

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DES CONDITIONS
D'ÉCOULEMENT À DENSITÉ VARIABLE AU-DESSUS DU RÉSERVOIR
PÉTROLIER, SECTEUR HALDIMAND À GASPÉ**

Par
Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

Jury d'évaluation

Président du jury et
Examineur interne

Christine Rivard
Commission géologique du Canada, Québec

Examineur externe

Richard Jackson, Geofirma Engineering Ltd.
Adjunct prof., Earth and Environmental Sc.
University of Waterloo

Directeur de recherche

René Lefebvre
INRS – ETE, Québec

Codirecteurs de recherche

John Molson
Université Laval, Québec

Erwan Gloaguen
INRS – ETE, Québec

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier mon directeur René pour son dévouement, son encadrement et avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à faire mon projet. Je remercie aussi mon codirecteur John pour son appui et ses judicieux conseils en modélisation. Merci à Erwan pour son support et sa disponibilité. Merci à Morgan, mon coéquipier de tous les instants. Je tiens également à souligner la précieuse collaboration des gens de Pétrolia, du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques et de la Commission géologique du Canada pour leur collaboration. Merci à mes collègues étudiants pour les bonnes discussions constructives. Enfin, je remercie les membres du jury, le Dr. Richard Jackson et la Dre Christine Rivard pour avoir accepté de lire mon mémoire et d'évaluer mon travail.

RÉSUMÉ

Le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) a mandaté l'INRS pour réaliser une étude hydrogéologique du secteur Haldimand, à Gaspé. Cette étude avait pour but d'évaluer le risque pour la qualité de l'eau souterraine des opérations d'exploration pétrolière dans le secteur Haldimand, particulièrement par rapport à l'éventuel forage exploratoire Haldimand No.4. Ce mémoire s'inscrit dans cette étude dont la contribution a permis de définir les conditions hydrogéologiques, d'établir le modèle conceptuel hydrogéologique et de développer un modèle numérique de l'écoulement à densité variable le long d'une ligne d'écoulement. La simulation tient compte de la migration de sels et d'hydrocarbures dissous dans l'eau souterraine sans considérer de phase immissible (pétrole ou gaz). De plus, la voie potentielle de migration du méthane le long du forage pétrolier n'a pas été considérée.

Le secteur Haldimand est constitué d'un roc poreux et fracturé qui 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 étant 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.

La définition du contexte hydrogéologique a permis d'établir que les limites de partage des eaux souterraines sont définies par la topographie, d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la contamination en surface qui va de moyenne à très élevée, d'identifier les cours d'eau sensibles à une éventuelle contamination aux sites pétroliers, de montrer que les puits résidentiels et municipaux ne sont pas des récepteurs d'une éventuelle contamination, d'évaluer que la distance séparatrice (500 m) prévue par le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) du MDDELCC entre les forages pétroliers et les puits d'approvisionnement en eau est sécuritaire et que la localisation des puits d'observation leur permettrait de détecter une contamination avant qu'elle n'atteigne les récepteurs.

Avec les hypothèses utilisées, la modélisation numérique montre que la zone d'écoulement actif dans le secteur Haldimand est assez peu profonde (maximum d'environ 120 m sous NMM). L'eau douce se trouve jusqu'à environ 200 m (maximum) sous le niveau moyen de la mer

(NMM) dans le secteur Haldimand. Ainsi, la profondeur des eaux souterraines exploitables prévue par le RPEP (200 m) est pertinente. La modélisation montre aussi qu'il y a peu de liens entre la surface et la profondeur mais que des eaux évoluées et anciennes sont apportées sous Haldimand par l'écoulement régional. Les patrons d'écoulement peuvent donc apporter des eaux évoluées ayant de long temps de résidence (excédant 1 million d'années) de la profondeur vers les exutoires du système d'écoulement, particulièrement la rivière St-Jean. Selon le modèle, sous la péninsule 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 plus évoluées dont la répartition pourrait être influencée par un patron complexe de fracturation près de la surface du roc. L'émission éventuelle de fluides en profondeur par les puits pétroliers prendrait plusieurs milliers d'années à atteindre la surface sans des voies de migration préférentielle.

Mots-clés : Hydrogéologie, vulnérabilité, densité variable, modélisation, hydrocarbures, temps de résidence

ABSTRACT

INRS was mandated by the Quebec Environment Ministry (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, MDDELCC) to carry out a hydrogeological study of the Haldimand sector of Gaspé. This study aimed to assess the risk for groundwater quality related to petroleum exploration activities in the Haldimand sector, especially the planned Haldimand No.4 exploration borehole. This master thesis was carried out as part of the INRS study and its specific contributions are related to the definition of hydrogeological conditions, the production of a conceptual hydrogeological model and the development of a variable-density numerical model along a flow line. The model represents the migration of solutes and dissolved hydrocarbons in groundwater but does not consider immiscible phases (petroleum or gas). Furthermore, the potential methane migration path along petroleum wellbores was not considered.

In the Haldimand sector, porous and fractured rock is found in the subsurface and it represents a continuous regional aquifer. A variable thickness of low-permeability till covers the rock and acts as an aquitard. Natural fracturing of the rock and its permeability are controlled by their depth below the rock surface; the rock being more fractured in its top 20 m. Groundwater flows from topographic highs, which are preferential recharge zones, towards streams and the periphery of the Haldimand peninsula. The hydrogeological context involves groundwater divide lines controlled by topography and aquifer vulnerability going from intermediate to very high. Based on flow paths, streams would be receptors of an eventual contamination at petroleum drill sites, but residential and municipal wells would not be receptors of such an eventual contamination. The 500 m separation distance between petroleum boreholes and supply wells imposed by the MDDELCC's regulation on water and their withdrawal (Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection, RPEP) appears safe, and the locations of monitoring wells would allow them to detect groundwater contamination before it reaches receptors.

With the hypotheses used for its development, the numerical model shows that the active flow zone in the Haldimand sector is relatively shallow (maximum of about 120 m under sea level). Fresh water would reach down to 200 m (maximum) under sea level in the Haldimand sector. Thus the depth of exploitable groundwater inferred to be 200 m by the RPEP is representative.

The model also shows that there are limited links between surface and the depth of the petroleum reservoir, but that ancient and evolved groundwater is brought up under the Haldimand sector by the regional flow patterns. These flow patterns can thus bring evolved groundwater with long residence times (exceeding 1 million years) from depth to the discharge areas of the flow system, especially the St-Jean River. According to the model, under the Haldimand peninsula there would be groundwater having long residence times (1 000 to 10 000 years) at relatively shallow depths, which would explain the observation of evolved groundwater whose spatial distribution could be influenced by complex fracture patterns near the rock surface. Without preferential migration paths, the eventual emission of fluids at depth by petroleum wells would take many thousands of years to reach surface.

Keywords : Hydrogeology, vulnerability, density-dependent, modeling, hydrocarbons, residence time

TABLE DE MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCTION | 1 |
| 1.1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE..... | 1 |
| 1.2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE | 3 |
| 1.3. PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE | 4 |
| 1.3.1. GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES..... | 5 |
| 1.3.2. GÉOLOGIE DU SOCLE ROCHEUX | 5 |
| 2. TRAVAUX DE CARACTÉRISATION | 8 |
| 2.1. CARACTÉRISATION DE TECHNOREM EN 2011 ET 2012..... | 8 |
| 2.1.1. INSTALLATION DE PUIITS D'OBSERVATION ET CAROTTAGE..... | 8 |
| 2.1.2. ESSAIS HYDRAULIQUES ET PIÉZOMÉTRIE..... | 8 |
| 2.1.3. ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSE DE L'EAU SOUTERRAINE..... | 9 |
| 2.2. CARACTÉRISATION DU MDELCC EN 2013..... | 10 |
| 2.2.1. RÉSULTATS DES TRAVAUX DE GÉOCHIMIE | 11 |
| 2.2.2. SUIVI À LONG TERME DE LA NAPPE..... | 13 |
| 2.3. INTÉGRATION DES DONNÉES DANS UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG) | 13 |
| 3. CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES | 18 |
| 3.1. UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES ET FRACTURATION NATURELLE..... | 18 |
| 3.2. PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX..... | 18 |
| 3.2.1. ESSAIS HYDRAULIQUES DANS LES PUIITS D'OBSERVATION | 19 |
| 3.2.2. ESSAIS DE POROSITÉ ET PERMÉABILITÉ SUR DES CAROTTES..... | 19 |
| 3.3. CARTES ET COUPES HYDROGÉOLOGIQUES | 20 |
| 3.3.1. ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS QUATERNAIRES ET TOPOGRAPHIE DU ROC | 20 |
| 3.3.2. PIÉZOMÉTRIE ET CONDITIONS DE CONFINEMENT..... | 21 |
| 3.3.3. COUPE HYDROGÉOLOGIQUE..... | 24 |
| 3.4. SUIVI DE NAPPE | 26 |
| 3.4.1. SUIVI DE NAPPE ET RELEVÉS DE NIVEAU D'EAU | 26 |
| 3.4.2. HYDROGRAMMES DE PUIITS ET CONDITIONS DE RECHARGE ET CONFINEMENT..... | 28 |
| 3.5. ÉVALUATION DE LA RECHARGE DE L'AQUIFÈRE ROCHEUX | 35 |
| 3.5.1. INTERPRÉTATION D'UN HYDROGRAMME DE PUIITS EN ZONE DE RECHARGE | 35 |
| 3.5.2. BILAN HYDROLOGIQUE SUR L'ENSEMBLE DE LA RÉGION D'ÉTUDE | 37 |
| 3.6. VULNÉRABILITÉ DES AQUIFÈRES | 39 |
| 3.6.1. DESCRIPTION ET APPLICATION DE LA MÉTHODE DRASTIC | 39 |
| 3.6.2. CARTES INTERMÉDIAIRES | 39 |

| | | |
|-------------|--|------------------|
| 3.6.3. | CARTES DE VULNÉRABILITÉ DRASTIC..... | 44 |
| 3.7. | PÉTROLE ET FLUIDES PROFONDS | 46 |
| 3.7.1. | SUINTEMENTS D’HYDROCARBURES ET ANCIENS FORAGES PÉTROLIERS..... | 46 |
| 3.7.2. | INDICES DE FLUIDES DANS LES FORAGES PÉTROLIERS..... | 48 |
| 4. | <u>MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE</u> | <u>49</u> |
| 4.1. | SYSTÈMES D’ÉCOULEMENT CONSIDÉRÉS | 49 |
| 4.2. | PRINCIPE DE L’ÉCOULEMENT À DENSITÉ VARIABLE | 50 |
| 4.3. | DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE NUMÉRIQUE | 51 |
| 4.3.1. | LOGICIEL UTILISÉ..... | 51 |
| 4.3.2. | SUPPOSITIONS ET LIMITATIONS DE LA SIMULATION | 52 |
| 4.3.3. | MAILLAGE ET CONDITIONS LIMITES..... | 52 |
| 4.3.4. | PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES | 54 |
| 4.3.5. | PROPRIÉTÉS DU MODÈLE DE TRANSPORT | 55 |
| 4.3.6. | DISTRIBUTION DE LA RECHARGE | 57 |
| 4.3.7. | VÉRIFICATION DE LA DISCRÉTISATION | 57 |
| 4.3.8. | CALAGE..... | 60 |
| 4.4. | RÉSULTATS DES SIMULATIONS..... | 61 |
| 4.4.1. | ÉCOULEMENT DE L’EAU SOUTERRAINE | 61 |
| 4.4.2. | TRANSPORT DE MASSE | 62 |
| 4.4.3. | TEMPS DE RÉSIDENCE DE L’EAU SOUTERRAINE | 63 |
| 4.4.4. | CONDITIONS PROPRES À HALDIMAND..... | 65 |
| 4.4.5. | EFFET POTENTIEL DE FUITES DANS UN Puits PÉTROLIER ET DE DISCONTINUITÉS | 67 |
| 4.5. | ANALYSE DE SENSIBILITÉ..... | 70 |
| 4.5.1. | CHOIX DES PARAMÈTRES | 70 |
| 4.5.2. | RÉSULTATS DE L’ANALYSE DE SENSIBILITÉ..... | 73 |
| 5. | <u>CONCLUSIONS.....</u> | <u>85</u> |
| 5.1. | PRINCIPALES CONCLUSIONS | 85 |
| 5.2. | RECOMMANDATIONS | 87 |
| 5.3. | APPORTS SCIENTIFIQUES ET PRATIQUES..... | 88 |
| 6. | <u>RÉFÉRENCES</u> | <u>89</u> |
| | CARTES | 96 |

ANNEXE 1 – CONFERENCE GEOMONTREAL 2013

ANNEXE 2 – PROGRAMME ANALYTIQUE HALDIMAND

ANNEXE 3 – RESULTATS DE MESURES OU D’ANALYSES

ANNEXE 4 – INFORMATIONS SUR LES Puits D’OBSERVATION

ANNEXE 5 – FICHIERS DE TRAVAIL (SUR CD)

