de grès gris et vert à grains moyens à grossiers. Présence de fractures.		23	G	-	-			
	39			24	G	-	-			
	41			25	G	-	-			
35.07	41			26	G	-	-			
		Fin du sondage		27	G	-	-			
				28	G	-	-			
								41,0 m: 2 L/min		

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-05

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé, au nord du PAD #4

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 3 Octobre 2012

Élévation du sol (m): 91,28

Élévation du tubage protecteur (m): 92,02

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 11,55

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 393 925,24

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 957,25

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
92.28	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier. Élévation du niveau d'eau: 85,84 m (26 octobre 2012). Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.
89.45	1	Dépôts meubles Sable silteux.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge, à grains fins à grossiers et de mudrock verte ou rouge. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à bon). Présences de fractures.	2	G	-	-			
	3			3	G	-	-			
	5			4	G	-	-			
	7			5	G	-	-			
	9			6	G	-	-			
	11			7	G	-	-			
	11			8	G	-	-	15,85 m		
	13			9	G	-	-			
	15			10	G	-	-			
	17			11	G	-	-	17,53 m		
	19			12	G	-	-			
	21			13	G	-	-			
	23			14	G	-	-	20,73 m		
	25			15	G	-	-			
	27			16	G	-	-			
	27			17	G	-	-			
	29			18	G	-	-	27,74 m: 2 L/min		
	29			19	G	-	-			
	31			20	G	-	-			
	31			21	G	-	-			
	33			22	G	-	-			
	35			23	G	-	-			
	37			24	G	-	-			
	37			25	G	-	-	37,49 m: 6 L/min		
	39			26	G	-	-			
	41			27	G	-	-			
48.61	41			28	G	-	-			
	43	Fin du sondage								

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-07

Client: PÉTROLIA / INRS

Élévation du sol (m): 98,34

Projet: Pérolia / Gaspé

Élévation du tubage protecteur (m): 99,00

No. de projet: PR11-92

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 16,19

Localisation: Gaspé POH-11-07

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 395 851,54

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 406 020,70

Foré par: Forage Lizotte

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Date du forage: 3 Décembre 2011

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
99.34	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier. Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert. Élévation du niveau d'eau: 82,81 m (26 octobre 2012).
97.73	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès ver ou gris à grains très fins à grossiers et de mudrock grise ou verte. Variation du degré de consolidation apparent (faible à bon).		2	G	-	-			
	5			3	G	-	-			
	7			4	G	-	-			
	9			5	G	-	-			
	11			6	G	-	-			
	13			7	G	-	-			
	15			8	G	-	-			
	17			9	G	-	-			
	19			10	G	-	-			
	21			11	G	-	-			
	23			12	G	-	-			
	25			13	G	-	-			
	27			14	G	-	-			
	29			15	G	-	-			
	31			16	G	-	-			
	33			17	G	-	-			
	35			18	G	-	-			
	37			19	G	-	-			
	39			20	G	-	-			
	41			21	G	-	-			
	43			22	G	-	-			
	45			23	G	-	-			
	47			24	G	-	-			
	49			25	G	-	-			
	51			26	G	-	-			
	53			27	G	-	-			
				28	G	-	-			
				29	G	-	-			
				30	G	-	-			
				31	G	-	-			
				32	G	-	-			
				33	G	-	-			
				34	G	-	-			
				35	G	-	-			

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-08

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-08

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 3 Décembre 2011

Élévation du sol (m): 98,51

Élévation du tubage protecteur (m): 99,10

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 13,26

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 395 851,54

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 406 020,70

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Schéma du puits	Détails de construction du puits
99.51	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier. Élévation du niveau d'eau: 85,84 m (26 octobre 2012). Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.
	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse.		1	G	-	-			
96.51	3	Roc Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge, à grains fins à grossiers et de mudrock verte ou grise. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à faible). Présences de fractures.		2	G	-	-			
	3			3	G	-	-			
	5			4	G	-	-			
	7			5	G	-	-			
	9			6	G	-	-			
	11			7	G	-	-			
	13			8	G	-	-			
	15			9	G	-	-			
	17			10	G	-	-			
	19			11	G	-	-			
	21			12	G	-	-			
	23			13	G	-	-			
	25			14	G	-	-			
	27			15	G	-	-			
	29			16	G	-	-			
	31			17	G	-	-			
	33			18	G	-	-			
	35			19	G	-	-			
				20	G	-	-			
				21	G	-	-			
		22	G	-	-					
		23	G	-	-					
62.55		Fin du sondage						29,0 m: 2 L/min		

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-09

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pérolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-09