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|--------------|---|----|
| TABLEAU 2.1 | SOMMAIRE DES DONNÉES PUBLIQUES UTILISÉES | 15 |
| TABLEAU 2.2 | SOMMAIRE DES DONNÉES VECTORIELLES PRODUITES..... | 16 |
| TABLEAU 2.3 | SOMMAIRE DES DONNÉES MATRICIELLES PRODUITES | 17 |
| TABLEAU 3.1 | SUIVI LONG TERME POUR LES PUITES D'OBSERVATION INSTRUMENTÉS (FÉVRIER 2012 À SEPTEMBRE 2013)..... | 27 |
| TABLEAU 3.2 | SONDES MISES EN PLACE EN SEPTEMBRE 2013 | 27 |
| TABLEAU 3.3 | RELEVÉS MANUELS DU NIVEAU D'EAU (EN MÈTRES) POUR LES PUITES D'OBSERVATION | 28 |
| TABLEAU 3.4 | CLASSEMENT DES PUITES SELON LEURS CONDITIONS DE CONFINEMENT | 34 |
| TABLEAU 3.5 | PARAMÈTRES D'AJUSTEMENT DU NIVEAU D'EAU CALCULÉ PAR BILAN QUOTIDIEN..... | 37 |
| TABLEAU 3.6 | 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)..... | 39 |
| TABLEAU 3.7 | COTES ET POIDS DES PARAMÈTRES DE LA MÉTHODE DRASTIC (TRADUIT D'ALLER ET AL., 1987)..... | 41 |
| TABLEAU 3.8 | ATTRIBUTION DES COTES DRASTIC POUR LE TYPE D'AQUIFÈRE POUR L'AQUIFÈRE GRANULAIRE..... | 42 |
| TABLEAU 3.9 | ATTRIBUTION DES COTES DRASTIC POUR LE TYPE DE SOL | 43 |
| TABLEAU 3.10 | ATTRIBUTION DES COTES DRASTIC POUR L'IMPACT DE LA ZONE VADOSE..... | 44 |
| TABLEAU 3.11 | COORDONNÉES DES SUINTEMENTS ÉCHANTILLONNÉS | 47 |
| TABLEAU 3.12 | COORDONNÉES DES ANCIENS FORAGES PÉTROLIERS | 47 |
| TABLEAU 3.13 | SYNTHÈSE DES FLUIDES PROFONDS (DONNÉES TIRÉES DU SIGPEG) | 48 |
| TABLEAU 4.1 | CALCUL DU NOMBRE DE PECLLET | 60 |
| TABLEAU 4.2 | CALCUL DU NOMBRE DE COURANT | 60 |
| TABLEAU 4.3 | PARAMÈTRES ANALYSÉS EN COMPARAISON AVEC LE MODÈLE CALÉ..... | 72 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| FIGURE 1.1 GÉOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE TIRÉ DE PEEL (2014). 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. CARTE ET COUPE PRODUITS PAR M. PEEL. | 6 |
| FIGURE 3.1 MODÈLE CONCEPTUEL HYDROGÉOLOGIQUE, COUPE NORD-SUD LE LONG DE LA LIGNE AB (CARTES 1 ET 9). EXAGÉRATION VERTICALE ~20X. LES POINTS BLEUS INDIQUENT DES EAUX PEU ÉVOLUÉES GÉOCHIMIQUEMENT ALORS QUE CEUX BEIGES SONT MOYENNEMENT ÉVOLUÉS ET CEUX EN JAUNE SONT ÉVOLUÉS | 24 |
| FIGURE 3.2 HYDROGRAMMES DES PUIITS EN CONDITIONS LIBRES | 29 |
| FIGURE 3.3 HYDROGRAMMES DES PUIITS EN CONDITIONS SEMI-CAPTIVES ET CAPTIVES..... | 30 |
| FIGURE 3.4 HYDROGRAMMES DES PUIITS D'OBSERVATION DU 16 FÉVRIER AU 29 JUN 2012 POUR LES PUIITS D'OBSERVATION SITUÉS LE LONG DE LA COUPE AB (FIGURE 3.1; LOCALISATION À LA CARTE 9)..... | 31 |
| FIGURE 3.5 NIVEAU D'EAU ESTIMÉ PAR UN BILAN HYDROLOGIQUE QUOTIDIEN COMPARÉ À L'HYDROGRAMME DU PUIITS POH-11-09 POUR LA PÉRIODE DE FÉVRIER 2012 À SEPTEMBRE 2013..... | 36 |
| FIGURE 3.6 AIRES D'ALIMENTATION DES PUIITS DE LA VILLE DE GASPÉ. MODIFIÉ D'ARRAKIS (2011) | 45 |
| FIGURE 3.7 LOCALISATION DES SUIITEMENTS D'HYDROCARBURES DANS LE SECTEUR HALDIMAND | 46 |
| FIGURE 4.1 ÉCHANTILLON D'EAU DE FORMATION AU DROIT DU PUIITS PÉTRIOLIER HALDIMAND N° 1 (SDT : SOLIDES DISSOUS TOTAUX)..... | 50 |
| FIGURE 4.2 CONDITIONS INITIALES ET LIMITES DU MODÈLE NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT ET DE TRANSPORT LE LONG DE LA COUPE CD (LOCALISATION SUR LES CARTES 1 ET 33). EXAGÉRATION VERTICALE ~10X..... | 54 |
| FIGURE 4.3 DISTRIBUTION DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES (AGRANDISSEMENT SUR LES PREMIÈRES COUCHES DU MODÈLE) [EXAGÉRATION VERTICALE ~25X] | 55 |
| FIGURE 4.4 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)..... | 58 |
| FIGURE 4.5 PROFIL VERTICAL DES VITESSES LE LONG DE LA LIGNE AA' (FIGURE 4.4A) | 59 |
| FIGURE 4.6 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..... | 61 |
| FIGURE 4.7 CONCENTRATION RELATIVE SIMULÉE EN SEL ($C_{MAX} = 157\ 000$ MG/L) [EXAGÉRATION VERTICALE ~10X]..... | 63 |
| FIGURE 4.8 SIMULATION DE L'ÂGE ADVECTIF-DISPERSIF (COUPE CD; CARTE 1) ET LIGNES 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..... | 65 |

| | |
|---|----|
| FIGURE 4.9 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. | 66 |
| FIGURE 4.10 TRAÇAGE DE PARTICULES À PARTIR DU PUIT HALDIMAND N°4 PROJETÉ; INTERVALLE DE 50 000 ANS ENTRE LES PARTICULES (EXAGÉRATION VERTICALE ~6X)..... | 68 |
| FIGURE 4.11 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 ~10X) | 69 |
| FIGURE 4.12 ANALYSE PARAMÉTRIQUE - CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE GLOBALE | 77 |
| FIGURE 4.13 ANALYSE PARAMÉTRIQUE - CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE EN PROFONDEUR..... | 78 |
| FIGURE 4.14 ANALYSE PARAMÉTRIQUE – ANISOTROPIE EN PROFONDEUR | 79 |
| FIGURE 4.15 ANALYSE PARAMÉTRIQUE - POROSITÉ | 81 |
| FIGURE 4.16 ANALYSE PARAMÉTRIQUE - DISPERSIVITÉ POUR LE TRANSPORT DE SELS | 82 |
| FIGURE 4.17 ANALYSE PARAMÉTRIQUE – ÉLÉVATION DE LA NAPPE | 83 |
| FIGURE 4.18 ANALYSE PARAMÉTRIQUE – PROFILS DE SALINITÉ DE LONG DE LA LIGNE AA' (FIGURE 4.4A)..... | 84 |
| FIGURE 4.19 ANALYSE PARAMÉTRIQUE – PROFILS DE VITESSE DE LONG DE LA LIGNE AA' (FIGURE 4.4A)..... | 84 |

LISTE DES CARTES

| | | |
|----------|---|-----|
| CARTE 1 | LOCALISATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE..... | 97 |
| CARTE 2 | GÉOLOGIE DU QUATERNAIRE..... | 98 |
| CARTE 3 | GÉOLOGIE DU ROC..... | 99 |
| CARTE 4 | LOCALISATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DE TECHNOREM | 100 |
| CARTE 5 | LOCALISATION DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU MDDELCC | 101 |
| CARTE 6 | ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS QUATERNAIRES..... | 102 |
| CARTE 7 | CONTRÔLES SUR LES ÉPAISSEURS | 103 |
| CARTE 8 | ÉLÉVATION DE LA SURFACE DU ROC..... | 104 |
| CARTE 9 | PIÉZOMÉTRIE DE L'AQUIFÈRE AU ROC | 105 |
| CARTE 10 | PROFONDEUR DE LA NAPPE..... | 106 |
| CARTE 11 | CONFINEMENT DE L'AQUIFÈRE AU ROC..... | 107 |
| CARTE 12 | UTILISATION DU SOL | 108 |
| CARTE 13 | PENTE DE LA SURFACE DU SOL..... | 109 |
| CARTE 14 | GROUPE HYDROLOGIQUES..... | 110 |
| CARTE 15 | COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT..... | 111 |
| CARTE 16 | RECHARGE TOTALE..... | 112 |
| CARTE 17 | COTES DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE – AQUIFÈRE AU ROC | 113 |
| CARTE 18 | COTES DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE – AQUIFÈRE GRANULAIRE..... | 114 |
| CARTE 19 | COTES DE LA RECHARGE – AQUIFÈRE AU ROC..... | 115 |
| CARTE 20 | COTES DE LA RECHARGE – AQUIFÈRE GRANULAIRE..... | 116 |
| CARTE 21 | COTES DES TYPES D'AQUIFÈRE – AQUIFÈRE AU ROC | 117 |
| CARTE 22 | COTES DES TYPES D'AQUIFÈRE – AQUIFÈRE GRANULAIRE | 118 |
| CARTE 23 | COTES DES TYPES DE SOL – AQUIFÈRE AU ROC | 119 |
| CARTE 24 | COTES DES TYPES DE SOL – AQUIFÈRE GRANULAIRE | 120 |
| CARTE 25 | COTES DE LA TOPOGRAPHIE (PENTE) – AQUIFÈRE AU ROC | 121 |
| CARTE 26 | COTES DE LA TOPOGRAPHIE (PENTE) – AQUIFÈRE GRANULAIRE..... | 122 |
| CARTE 27 | COTES POUR LA ZONE VADOSE – AQUIFÈRE AU ROC | 123 |
| CARTE 28 | COTES POUR LA ZONE VADOSE – AQUIFÈRE GRANULAIRE | 124 |
| CARTE 29 | COTES POUR LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE – AQUIFÈRE AU ROC | 125 |
| CARTE 30 | COTES POUR LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE – AQUIFÈRE GRANULAIRE | 126 |
| CARTE 31 | CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ – AQUIFÈRE AU ROC | 127 |
| CARTE 32 | CARTE DE LA VULNÉRABILITÉ – AQUIFÈRE GRANULAIRE | 128 |
| CARTE 33 | DÉPÔTS QUATERNAIRES ET GÉOLOGIE LE LONG DE LA COUPE MODÉLISÉE | 129 |

1. INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte et problématique

Tout récemment, 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). Au Canada, les ressources potentielles de gaz naturel non conventionnel sont considérables et estimées à plus de 3 300 Tcf (*Trillion cubic feet*) [Rivard 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 présentement a été affectée ou non par ces activités, d'où l'importance d'établir la qualité naturelle des eaux souterraines avant l'exploitation. Plusieurs auteurs ont publié sur les mécanismes potentiels de dégradation de la qualité de l'eau souterraine par les activités d'exploration et d'exploitation des ressources en hydrocarbures (US EPA, 2012; Kissinger et al., 2013; Jackson et al., 2013; Gassiat et al., 2013; Watson, 2013; AER, 2013; CAC, 2014).

Depuis plus de 100 ans, la région de la Gaspésie constitue une cible pour l'exploration pétrolière (Mc Gerrigle, 1950). Des suintements d'hydrocarbures sont d'ailleurs visibles à la surface du sol à plusieurs endroits (Raynauld et al., 2014; Mc Gerrigle, 1950). Le développement technologique récent de l'industrie pétrolière pour l'exploitation des ressources non conventionnelles comme les forages horizontaux et la fracturation hydraulique a ravivé l'intérêt de l'exploration pétrolière pour certains sites comme celui d'Haldimand. Toutefois, la croissance rapide de cette industrie n'a pas été supportée par des travaux de recherche et de surveillance concernant les incidences environnementales (CAC, 2014). La crainte des citoyens de Gaspé face aux travaux d'exploration pétrolière a entraînée l'adoption en décembre 2012 d'un règlement municipal visant à protéger l'eau souterraine qui a eu pour effet d'arrêter des travaux de forage de Pétrolia au site Haldimand n°4.

L'intérêt du public face à l'exploration des pétrolières a soulevé beaucoup de questionnements. Afin de répondre à ces interrogations des comités d'experts scientifiques ont vu le jour au Québec (ÉES, 2014) et au Canada (CAC, 2014). Ces comités ont permis de mettre

en lumière les lacunes sur les connaissances liées à l'exploration et l'exploitation actuelle des gaz et pétroles de schiste tout en tenant compte des craintes de la population face à cette industrie.

Parmi les lacunes relevées par le CAC, on note l'intégrité des puits, la relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface, l'émission de gaz à effet de serre, les incidences sur le territoire et l'activité sismique, la santé humaine, la surveillance et la recherche.

L'intérêt pour ces ressources et le manque d'encadrement a amené le gouvernement du Québec à établir des règlementations environnementales plus appropriées. Cela a mené au dépôt d'un projet de règlement en mai 2013 prévoyant l'obligation de la part des compagnies d'exploration pétrolière et gazière de faire une étude hydrogéologique avant le début des activités de forage dans un rayon de deux kilomètres autour des forages pétroliers ou gaziers projetés (MDDELCC, 2013). Le Règlement sur le prélèvement et la protection de l'eau, RPEP, a finalement été adopté en 2014 (MDDELCC, 2014). Cette étude doit notamment faire l'estimation du risque environnemental et l'évaluation des liens potentiels entre les unités productrices d'hydrocarbures et des aquifères de surface. C'est dans ce contexte que le gouvernement provincial a décidé d'utiliser le site d'exploration pétrolière d'Haldimand en tant qu'exemple de caractérisation hydrogéologique en mandatant l'INRS pour réaliser la caractérisation hydrogéologique dans le but d'établir le risque lié à l'exploitation pétrolière à Haldimand.

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.

Ce mémoire s'inscrit dans l'étude de l'INRS et sa contribution est de définir les conditions hydrogéologiques, d'établir le modèle conceptuel hydrogéologique et de développer un modèle numérique de l'écoulement à densité variable le long d'une ligne d'écoulement.

1.2. Objectifs de l'étude

L'importance de comprendre le système d'écoulement en profondeur nécessite de tenir compte du patron d'écoulement régional. On ne peut pas dissocier l'écoulement local sous Haldimand de l'écoulement régional pour comprendre ce qui se passe en profondeur. La considération d'une échelle intermédiaire entre l'échelle locale et l'échelle de bassin est originale en hydrogéologie où l'un ou l'autre des deux systèmes est généralement étudié. Ici l'étude des deux systèmes était nécessaire pour comprendre les liens entre les aquifères de surfaces et la profondeur. Cette étude régionale tient également compte des interfaces entre des eaux de différentes salinités qu'on retrouve en profondeur. La modélisation de l'écoulement à densité variable est également un aspect novateur de ce projet.

L'objectif principal des travaux de maîtrise est de définir le contexte hydrogéologique du secteur Haldimand et de comprendre la dynamique d'écoulement à densité variable entre les aquifères de surface et ceux en profondeur au-dessus du réservoir pétrolier.

Plus spécifiquement, la définition du contexte hydrogéologique vise à : évaluer la vulnérabilité des aquifères par rapport aux activités en surface; évaluer la recharge des eaux souterraines; définir les liens entre les eaux souterraines et les eaux de surface; définir les directions d'écoulement des eaux souterraines dans les aquifères; définir les effets réels ou potentiels des puits de recherche ou d'exploitation d'hydrocarbures abandonnés, incluant les sites connus de suintements d'hydrocarbures sur la qualité des eaux souterraines et de surface; faire 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 d'exploration ou d'exploitation d'hydrocarbures, notamment le site Haldimand n° 4 de la compagnie Pétrolia, serait à l'origine d'une contamination des eaux souterraines.

Deux types de contamination potentielle concernent le site d'Haldimand : 1) les hydrocarbures et sels dissous, et 2) les produits immiscibles dans l'eau (pétrole et gaz naturel). La simulation de l'écoulement à densité variable est réalisée à l'aide du logiciel SALTFLOW qui tient compte de la migration de sels et d'hydrocarbures dissous sans considérer de phase immiscible. La modélisation numérique a pour but d'assurer une compréhension quantitative du système d'écoulement régional de l'eau souterraine. Ainsi, la voie potentielle de migration du méthane le long du forage pétrolier n'a pas été considérée par la modélisation qui vise la représentation du système régional et non pas l'entourage immédiat du puits pétrolier. On cherche plutôt à comprendre les liens entre l'aquifère et les parties profondes (réservoir à environ un kilomètre de profondeur), les modes et les temps de migration d'éventuels contaminations et l'incidence d'émission de fluides en profondeur. La modélisation a également pour objectif de mettre en relation les conditions d'écoulement obtenues par la caractérisation avec les observations sur la géochimie de l'eau souterraine de Peel (2014).

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 à la section 3.7.1. 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. Tel que 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, Raynauld et al., 2014). 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 représente l'actuelle source d'approvisionnement en eau pour l'aqueduc de la ville de Gaspé.