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 30 Novembre 2011

Élévation du sol (m): 83,97

Élévation du tubage protecteur (m): 84,44

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 3,49

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 395 573,68

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 156,31

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
84.97	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Forage de 254 mm de diamètre. Élévation du niveau d'eau: 80,95 m (26 octobre 2012). Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier.
83.056	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge, à grains fins à grossiers et de mudrock grise. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à bon). Présences de fractures.		2	G	-	-			
	5			3	G	-	-			
	7			4	G	-	-			
	9			5	G	-	-			
	11			6	G	-	-	7,62 m		
	13			7	G	-	-			
	15			8	G	-	-			
	17			9	G	-	-			
	19			10	G	-	-			
65.67	19	Alternance de lits de grès conglomératique gris à grains fins à moyens et de grès vert, gris ou rouge à grains fins à grossiers. Variation du degré de consolidation apparent (bon à moyen). Présence de fractures.		11	G	-	-			
	21			12	G	-	-			
	23			13	G	-	-			
	25			14	G	-	-	24,4 m: 10 L/min		
	27			15	G	-	-			
	29			16	G	-	-			
	31			17	G	-	-			
	33			18	G	-	-			
	35			19	G	-	-			
	37			20	G	-	-			
	39			21	G	-	-			
	41			22	G	-	-	41,45 m: 78 L/min		
	43			23	G	-	-			
	45			24	G	-	-			
37.64	45			25	G	-	-			
	47	Fin du sondage		26	G	-	-	46,3 m: 78 L/min		
				27	G	-	-			
				28	G	-	-			
				29	G	-	-			
				30	G	-	-			
				31	G	-	-			

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-11

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétria / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Haldimand POH-11-11 (Crête)

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 28 Novembre 2011

Élévation du sol (m): 105,67

Élévation du tubage protecteur (m): 106,33

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 2,93

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 394 640,34

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 405 856,64

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
106.67	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Élévation du niveau d'eau: 103,40 m (26 octobre 2012). Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier. Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.
	1	Dépôts meubles	●	1	G	-	-			
	3	Till à matrice silto-sableuse avec traces de gravier.	●							
100.18	5		●							
	7	Roc	●	2	G	-	-			
	9	Grès gris à grains fins à grossiers. Consolidation apparente très faible. Présences de fractures.	●	3	G	-	-			
	11		●	4	G	-	-			
	13		●	5	G	-	-			
	15		●	6	G	-	-	13,11 m: 30 L/min		
	17		●	7	G	-	-			
	19		●	8	G	-	-			
	21		●	9	G	-	-			
	23		●	10	G	-	-			
	25		●	11	G	-	-			
	27		●	12	G	-	-			
	29		●	13	G	-	-			
	31		●	14	G	-	-			
	33		●	15	G	-	-			
	35		●	16	G	-	-			
	37		●	17	G	-	-			
	39		●	18	G	-	-	31,7 m: 48 L/min		
	41		●	19	G	-	-			
	43		●	20	G	-	-			
	45		●	21	G	-	-			
	47		●	22	G	-	-			
	49		●	23	G	-	-			
	51		●	24	G	-	-			
	53		●	25	G	-	-			
	55		●	26	G	-	-	43,0 m: 72 L/min		
	57		●	27	G	-	-			
	59		●	28	G	-	-			
	61		●	29	G	-	-			
	63		●	30	G	-	-			
	65		●	31	G	-	-			
38.57	67		●	32	G	-	-			
	69		●	33	G	-	-			
	71	Grès vert à grains fins à grossiers, consolidation apparente faible. Présence de fractures.	●	34	G	-	-			
	73		●	35	G	-	-			
	75		●	36	G	-	-	73,2 m: 120 L/min		
	77		●	37	G	-	-			
	79		●	38	G	-	-			
	81		●	39	G	-	-			
	83		●	40	G	-	-			
	85		●	41	G	-	-			
	87		●	42	G	-	-			
14.23	89		●					90,0 m: 240 L/min		
	91		●							
	93	Fin du sondage								

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-12

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-12

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 29 Novembre 2011

Élévation du sol (m): 119,44

Élévation du tubage protecteur (m): 119,92

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 5,07

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 394 628,99

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 406 859,00

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
120.44	-1	Surface du Sol								<p>Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol.</p> <p>Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite.</p> <p>Élévation du niveau d'eau: 114,84 m (26 octobre 2012).</p> <p>Fin du tubage d'acier.</p> <p>Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.</p>
118.22	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès vert, gris et rouge, à grains fins à grossiers. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à moyen). Présences de fractures.		2	G	-	-			
	3			3	G	-	-			
	5			4	G	-	-			
	7			5	G	-	-			
	9			6	G	-	-	8,53 m		
	11			7	G	-	-	10,05 m		
	13			8	G	-	-	11,88 m		
	15			9	G	-	-	12,8 m: 42 L/min		
	17			10	G	-	-			
	19			11	G	-	-	15,24 m: 60 L/min		
	21			12	G	-	-			
	23			13	G	-	-			
	25			14	G	-	-	20,42 m		
	27			15	G	-	-	21,34 m: 60 L/min		
	29			16	G	-	-			
	31			17	G	-	-			
	33			18	G	-	-	26,82 m: 72 L/min		
	35			19	G	-	-			
	37			20	G	-	-			
	39			21	G	-	-			
	41			22	G	-	-			
	41			23	G	-	-	33,83 m: 72 L/min		
	41			24	G	-	-			
	41			25	G	-	-			
	41			26	G	-	-			
	41			27	G	-	-			
79.21	41			Fin du sondage						