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

La géologie du socle rocheux à l'intérieur de la zone d'étude est principalement constituée de deux unités d'âge Dévonien. Ces deux unités, le Battery Point à l'est et le York River à l'ouest, sont séparées par la faille du Bras-Nord-Ouest (Carte 3). À l'ouest de cette faille, la formation du York River affleure par endroit, tandis qu'à l'est de la faille, le York River se trouve sous le Battery Point et atteint une profondeur de plus de 1000 m. Le contexte géologique lithostructural est présenté par la coupe illustrée à la figure 1.1 (Peel, 2014).

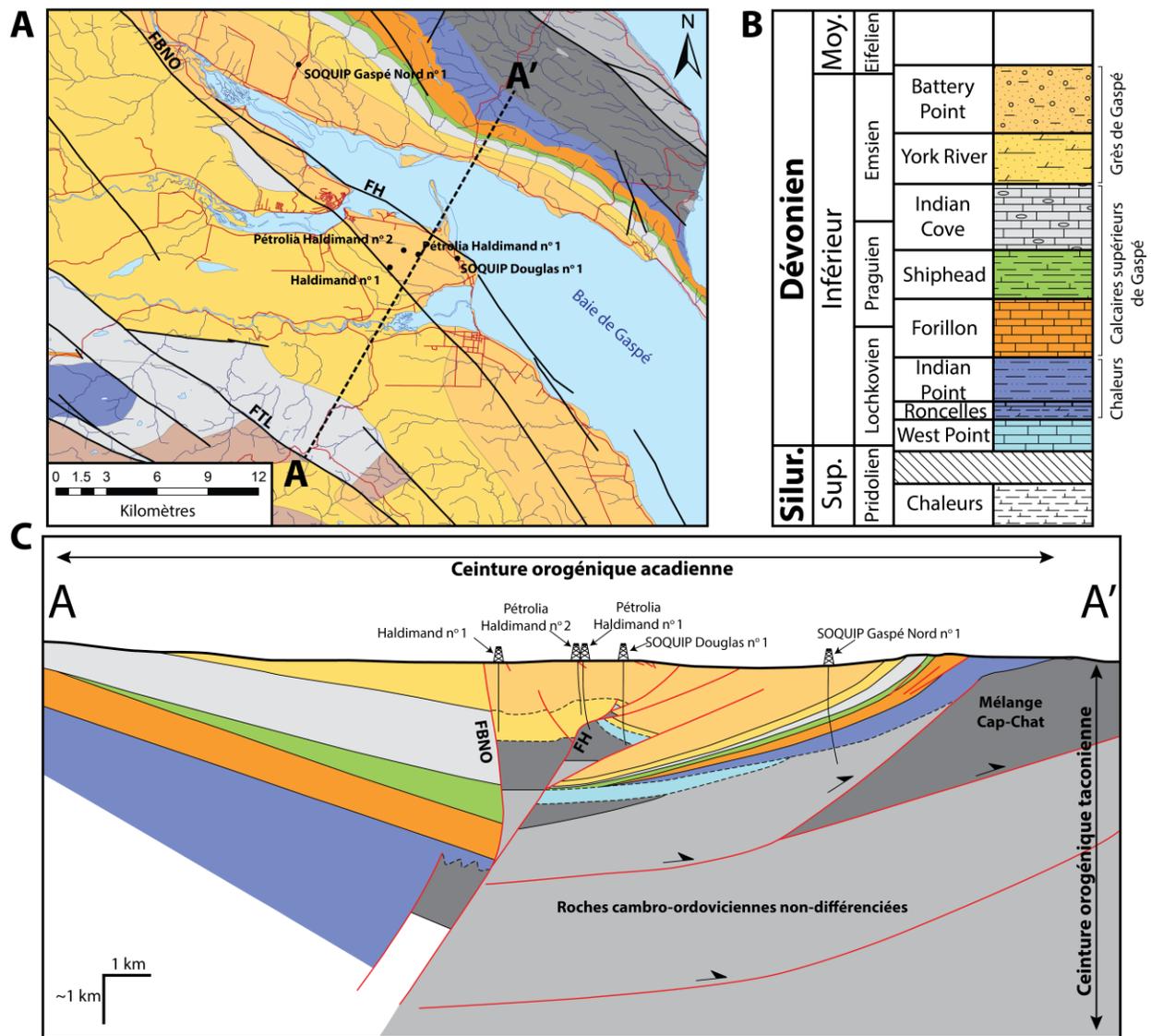


Figure 1.1 Géologie de la zone d'étude tiré de Peel (2014). A) Carte géologique de la région d'étude, avec l'emplacement de la coupe A-A'. Modifiée de Brisebois et Nadeau (2003) et de Pinet et al. (2005); B) Colonne lithostratigraphique des formations retrouvées dans la région d'Haldimand. Modifiée de 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. Carte et coupe produits par M. Peel.

Le Battery Point est une formation fluviatile composée de grès et de mudrocks (Desbiens, 1990). La formation du York River s'inscrit dans une séquence régressive marine-continentale qui se compose également de grès et mudrocks (Desbiens, 1990). Le York River constitue le réservoir pétrolier situé à l'est sous le Battery Point, entre les profondeurs d'environ 630 à 1200 m (Pétrolia, 2012). Ces formations sont plissées selon un anticlinal orienté ESE-ONO. Le site

d'Haldimand est recoupé par deux failles importantes, la faille du Bras-Nord-Ouest et la faille Haldimand (Carte 3).

Au niveau du réservoir, les travaux de Peel (2014) ont permis d'évaluer l'isolement hydraulique du réservoir pétrolier par rapport à l'aquifère rocheux superficiel. Les pressions de réservoir élevées montrent que ce dernier est isolé hydrauliquement de l'aquifère de surface.

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 cette 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 MDDELCC à l'été et à l'automne 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 sommairement l'ensemble des travaux de caractérisation puisqu'ils ont permis de constituer la base de données utilisée pour l'étude.

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 l'échantillonnage et analyse chimique des eaux souterraines.

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 3.2 :

- 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 3.4.

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 et à des analyses spécialisées sur une partie des échantillons (section 2.1.3.1). 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 et spécialisées

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. L'interprétation initiale de ces résultats a

été présentée à la conférence GéoMontréal 2013 (Raynauld et al., 2013; annexe 1). Toutefois, l'analyse de Peel (2014) a démontré qu'il existe un doute sur la qualité de ces données compte tenu qu'une forte proportion présente un bilan de charge supérieur à 15%. Les données de cette campagne n'ont donc pas pu être utilisées pour évaluer l'évolution de la qualité de l'eau entre 2012 et 2013 ou des effets saisonniers.

Un échantillonnage pour les analyses spécialisées s'est concentré sur certains sites d'échantillonnage. Les analyses spécialisées comprennent les isotopes stables, l'activité de radioisotopes ainsi que l'analyse de composés organiques. Le Tableau A2.2 de l'annexe 2 indique les sites pour lesquels des analyses spécialisées ont été réalisées à l'automne 2012. Ces analyses sont décrites par Raynauld et al. (2014) et interprétées plus en détail par Peel (2014).

2.2. Caractérisation du MDDELCC en 2013

Dans le cadre d'une caractérisation de la qualité des eaux souterraines réalisée sous la responsabilité du MDDELCC, 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 (RPEP) publié à la *Gazette officielle du Québec* du 29 mai 2013 (MDDELCC, 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 MDDELCC. 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.

Cette campagne d'échantillonnage comprend un programme analytique de base et un programme analytique spécialisé décrits plus en détail par Raynauld et al. (2014). Les tableaux de l'annexe 2 présente les paramètres et sites visés par les différents programmes.

Le programme analytique de base comprend l'analyse des paramètres prévus dans l'annexe II du projet de règlement (RPEP). 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 MDDELCC en 2013. Les cases vides représentent les paramètres qui ont été ajoutés à la campagne d'échantillonnage du MDDELCC 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.

2.2.1. Résultats des travaux de géochimie

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. Un portrait initial géochimique et hydrogéologique exhaustif a été dressé lors du projet du MDDELCC. Peel (2014) fait une interprétation plus détaillée de la géochimie laquelle a permis de mettre en relation les conditions d'écoulement obtenues par la caractérisation avec les observations sur la géochimie de l'eau. Entre autre, l'évolution chimique et le temps de résidence analysés (^{14}C et tritium) ont permis de faire des liens avec le système d'écoulement du modèle conceptuel hydrogéologique (section 3.3.3). Les observations géochimiques ont également permis de faire des liens avec les résultats des modèles numériques couplé écoulement-transport et du temps de résidences de l'eau souterraine (section 4.4). Les principales conclusions des résultats tirées de Peel (2014) sont décrites ici.

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. 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. 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 qu'une partie de l'eau souterraine provient des précipitations, puisqu'il y a une proportion d'eau jeune, et donc de la recharge presque partout, mais 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 MDDELCC, 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. Les données recueillies ont permis d'observer que les suintements S1 et POT2 ont une signature des COV similaire à celle de l'huile d'Haldimand (Peel, 2014). Le suintement S1 montre une dégradation importante (absence des alcanes à chaîne plus courtes) tandis que le suintement POT2 est moins bien dégradé, donc plus frais. Toutefois, les données recueillies n'ont pas permis de déterminer avec certitude la source et l'activité de ce suintement. Pour ce qui est des concentrations en méthane, trois puits résidentiels et sept puits d'observation dépassent le seuil d'alerte du MDDELCC pour le 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. L'origine d'une contamination en eaux de production, en pétrole ou en gaz d'origine profonde pourrait être reconnue à partir de la composition chimique et isotopique des fluides profonds qui est distincte de celle de l'eau et du méthane retrouvés dans l'aquifère.

2.2.2. Suivi à long terme de la nappe

Les données des trois sondes de lecture de niveau d'eau mises en place par TechnoRem en novembre 2012 ont été téléchargées à l'automne 2013 lors des travaux d'échantillonnage du MDDELCC. 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 3.4. Les données enregistrées par les sondes de pression permettent de tracer les hydrogrammes de puits présentés à la section 3.4.

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 la base de données géoréférencées *Haldimand-Final.gdb* de l'annexe 5 (dossier *A5-2-FichiersCartographiques* sur le CD).

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 ¹ et forages au diamant | MRN | GCS_North_American_1983 | Vectorel |
| Réseau d'aqueduc de Gaspé | Transmis par TechnoRem | NAD83_Zone_5_Metre_Quebec_New foundland_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 (MDDELCC)

¹ Les coordonnées pour les forages pétroliers ont été corrigées avec les coordonnées réelles (section 3.7.1). Le fichier vectorel contient également les coordonnées d'origines.

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 MDDELCC | EchMDDELCC | Créé à partir d'un tableau de données | 5 |
| Échantillons TechnoRem | EchTechnoRem | Créé à partir d'un tableau de données | 4 |
| Échantillons 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 MDDELCC | 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 MDDELCC | PuitsResidentielGASP_300m | <i>Buffer</i> de 300 m des puits MDDELCC vs PH-04 | 36 |
| Rayon de 300 m des puits LNA 2008 | PuitsResidentielLNA_300m | <i>Buffer</i> de 300 m des puits LNA 2008 vs PH-04 | 36 |
| Rayon de 300 m des puits TechnoRem | PuitsResidentielTechnoRem_300m | <i>Buffer</i> de 300 m des puits TechnoRem 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 3.3.1 | 6 et 7 |
| Élévation de la surface du roc | TopoRoc | Décrit à la section 3.3.1 | 8 |
| Piézométrie | Piezo | Décrit à la section 3.3.2 | 9 |
| Profondeur de la nappe | ProfNappe | Décrit à la section 3.3.2 | 10 |
| Zones de confinement | Confinement | Décrit à la section 3.3.2 | 11 |
| <i>Production de la carte de la recharge (carte 16)</i> | | | |
| Utilisation du sol | UtilisationSol | Décrit à la section 3.5.2 | 12 |
| Pentes générées pour le calcul du coefficient de ruissellement | Pente | Décrit à la section 3.5.2 | 13 |
| Groupes hydrologiques | GroupeHydro | Décrit à la section 3.5.2 | 14 |
| Coefficient de ruissellement | CN | Décrit à la section 3.5.2 | 15 |
| Recharge totale | Recharge | Décrit à la section 3.5.2 | 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 3.6.2.1 | 17 |
| Cotes de la recharge | R-Roc | Décrit à la section 3.6.2.2 | 19 |
| Cotes des types d'aquifère | A-Roc | Décrit à la section 3.6.2.2 | 21 |
| Cotes des types de sol | S-Roc | Décrit à la section 3.6.2.4 | 23 |
| Cotes de la topographie (pente) | T-Roc | Décrit à la section 3.6.2.5 | 25 |
| Cotes pour la zone vadose | I-Roc | Décrit à la section 3.6.2.6 | 27 |
| Cotes pour la conductivité hydraulique | C-Roc | Décrit à la section 3.6.2.7 | 29 |
| Carte de la vulnérabilité | DRASTIC-Roc | Décrit à la section 3.6.3 | 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 3.6.2.1 | 18 |
| Cotes de la recharge | R-Depot | Décrit à la section 3.6.2.2 | 20 |
| Cotes des types d'aquifère | A-Depot | Décrit à la section 3.6.2.2 | 22 |
| Cotes des types de sol | S-Depot | Décrit à la section 3.6.2.4 | 24 |
| Cotes de la topographie (pente) | T-Depot | Décrit à la section 3.6.2.5 | 26 |
| Cotes pour la zone vadose | I-Depot | Décrit à la section 3.6.2.6 | 28 |
| Cotes pour la conductivité hydraulique | C-Depot | Décrit à la section 3.6.2.7 | 30 |
| Carte de la vulnérabilité | DRASTIC-Depot | Décrit à la section 3.6.3 | 32 |

3. CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Les conditions hydrogéologiques ont été interprétées à partir des données recueillies lors des travaux de caractérisation décrits au chapitre précédent. La présente section décrit la méthode de production des cartes et autres travaux ainsi que l'interprétation des conditions hydrogéologiques pour le secteur d'Haldimand.

3.1. Unités hydrogéologiques et fracturation naturelle

Les travaux de diagraphies réalisés par Heather Crow en 2012 ainsi que l'analyse de la fracturation réalisée par Peel (2014) ont permis de démontrer que la fracturation du roc est plus importante en surface jusqu'à une profondeur d'environ 20 m. Les travaux de diagraphies ont permis de définir trois unités lithologiques distinctes dans la région d'étude (Crow et al., 2014). L'unité supérieure est définie par un grès fin à moyen dont la nature de la fracturation n'a pu être déterminée par manque de données. La seconde unité est constituée d'un grès grossier à moyen à sa base qui devient plus fin dans la partie supérieure. L'unité observée à la base est un grès fin à très fin et mudstones avec intervalles de grès grossiers. La fracturation observée lors de ces travaux révèle une diminution des fractures naturelles avec la profondeur, particulièrement les fractures actives hydrauliquement. L'analyse structurale de la fracturation a permis de déterminer que les fractures actives sont en majorité subhorizontales dans l'aquifère rocheux superficiel (Peel, 2014).

3.2. 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 elle-même et du milieu poreux fracturé qui constitue l'aquifère rocheux.

3.2.1. 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). Le puits POH-11-06 est artésien. Il est muni d'un obturateur pour éviter l'écoulement de l'eau. L'essai n'a donc 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. Le débit s'est stabilisé à environ 120 m³/jour (22 gal US/min) après 42 heures de pompage. 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 3). 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. Ces valeurs de conductivité hydrauliques ont été utilisées dans la conception du modèle numérique décrit à la section 4.

3.2.2. Essais de porosité et perméabilité sur des carottes

Des essais de porosité et de perméabilité sur des échantillons de carottes prélevées lors du forage par carottage des puits POH-11-03 et POH-11-10 ont été confiées au laboratoire Core Lab de Calgary. L'interprétation de ces essais est détaillée par Raynauld et al. (2014) et le tableau de résultat est présenté à l'annexe 3. L'analyse a révélé que la porosité de la matrice du roc est relativement élevée, soit de l'ordre de 5 à 10%. Cette grande porosité de la matrice peut résulter en un temps de résidence de l'eau souterraine relativement long. Les résultats de porosité

montrent également une diminution de la porosité avec la profondeur. Cette caractéristique a été utilisée dans le modèle numérique. La conductivité hydraulique estimée pour la matrice de l'aquifère rocheux à partir des perméabilités à l'air mesurées varie d'environ 4×10^{-7} m/s à 1×10^{-6} m/s. Ces valeurs peuvent toutefois être surestimées compte tenu de la conversion de la perméabilité à l'air en conductivité hydraulique.

3.3. 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.

3.3.1. 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 forages indiquant la profondeur du roc sous les dépôts meubles. Les paramètres d'interpolation (variogramme et voisinage) ont été optimisés par validation croisée afin de minimiser la moyenne des erreurs au carré et la moyenne des erreurs. 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. Les coordonnées de ces forages ainsi que toutes les données utilisées pour l'interpolation se retrouvent dans le fichier *DonneesHaldimand* qui est joint en annexe 5. Afin de combler l'absence de données dans des zones sans information, des points correspondant aux données quaternaires ont été ajoutés (données quaternaires attribuées, carte 7), soit des valeurs de 0 m dans les zones de roc altéré (Q) et de 1 m dans les zones de till mince (Tm). 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 3.4.1).

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.

3.3.2. 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. Les résultats obtenus par validation croisée (moyenne des erreurs absolues) permettent 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 (↑) et vers le bas (↓), indiquent le sens de l'écoulement vertical observé dans certains puits lors des travaux de diagraphie avec le débitmètre (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 3.2).

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 3.4 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 supporte 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.

3.3.3. Coupe hydrogéologique

La coupe AB de la figure 3.1 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).

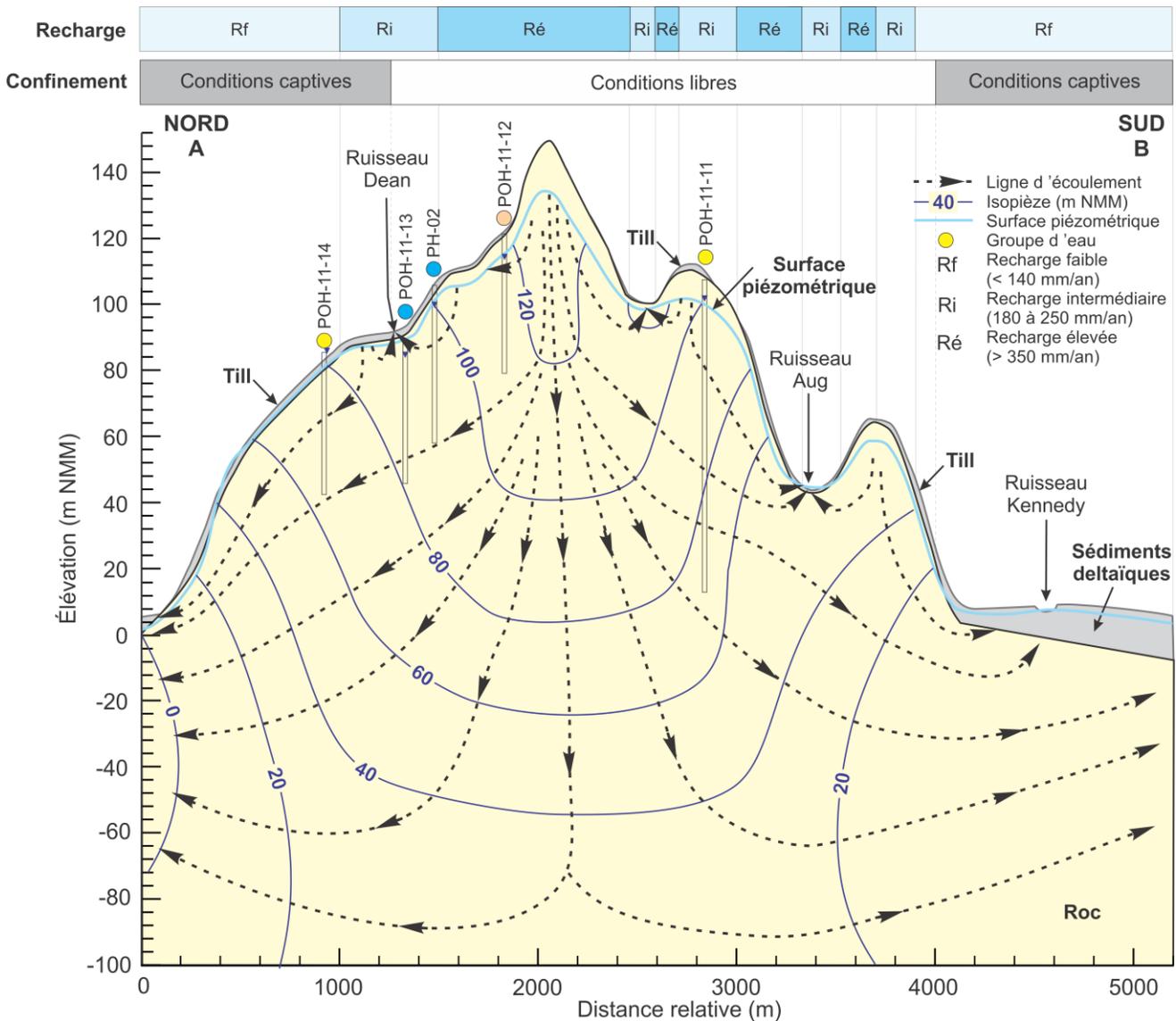


Figure 3.1 **Modèle conceptuel hydrogéologique, coupe nord-sud le long de la ligne AB (cartes 1 et 9). Exagération verticale ~20x. Les points bleus indiquent des eaux peu évoluées géochimiquement alors que ceux beiges sont moyennement évolués et ceux en jaune sont évolués**

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; section 3.5) 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 équipotentiels des charges hydrauliques dont les valeurs sont indiquées en mètres (élévation par rapport au niveau moyen de la mer, NMM).

Les cercles colorés apparaissant au-dessus des forages font référence aux groupes d'eau définis par Peel (2014) sur la base d'une analyse hiérarchique regroupée. La couleur des cercles représentés ici représente des eaux peu évoluées en bleu (SDT = 65 mg/L), moyennement évoluées en beige (SDT = 138 mg/L) et évoluées en jaune (SDT = 159 mg/L). 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 (Peel, 2014).

3.4. Suivi de nappe

3.4.1. 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 (*A3-SuiviNappe-Haldimand.xlsx*) sont joints à l'annexe 3.

Le tableau 3.1 présente les puits d'observation qui ont été munis d'une sonde ainsi que leur période de suivi. Les différents tons de gris représentent différentes périodes de suivis à la fin desquelles les sondes étaient retirées pour en télécharger les données. Les données extraites des capteurs de pression sont jointes à l'annexe 3.

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 3.4.2.

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 3.2 indique quels puits sont instrumentés depuis septembre 2013.

fonction des saisons. Ce phénomène est encore mieux illustré par les hydrogrammes de puits qui sont présentés à la section suivante.

3.4.2. 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.

Tableau 3.3 Relevés manuels du niveau d'eau (en mètres) pour les puits d'observation

| <i>Date</i> | <i>TechnoRem</i> | | | <i>MDDELCC</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.*

3.4.2.1. Hydrogrammes et conditions de recharge et confinement

Les hydrogrammes ont été regroupés par condition de confinement. La figure 3.2 présente les hydrogrammes pour les puits qui sont considérés en conditions libres et la figure 3.3 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 3.4 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).

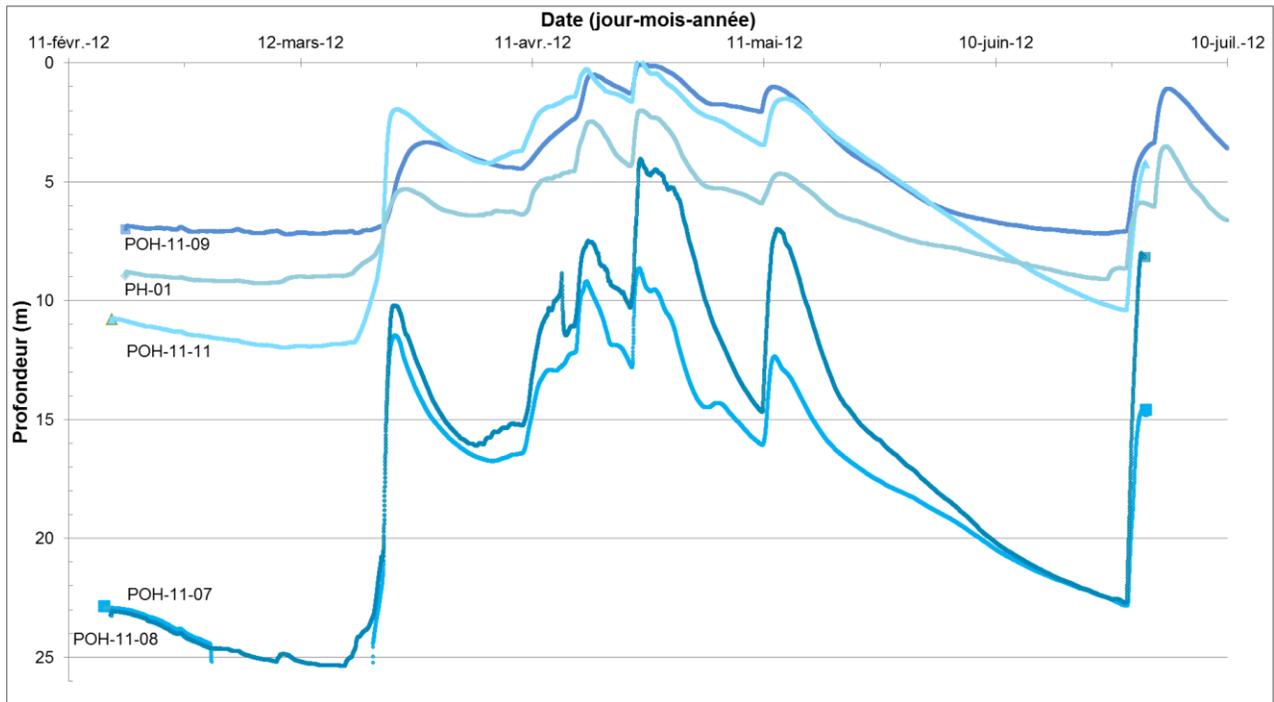


Figure 3.2 Hydrogrammes des puits en conditions libres

Aux endroits où les conditions sont libres, la figure 3.2 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 3.2.2). 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 3.3 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).

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.

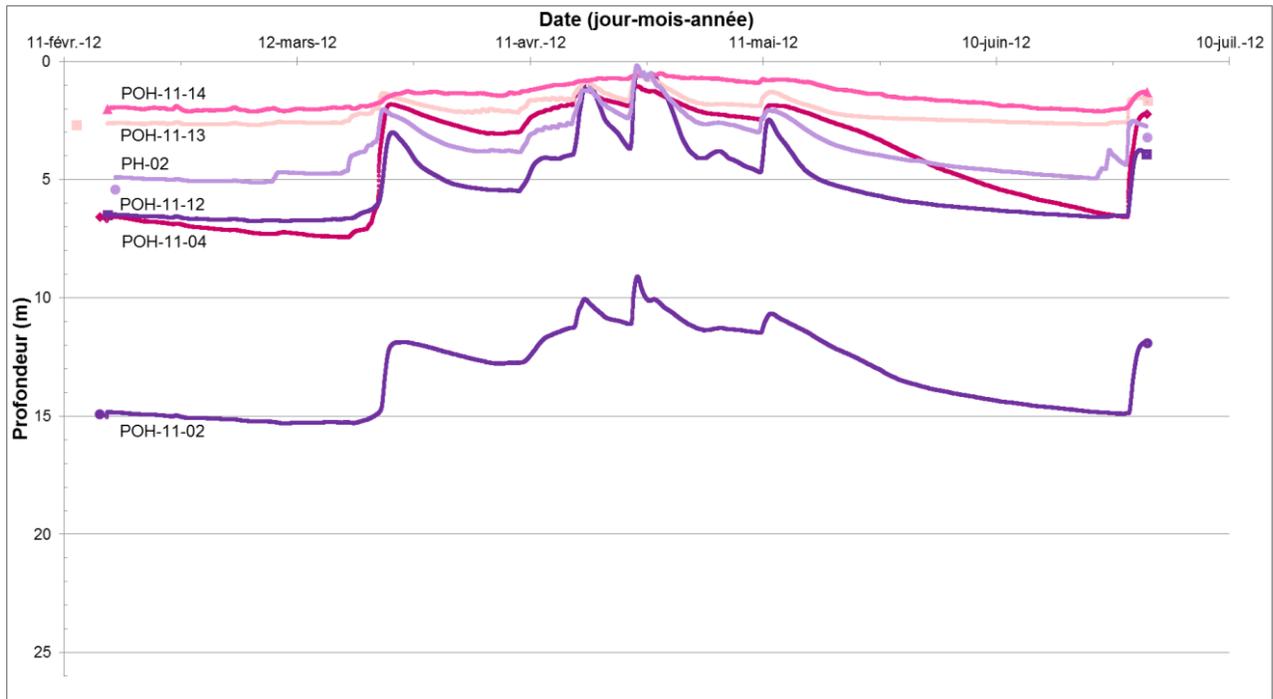


Figure 3.3 Hydrogrammes des puits en conditions semi-captives et captives

3.4.2.2. Hydrogrammes le long de la coupe AB

La figure 3.4 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 3.4 montre des courbes correspondant à la température moyenne de l'air et aux précipitations totales quotidiennes. 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.