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-13

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-13

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 2 Décembre 2011

Élévation du sol (m): 86,115

Élévation du tubage protecteur (m): 87,04

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 3,01

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 394 426,47

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 391,18

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
87.115	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Élévation du niveau d'eau: 84,02 m (26 octobre 2012). Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite. Fin du tubage d'acier.
85.201	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse.		1	G	-	-			
	3	Roc Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge, à grains fins à grossiers et de mudrock verte ou rouge. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à bon). Présences de fractures.		2	G	-	-			
	5			3	G	-	-			
	7			4	G	-	-			
	9			5	G	-	-	5,79 m		
	11			6	G	-	-			
	13			7	G	-	-			
	15			8	G	-	-			
	17			9	G	-	-			
	19			10	G	-	-			
	21			11	G	-	-	15,84 m		
	23			12	G	-	-			
	25			13	G	-	-			
	27			14	G	-	-			
	29			15	G	-	-			
	31			16	G	-	-			
	33			17	G	-	-			
	35			18	G	-	-			
	37			19	G	-	-			
	39			20	G	-	-			
	41			21	G	-	-			
	41			22	G	-	-			
	41			23	G	-	-			
	41			24	G	-	-			
	41			25	G	-	-			
	41			26	G	-	-			
	41			27	G	-	-	40,23 m: 15 L/min		
44.967	41	Fin du sondage		28	G	-	-			

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-14

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Haldimand POH-11-14

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 29 Novembre 2011

Élévation du sol (m): 81,81

Élévation du tubage protecteur (m): 82,58

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 1,91

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 394 726,88

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 764,89

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Schéma du puits	Détails de construction du puits
82.81	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol.
	1	Dépôts meubles Till à matrice sableuse. Présence de graviers anguleux à subarrondis.	●●●●	1	G	-	-			Élévation du niveau d'eau: 80,66 m (26 octobre 2012).
	3									Forage de 254 mm de diamètre.
76.63	5	Roc	●●●●	2	G	-	-			Coulis de ciment-bentonite.
	7	Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge, à grains fins à grossiers et de mudrock verte ou grise. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à moyen). Présences de fractures.	●●●●	3	G	-	-			Fin du tubage d'acier.
	9			4	G	-	-			
	11			5	G	-	-			
	13			6	G	-	-	11,58 m: 195 L/min		
	15			7	G	-	-			
	17			8	G	-	-			
	19			9	G	-	-			
	21			10	G	-	-			
	23			11	G	-	-			
	25			12	G	-	-			
	27			13	G	-	-			
	29			14	G	-	-			
	31			15	G	-	-			
	33			16	G	-	-			
	35			17	G	-	-			
	37			18	G	-	-			
	39			19	G	-	-			
	41			20	G	-	-			
	41			21	G	-	-			
	41			22	G	-	-			
	41			23	G	-	-			
	41			24	G	-	-			
41.81	41	Fin du sondage						39,9 m: 34 L/min		Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-15

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé Pad #4

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 2 Octobre 2012

Élévation du sol (m): 84,41

Élévation du tubage protecteur (m): 84,92

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 4,02

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 393 946,77

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 642,55

Diamètre du forage (mm): 254 / 152

Élévation (m)	Profondeur (m)	Description géologique et environnementale	Symbole	Numéro	Type	N/R.Q.D	Récupération %	Profondeur des fractures, débits estimés	Shéma du puits	Détails de construction du puits
85.41	-1	Surface du Sol								Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol.
	1	Roc Alternance de lits de grès vert à grains fins à moyens et de mudrock verte. Variation du degré de consolidation apparent (très faible à moyen). Présences de fractures.		1	G	-	-			Forage de 254 mm de diamètre.
				2	G	-	-			Coulis de ciment-bentonite.
	3			3	G	-	-			Élévation du niveau d'eau: 80,90 m (26 octobre 2012).
	5			4	G	-	-			
	7			5	G	-	-			Fin du tubage d'acier.
	9			6	G	-	-	8,53 m		
				7	G	-	-	10,06 m		
	11			8	G	-	-			
	13			9	G	-	-	13,1 m		
	15			10	G	-	-	14,0 m		
				11	G	-	-			
67.65	17	Grès gris et vert à grains fins à moyens. Consolidation apparente très faible à moyenne. Présence de fractures.		12	G	-	-	17,37 m: 8 L/min		
	19			13	G	-	-			Crépine en CPV de 114 mm de diamètre.
64.61		Fin du sondage								

Annexe 4 – Compilation de documents (version complète sur CD)

Projet de règlement du MDDEFP du 29 mai 2013

Rapport de caractérisation de TechnoRem (2013)

Diagraphies (Crow et al., 2014)

Analyses de composés organiques (Ahad, 2014)

Rapport de toxicité (Tardif, 2013)

Annexe 5 – Fichiers de travail (sur CD)

Structure et fracturation

Bilan hydrologique

Pression hydrostatique

Analyse multivariée

Fichiers cartographiques

Fichiers de modélisation numérique