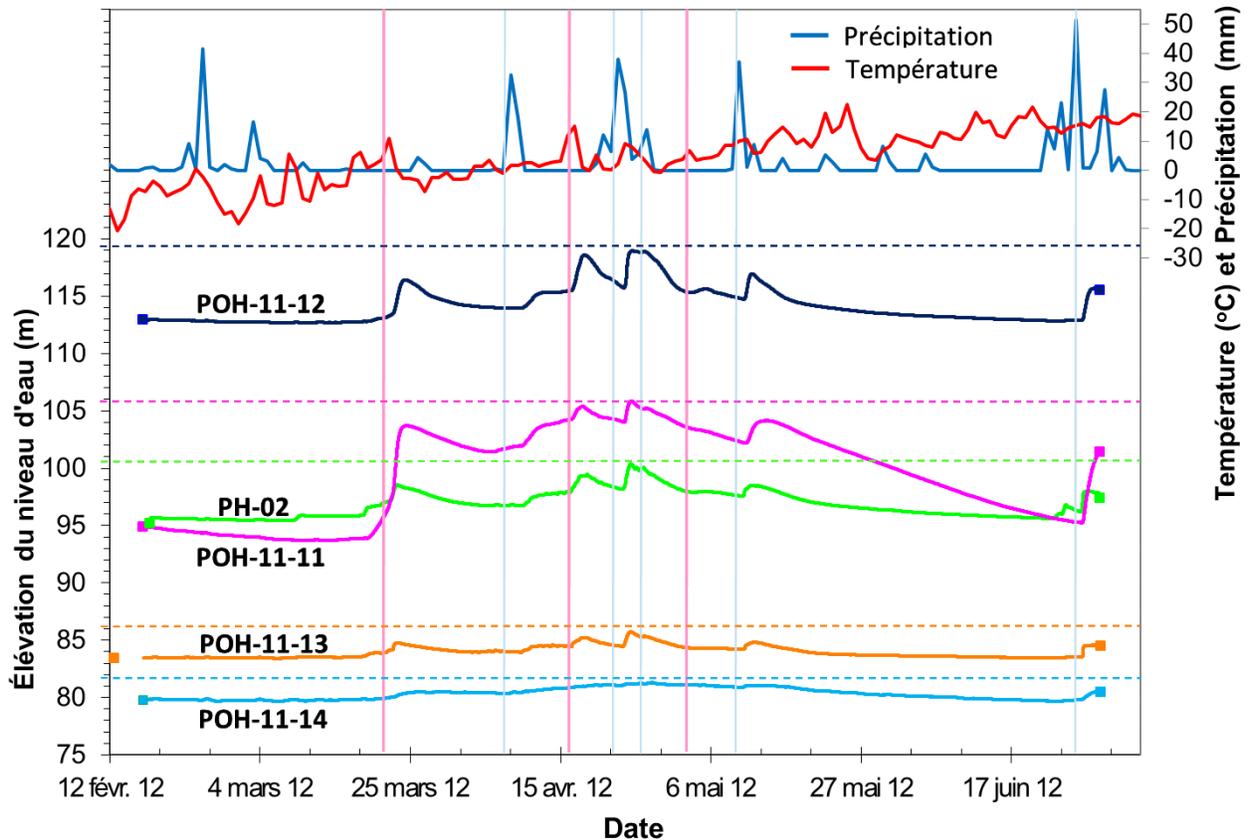


Figure 3.4 Hydrogrammes des puits d'observation du 16 février au 29 juin 2012 pour les puits d'observation situés le long de la coupe AB (figure 3.1; localisation à la carte 9)

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 3.2.2). 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. De plus, à la limite des zones d'émergence, les variations d'amplitude de la nappe sont limitées par le niveau des cours d'eau, lesquels sont absents dans les zones de recharge, ce qui favorisent de plus grandes amplitudes (Tòth, 1962).

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 3.4, 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 3.4 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.

Les estimations de la température de recharge de l'eau souterraine dérivée des concentrations en gaz nobles réalisées par Peel (2014) montrent que ces températures sont plus faibles à plus grande élévation. 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 associée à la fonte de la neige 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) [Peel, 2014].

Tableau 3.4 Classement des puits selon leurs conditions de confinement

| Nom du puits | Niveau d'eau atteint p/r sol | | Variation du niveau d'eau | Conditions de confinement | Justifications des conditions de confinement |
|--------------|------------------------------|---------|---------------------------|---------------------------|---|
| | Minimum | Maximum | | | |
| 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 |

3.5. 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 de recharge effective 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 3.6).

3.5.1. 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 3.5 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 3.5 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 3.5 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 capillarité dans le sol fin, 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.

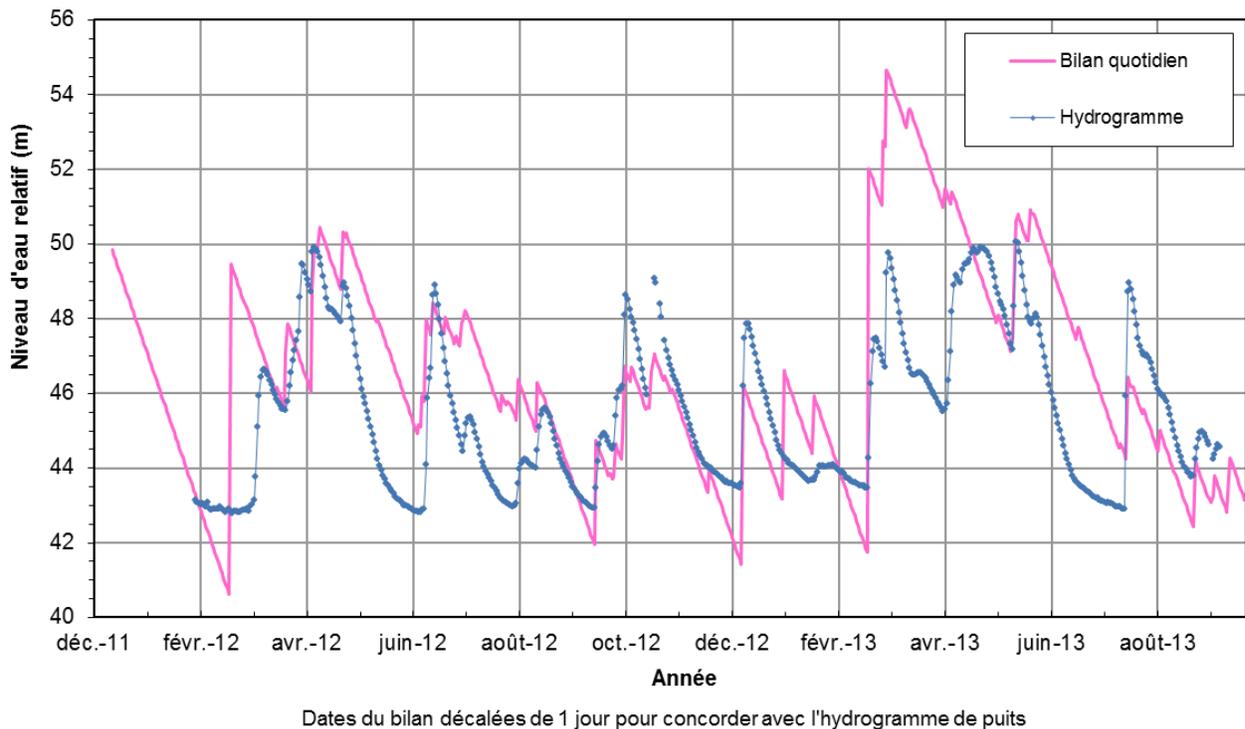


Figure 3.5 Niveau d'eau estimé par un bilan hydrologique quotidien comparé à l'hydrogramme du puits POH-11-09 pour la période de février 2012 à septembre 2013

Tableau 3.5 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 du niveau d’eau (mm/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 3.5 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.

3.5.2. 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 estimée 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 3.6 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 3.6 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 3.6. Les précipitations efficaces (précipitations totales moins le ruissellement) ont donc été obtenues en soustrayant des précipitations totales le produit des précipitations totales et du coefficient de ruissellement. Comme pour le calcul du bilan hydrologique quotidien (section 3.5.1), 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.

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.

Tableau 3.6 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)

| <i>Utilisation du sol</i> | <i>Pente</i> | <i>Groupe hydrologique</i> | | | |
|----------------------------|--------------|----------------------------|----|----|----|
| | | 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 |

3.6. Vulnérabilité des aquifères

3.6.1. 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.

3.6.2. 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 3.7 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.

3.6.2.1. 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 3.3. Les données de cette carte ont été reclassées selon le tableau 3.7 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 de l'aquifère granulaire 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).

Tableau 3.7 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) | $1,41 \times 10^{-4}$ à $3,30 \times 10^{-4}$ |
| 5 | 9,1 à 15,2 | | Grès massif (4 à 9) | Loam | 6 à 12 | Calcaire (2 à 7) | |
| 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) | $3,30 \times 10^{-4}$ à $4,72 \times 10^{-4}$ |
| 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) | $4,72 \times 10^{-4}$ à $9,43 \times 10^{-4}$ |
| 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) | |
| | | | | | | Calcaire karstique (8 à 10) | $9,43 \times 10^{-4}$ et plus |
| Poids | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 3 |

3.6.2.2. 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 3.5.2. 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 3.7. 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.

3.6.2.3. 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 3.8 et sur la carte 22.

Tableau 3.8 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)

3.6.2.4. 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 3.9. Les cotes ont été attribuées aux cellules de la matrice d'après les polygones de la carte quaternaire. Le tableau 3.9 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 à l'étude.

Tableau 3.9 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)

3.6.2.5. 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 3.7. Les cartes 25 et 26 correspondent aux pentes pour l'aquifère au roc et l'aquifère granulaire.

3.6.2.6. 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 3.10. 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 3.3.2]. Le confinement allant de 2,5 à 20 m représente une zone vadose correspondant à un till. Pour les secteurs où le niveau de l'eau souterraine se situe à plus de 20 m sous le sommet du roc (confinement de plus de 20 m), une cote de grès fracturé été attribuée (tableau 3.10). 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 étudié.

Tableau 3.10 Attribution des cotes DRASTIC pour l'impact de la zone vadose

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

3.6.2.7. 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). Cette plage de conductivité a été attribuée d'après les résultats des essais de pompage réalisés par TechnoRem (2013). 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.

3.6.3. 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 3.7.

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.

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 3.6.

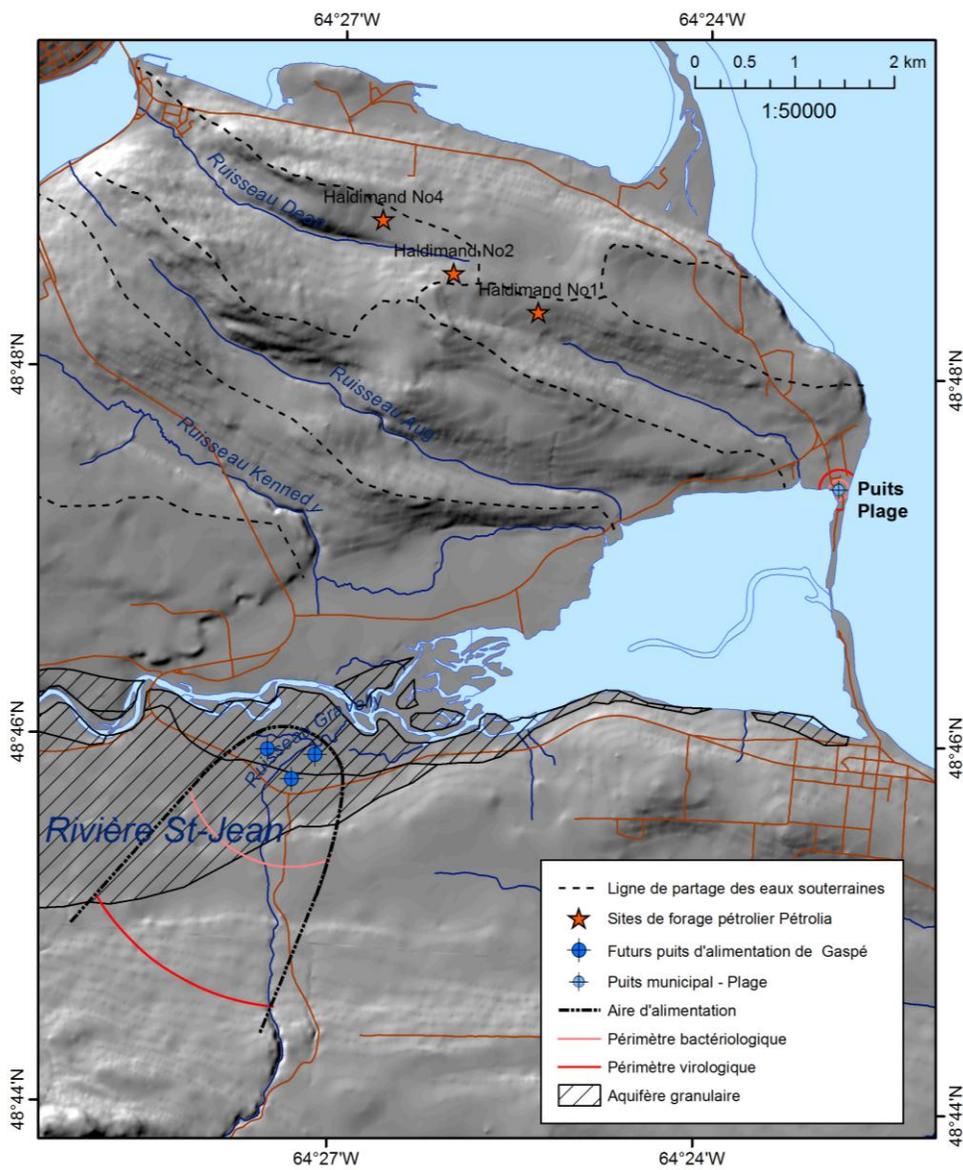


Figure 3.6 Aires d'alimentation des puits de la ville de Gaspé. Modifié d'Arrakis (2011)

3.7. Pétrole et fluides profonds

3.7.1. Suintements d'hydrocarbures et anciens forages pétroliers

La figure 3.7 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 3.11. 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.

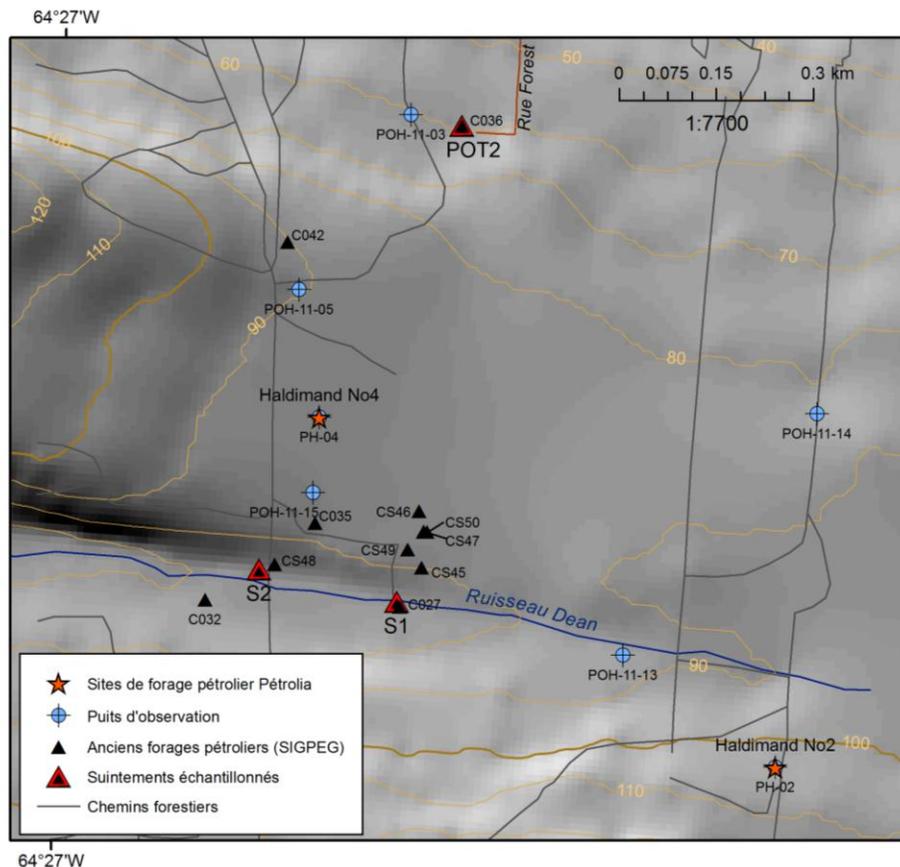


Figure 3.7 Localisation des suintements d'hydrocarbures dans le secteur Haldimand

La figure 3.7 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 3.12 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 3.11 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 3.12 Coordonnées des anciens forages pétroliers

| <i>Numéro du forage</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>SIGPEG</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 | - | - |

* Pétrolia, communication personnelle

3.7.2. 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 3.13 présente une synthèse des analyses des fluides prélevées à différentes profondeurs. On note également la présence de pétrole à 120 m de profondeur au droit du forage Haldimand n° 1. La salinité maximale fixée dans le modèle numérique provient de l'échantillon d'eau de formation prélevée à une profondeur de 850 m dans le puits Haldimand n° 1.

Tableau 3.13 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 | 14 000 | - | 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 | - | | | | | |

4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME AQUIFÈRE

Les travaux de modélisation ont été réalisés dans le but d'assurer une compréhension quantitative du système d'écoulement de l'eau souterraine. On cherche à comprendre, entre autre, les liens entre l'aquifère et les parties profondes, les modes de migration d'éventuels contaminants ainsi que l'incidence d'émissions de fluides en profondeur. Ces travaux ont également pour objectif de mettre en relation les conditions d'écoulement obtenues par la caractérisation avec les observations sur la géochimie de l'eau faites par Peel (2014). Ce chapitre présente donc la méthode, les résultats ainsi que l'interprétation des résultats des travaux de modélisation. De plus, une analyse paramétrique a été réalisée et y est décrite.

4.1. Systèmes d'écoulement considérés

Une particularité des travaux réalisés sur le site d'Haldimand est le fait de vouloir comprendre les liens entre l'aquifère de surface et le réservoir situé à près de 1000 m de profondeur. Pour ce faire, il faut donc considérer le problème à une échelle qui n'est pas commune en hydrogéologie, où nous sommes plutôt habitués à tenir compte de systèmes moins profonds. De plus, la présence de saumure en profondeur exige de déterminer les intervalles avec des eaux ayant différentes salinités. Afin d'atteindre ces objectifs il a fallu déterminer les dimensions latérale et verticale du système d'écoulement à considérer de manière à préciser adéquatement les liens hydrauliques entre l'aquifère de surface et le réservoir à 1 km de profondeur. Un modèle d'écoulement à densité variable a été retenu afin de considérer les différentes salinités de l'eau souterraine observée à différentes profondeurs au puits pétrolier Haldimand n° 1 tel qu'illustré à la figure 4.1. Les différentes salinités tiennent compte de l'eau douce en surface et l'eau très salée des formations profondes. La valeur mesurée à 830 m de profondeur correspond à la salinité maximale du modèle. Compte tenu du contexte côtier de la péninsule Haldimand, des niveaux marins relatifs plus élevés qui étaient présents à la fin de l'ère glaciaire, et de types d'eau souterraine montrant l'effet d'un mélange avec une composante marine (Peel, 2014) nous avons aussi présumé la présence d'un intervalle d'eau marine entre les eaux douces superficielles et les eaux de formation profondes.

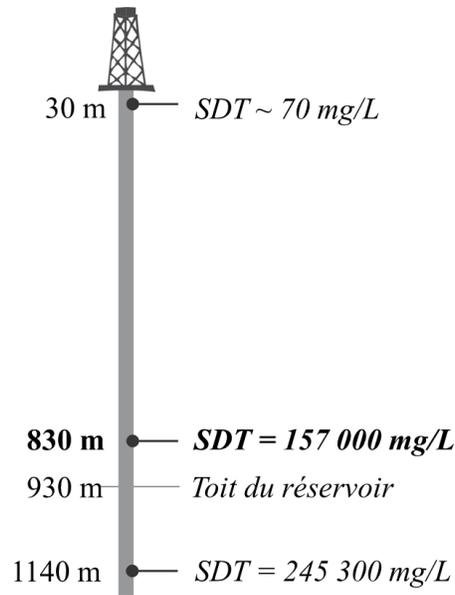


Figure 4.1 Échantillon d'eau de formation au droit du puits pétrolier Haldimand n° 1 (SDT : Solides dissous totaux)

4.2. Principe de l'écoulement à densité variable

Le principe de l'écoulement à densité variable est basé sur la conversion de la charge hydraulique du fluide (h_{eau_fluide}) d'une densité donnée en charge équivalente d'eau douce (h_{eau_douce}). La charge équivalente en eau douce correspond simplement à la charge du fluide multiplié par le rapport des densités (ρ) suivant :

$$h_{eau_douce} = h_{fluide} \frac{\rho_{fluide}}{\rho_{eau_douce}}$$

Le lien entre la salinité (C) et la densité est obtenu à partir de la concentration en SDT.

$$\rho_{fluide} = \rho_{eau_douce} + \alpha(C_{fluide} - C_{eau_douce})$$

où α est un coefficient sans unité qui correspond à 0,7246 (Mohsen et Singh, 1990; Molson et Frind, 2014). L'écoulement à densité variable est donc un problème couplé dont les concentrations et les charges hydrauliques sont liées et varient toutes deux dans l'espace et le temps.

4.3. Développement du modèle numérique

La modélisation numérique de l'écoulement à densité variable a été réalisée 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 (cartes 1 et 33). 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.

Les sections qui suivent présentent le développement du modèle numérique. Le modèle simule un milieu poreux équivalent saturé supposant une température uniforme dans tout le domaine compte tenu du faible gradient géothermique (Peel, 2014). Le modèle représente la migration d'eau, incluant les sels dissous, mais ne tient pas compte de phases immiscibles, telles que les hydrocarbures liquides ou gazeux. De plus, le modèle décrit l'écoulement régional, ce qui ne permet pas de considérer la migration potentielle de méthane le long d'un puits pétrolier. Ce processus potentiel de migration de contaminants vers l'aquifère superficiel n'est donc pas représenté par le modèle. Le modèle est lancé en régime transitoire et la simulation est poursuivie jusqu'à l'atteinte du régime permanent (>100 000 ans). Toutefois, la simulation du modèle couplé écoulement-transport n'a pas permis d'atteindre la stabilisation complète puisque de très faibles variations de concentrations non significatives sont encore numériquement perceptibles pour le modèle de transport. De plus, il est à noter que les puits d'alimentation de la ville de Gaspé, qui se situent dans la vallée au sud de la rivière St-Jean, ne sont pas inclus dans le modèle. Les fichiers utilisés pour les différentes simulations ainsi que les fichiers de sortie du modèle sont joints à l'annexe 5.

4.3.1. Logiciel utilisé

La modélisation a été réalisée à l'aide logiciel SALTFLOW développé par Molson et Frind (2014). Le logiciel SALTFLOW modélise l'écoulement à densité variable en tenant compte de

l'advection, de la diffusion et de la dispersion. SALTFLOW utilise les équations couplées d'écoulement et de transport des fluides miscibles. Ce modèle représente l'écoulement d'une seule phase de fluide (liquide) et le transport de masse s'applique à un soluté complètement dissous. Ces équations sont détaillées dans le guide SALTFLOW (Molson et Frind, 2014).

4.3.2. 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 générale 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 dans les 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 3, 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.

4.3.3. 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) et il inclut les dépôts quaternaires ainsi que les formations rocheuses. 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 4.2. 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 3.5.1). 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.

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. La présence d'eau marine en profondeur s'explique par le contexte de la péninsule Haldimand en bordure de mer et l'histoire géologique de la région (transgression marine) [Veillette et Cloutier, 1993]. De plus, la géochimie des eaux souterraines des puits peu profonds montre des évidences de mélange avec une composante marine, entre autre avec le rapport Cl/Br (Peel, 2014). La 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. Dans le cas de la simulation de transport, on simule le lessivage des eaux salines jusqu'à l'obtention des conditions stabilisées. Il est important de souligné que le système de transport de sels n'atteindra jamais le régime permanent parce qu'il n'y a aucune source de sels aux limites du modèle. Cependant, aux échelles de temps d'intérêt ici, le système est effectivement en régime permanent.

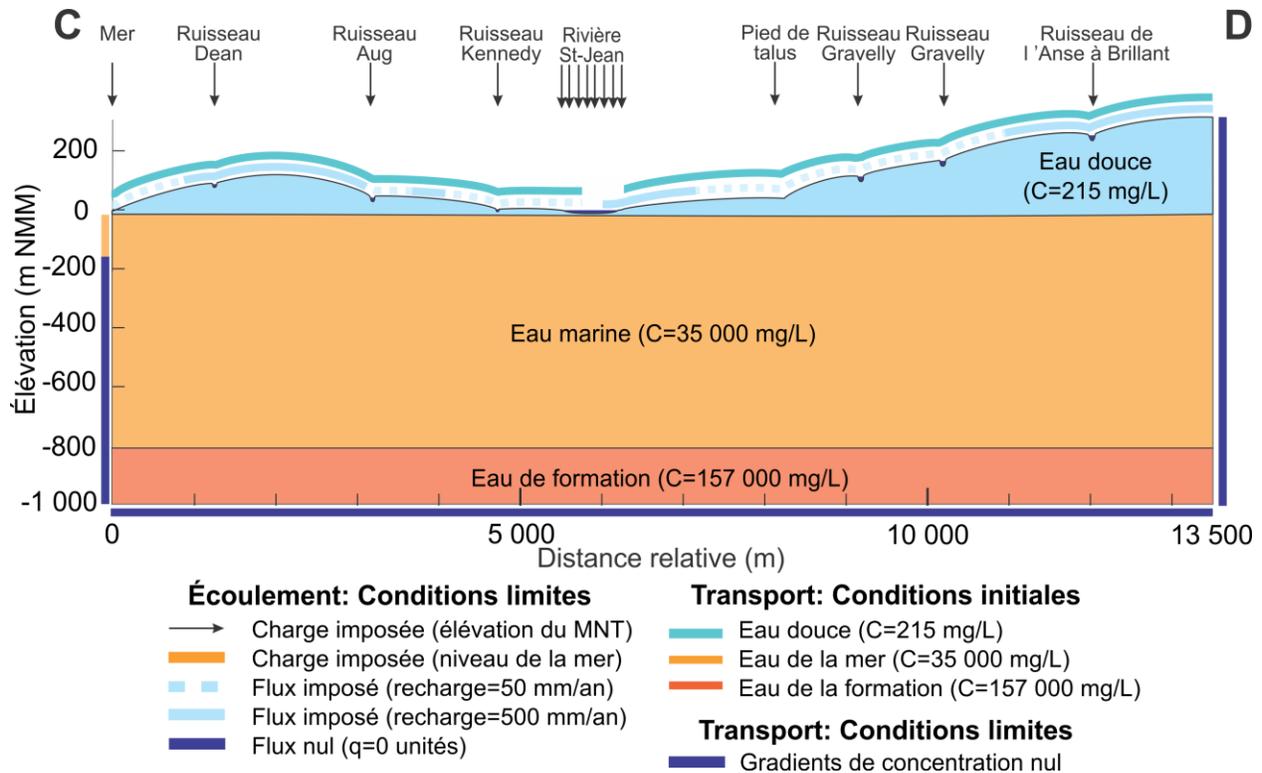


Figure 4.2 Conditions initiales et limites du modèle numérique d'écoulement et de transport le long de la coupe CD (localisation sur les cartes 1 et 33). Exagération verticale $\sim 10x$

4.3.4. Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques de l'aquifère rocheux ont été définies sur la base des conclusions de la section 3.2. La conductivité hydraulique horizontale (K_h) de l'aquifère rocheux diminue avec la profondeur dans le modèle, conformément aux observations obtenues par diagraphies qui montrent une diminution de l'intensité de la fracturation avec la profondeur. La figure 4.3 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 de pompage réalisés par TechnoRem (2013). La conductivité hydraulique diminue progressivement pour atteindre 9×10^{-9} m/s (bleu foncé) à la base du modèle.

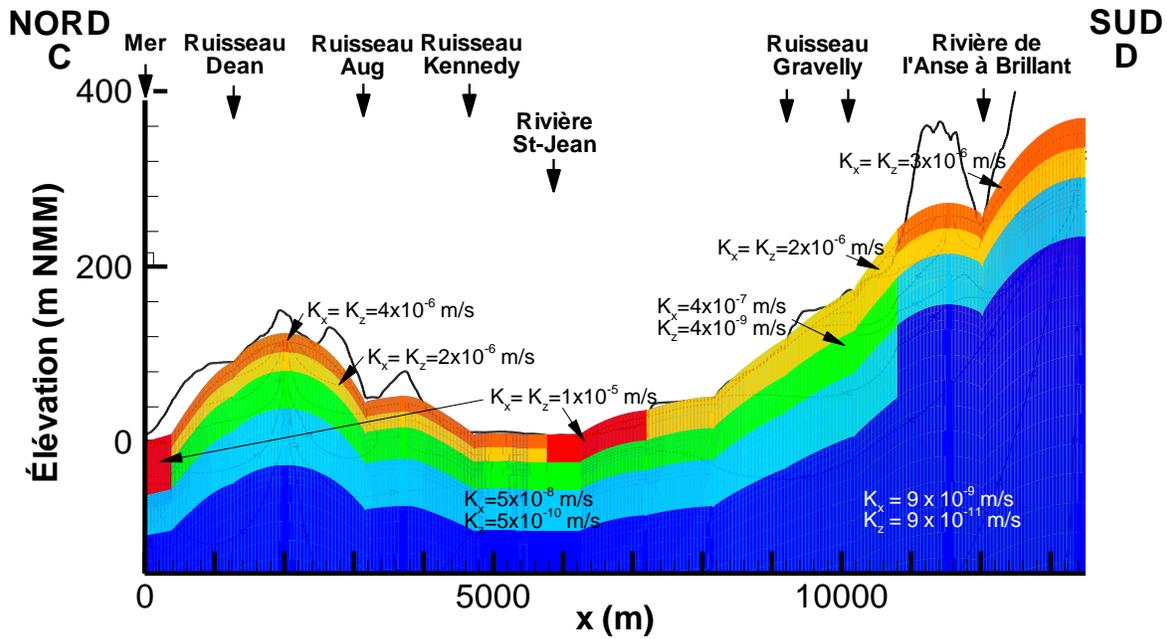


Figure 4.3 Distribution des conductivités hydrauliques (Agrandissement sur les premières couches du modèle) [Exagération verticale ~25x]

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 3.2.2 et annexe 3). Le coefficient d'emmagasinement a été fixé à une valeur typique pour une nappe captive de 1×10^{-5} (Freeze et Cherry, 1979).

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 33.

4.3.5. 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 0,215 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 3.7.2). 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}) (ce tenseur est illustré dans le manuel SALTFLOW de Molson et Frind, 2014). 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.

4.3.6. 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 33). La valeur de la recharge a été estimée à la section 3.4.1. 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 4.2.

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).

4.3.7. 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 4.4.

La figure 4.4 (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. La magnitude des vitesses, qui diminue avec la profondeur, est également représentée sur la figure 4.5. Ce profil vertical 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.

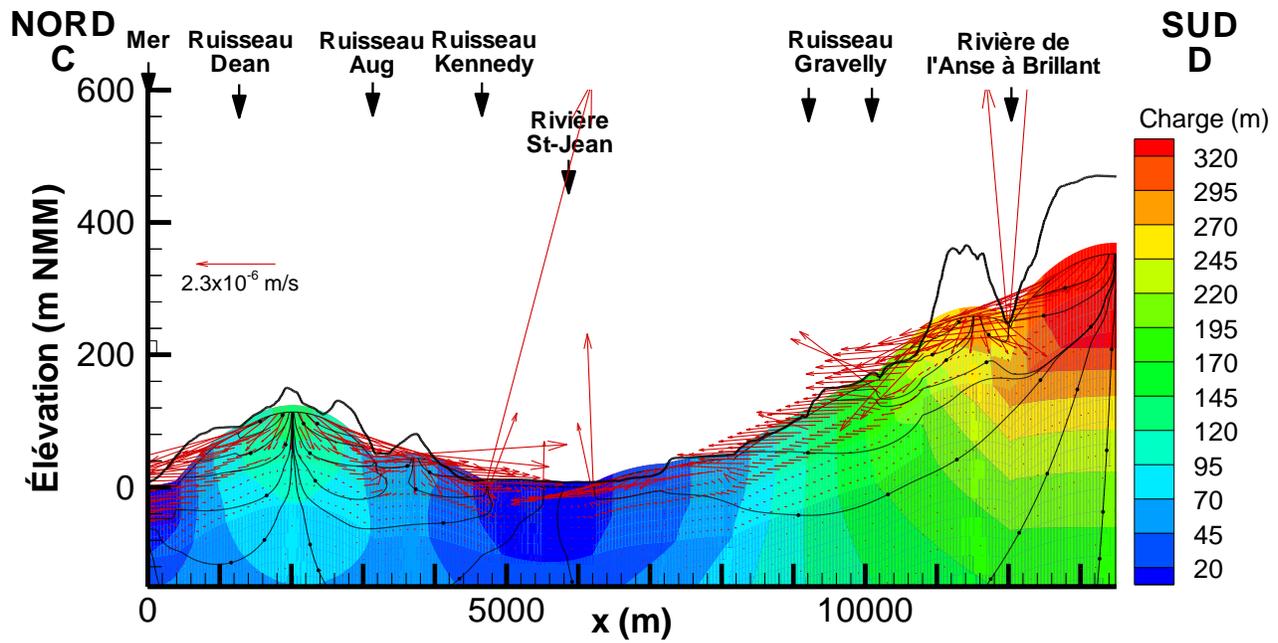
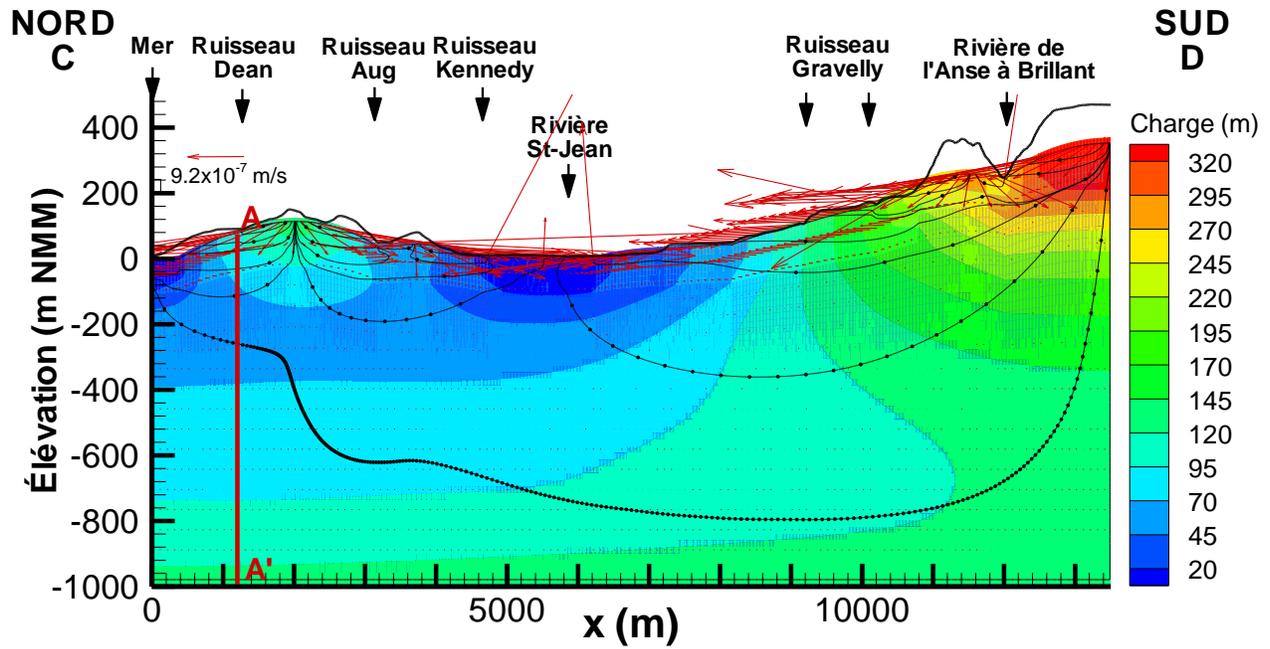


Figure 4.4 Haut : Vue d'ensemble des vecteurs de vitesse sur tout le domaine (exagération verticale $\sim 10x$).
 Bas : Agrandissement des vecteurs de vitesse de -150 à 400 m NMM (exagération verticale $\sim 18x$)

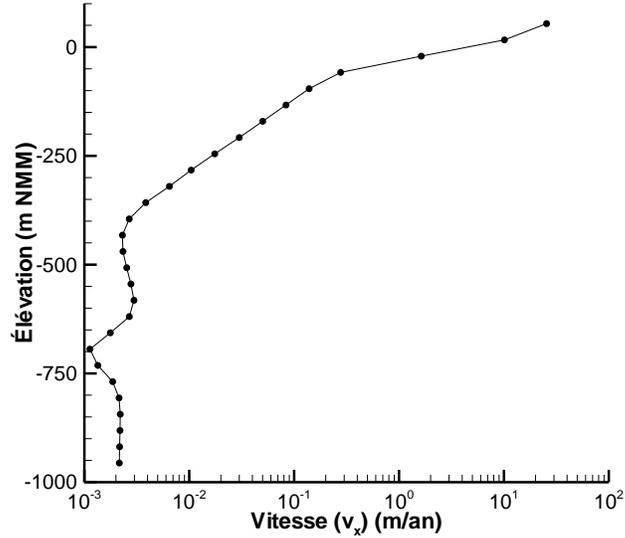


Figure 4.5 Profil vertical des vitesses le long de la ligne AA' (figure 4.4a)

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 4.1 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 4.2 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.

Tableau 4.1 Calcul du nombre de Peclet

| Nombre de Peclet en x | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|-------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------------|----------|
| Élément | Élément | v_x | Δx | α_L | $2 * \alpha_L$ | $D_x (m^2/j)$ | Pe | $Pe < 2$ |
| <i>en x</i> | <i>en z</i> | (m/j) | (m) | (m) | (m) | $\alpha_L * v_x$ | $ 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 | Élément | v_z | Δz | α_L | $2 * \alpha_L$ | $D_z (m^2/j)$ | Pe | $Pe < 2$ |
| <i>en x</i> | <i>en z</i> | (m/j) | (m) | (m) | (m) | $\alpha_L * v_x$ | $ 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 4.2 Calcul du nombre de Courant

| Nombre de Courant en x | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|------------|-------------------------------|--------|----------------|--|
| Élément | Élément | Δt | Cr | $Pe/2$ | $Cr \leq Pe/2$ | |
| <i>en x</i> | <i>en z</i> | (j) | $ v_x * \Delta t / \Delta x $ | | Respecté | |
| 601 | 51 | 10 | 1.34 | 0.50 | raisonnable | |

| Nombre de Courant en z | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|------------|-------------------------------|--------|----------------|--|
| Élément | Élément | Δt | Cr | $Pe/2$ | $Cr \leq Pe/2$ | |
| <i>en x</i> | <i>en z</i> | (j) | $ v_x * \Delta t / \Delta x $ | | Respecté | |
| 601 | 51 | 10 | 0,96 | 0,93 | raisonnable | |
| 159 | 51 | 10 | 1,49 | 0,60 | raisonnable | |

4.3.8. Calage

Le critère de calage du modèle est basé simplement sur une approximation de la surface topographique observée par les niveaux piézométriques simulés. Le calage a été réalisé sur la base d'une appréciation visuelle de la surface de la nappe par rapport à la surface topographique. Ce choix s'explique aussi par l'absence de mesure de niveaux d'eau mesurés le long de la coupe du modèle.

4.4. Résultats des simulations

4.4.1. Écoulement de l'eau souterraine

La figure 4.6 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 préférentielles de recharge, 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.

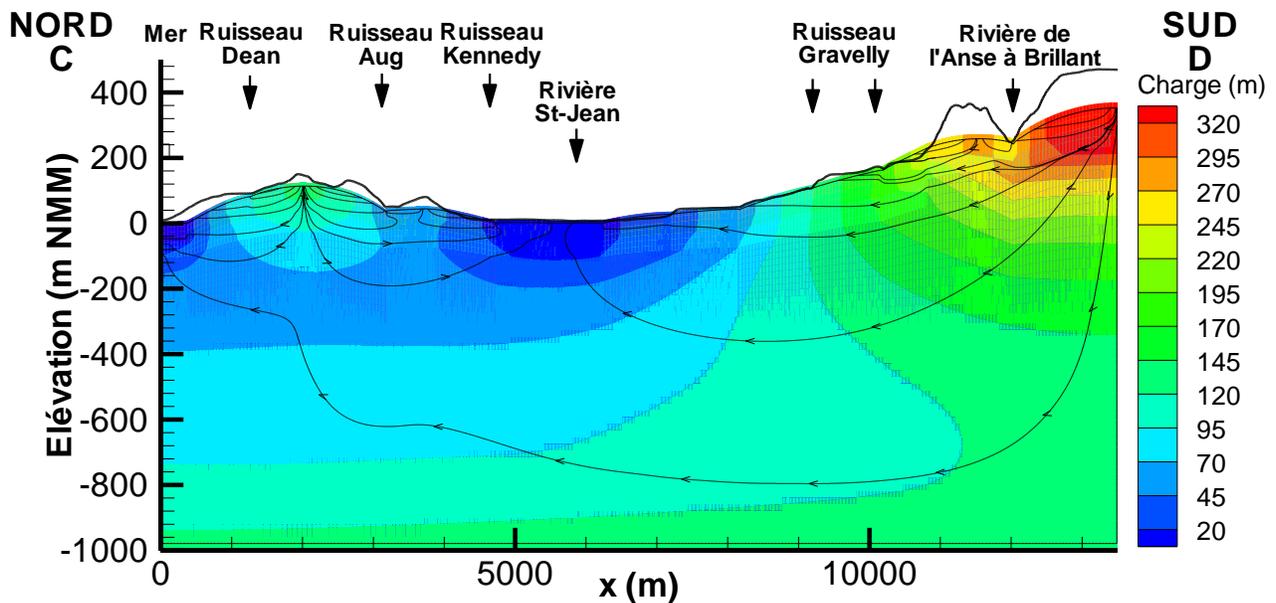


Figure 4.6 Modèle numérique 2D vertical de l'écoulement à densité variable. Charges hydrauliques et lignes d'écoulement en régime permanent (exagération verticale ~10x). À noter que le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne de courant.

Sur la figure 4.6, 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 4.4.3). La figure 4.5 présente un profil des vitesses avec la profondeur dans un secteur où les vitesses sont horizontales. Les vecteurs

proportionnels aux vitesses de la figure 4.4 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 4.6. 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.

4.4.2. Transport de masse

La figure 4.7 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 4.2, 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 ainsi que l'effet de la salinité/densité limitent probablement la pénétration de l'eau douce. On peut même penser 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.

La figure 4.7 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 (Peel, 2014). 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.

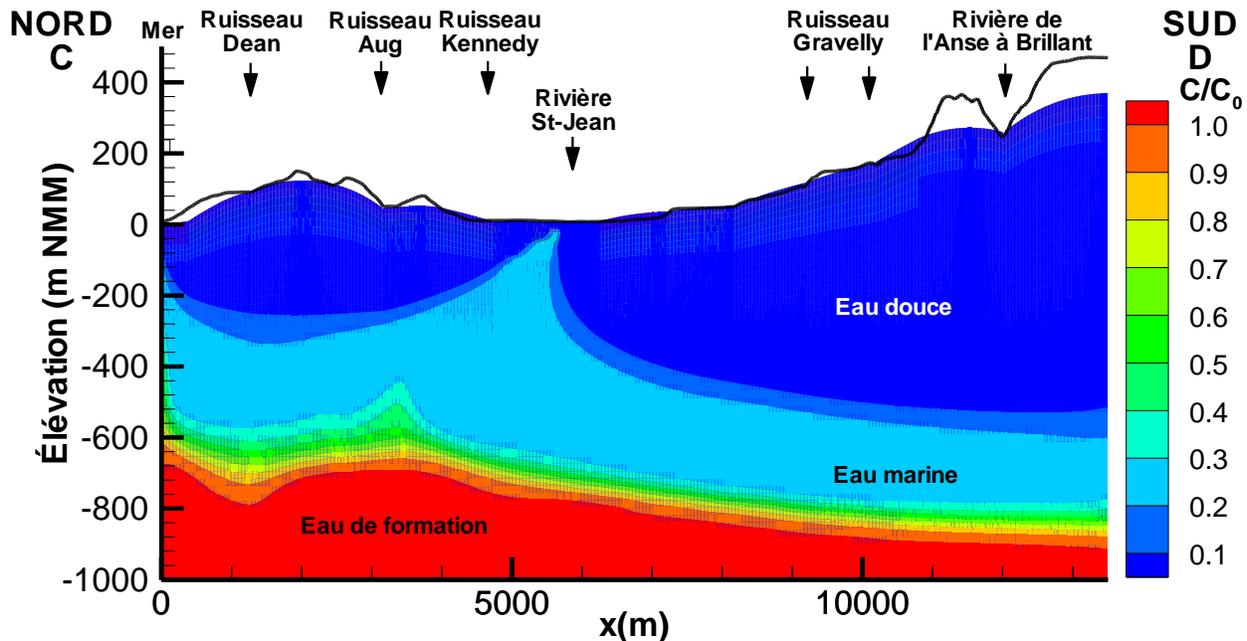


Figure 4.7 Concentration relative simulée en sel ($C_{\max} = 157\,000$ mg/L) [exagération verticale $\sim 10x$]

4.4.3. Temps de résidence de l'eau souterraine

Le temps de résidence a été simulé avec l'hypothèse de l'atteinte d'un régime permanent pour l'écoulement. 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). Étant donné les faibles vitesses d'écoulement vers la surface, l'effet de la diffusion peut être important et doit être considéré. Pour cette simulation, les mêmes valeurs de 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 4.8 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. Le traçage des particules a été réalisé à partir du logiciel Tecplot (version 9.0). La méthode utilisée par Tecplot pour le calcul de la trajectoire d'une particule est l'intégration des champs de vitesse selon le 2^e ordre de Runge-Kutta (Tecplot, 2009). La comparaison de la simulation d'âge avec la simulation du transport de masse (figure 4.7) montre que ces résultats sont cohérents. En effet, les âges les plus élevés correspondent aux endroits où les concentrations en sels 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 4.9 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 des zones de stagnation et de « l'accumulation » d'âge important dans les systèmes aquifères.

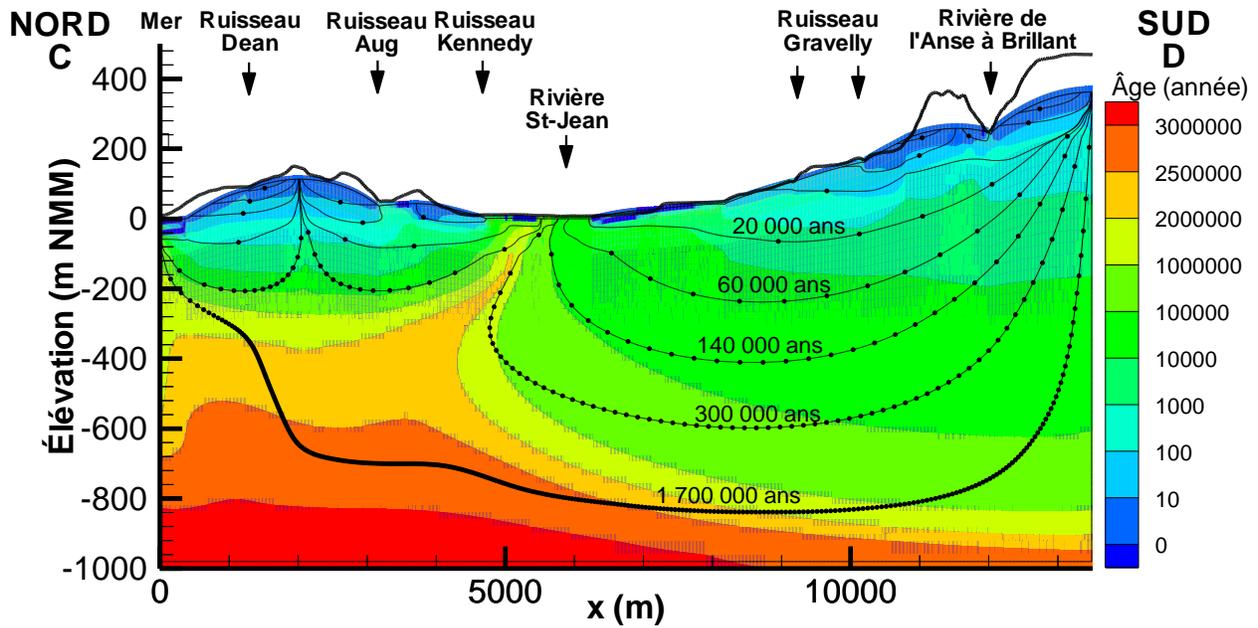


Figure 4.8 Simulation de l'âge advectif-dispersif (coupe CD; carte 1) et lignes d'écoulement du traçage de particules; intervalle de 5 000 ans entre les marqueurs (exagération verticale ~10x). Il est important de noter que le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne d'écoulement.

4.4.4. Conditions propres à Haldimand

Pour mieux montrer les conditions simulées à Haldimand, la figure 4.9 montre un agrandissement des résultats du modèle numérique 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.

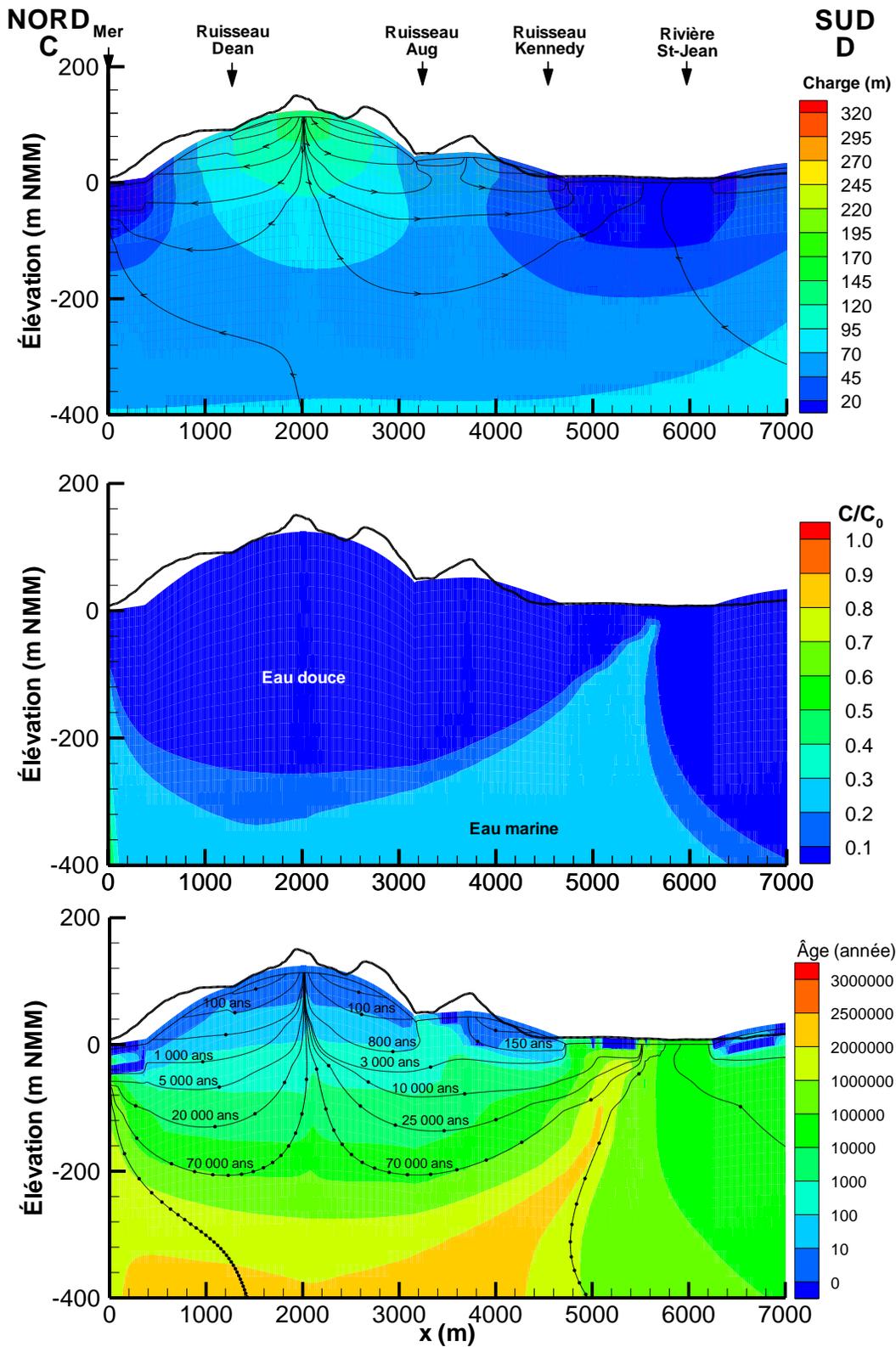


Figure 4.9 Conditions locales à Haldimand (écoulement, transport, âge); intervalle de 5 000 ans entre les marqueurs (exagération verticale ~13x). Il est important de noter que le flux n'est pas uniforme entre chaque ligne d'écoulement.

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 tel qu'observé par l'analyse géochimique (Peel, 2014). 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 par Peel (2014). Cette cohérence entre les résultats de la modélisation et les caractéristiques géochimiques de l'eau souterraine rencontrée à Haldimand soutient fortement la représentativité du modèle numérique du système aquifère. Ainsi, la modélisation numérique permet de fournir une explication hydraulique des conditions géochimiques et ces dernières permettent de confirmer la représentativité des simulations.

4.4.5. 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 4.10 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 mer (baie de Gaspé). Le temps de migration advectif jusqu'à cet exutoire 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 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.

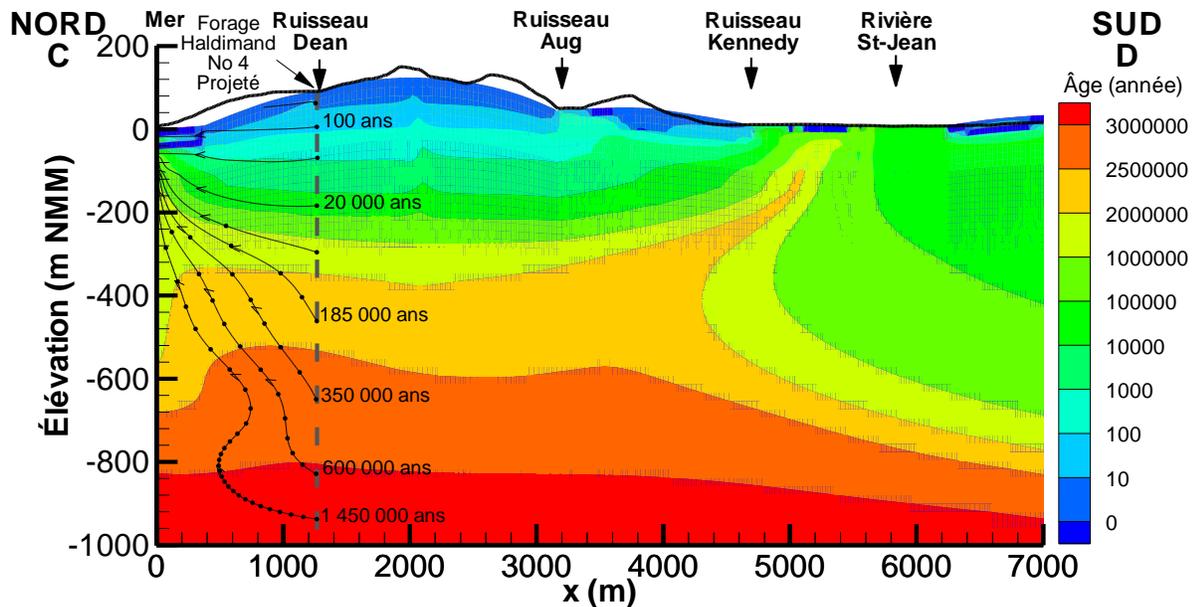


Figure 4.10 Traçage de particules à partir du puits Haldimand n° 4 projeté; intervalle de 50 000 ans entre les particules (exagération verticale ~6x)

La figure 4.11 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 et ainsi représenter le pire cas envisageable. La figure 4.11 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. Il est important de noter que la figure 4.11 ne correspond pas à une solution en régime permanent. Elle a été choisie ainsi afin de mieux illustrer la descente de l'eau douce vers la profondeur.

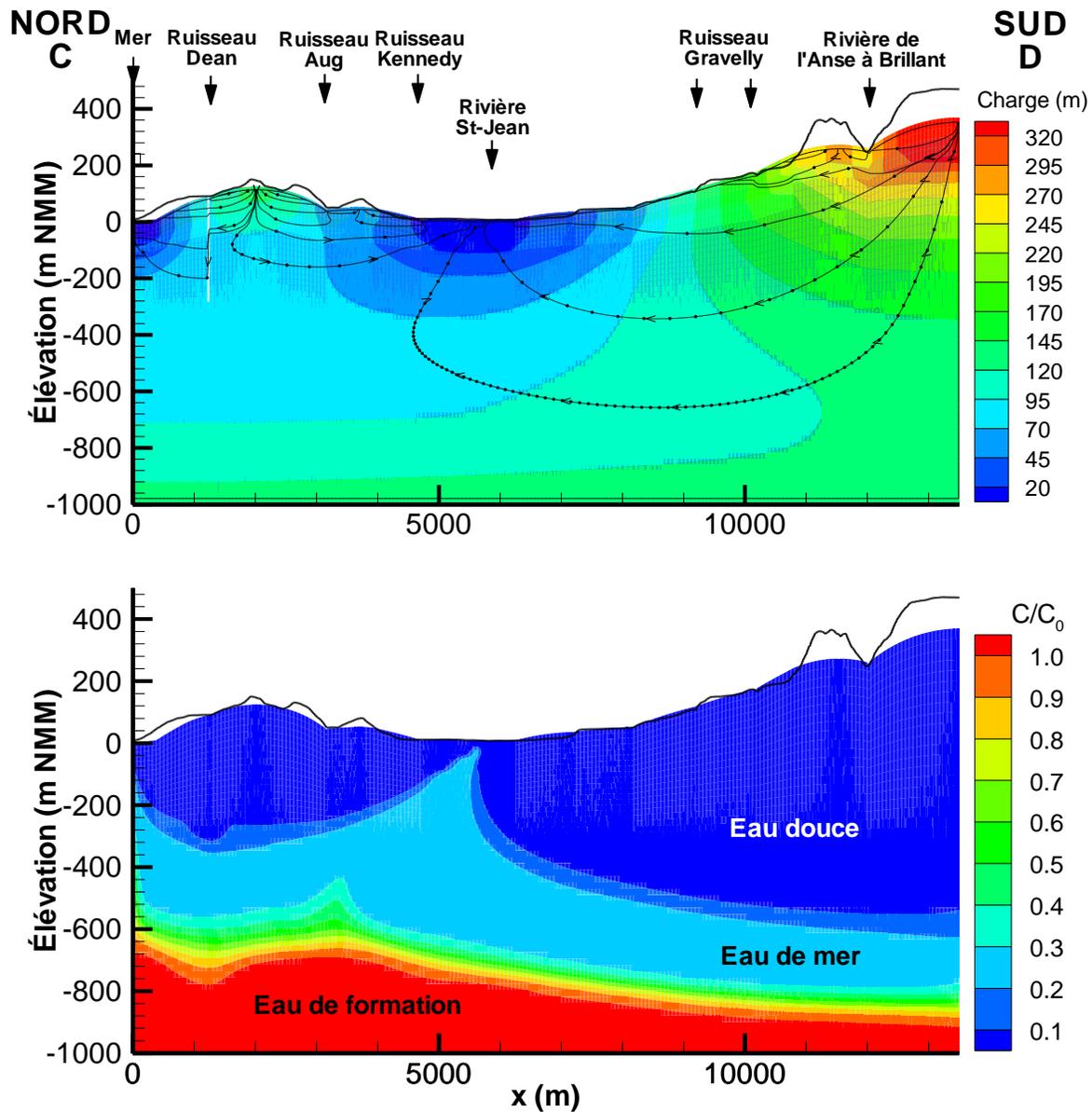


Figure 4.11 Modèle numérique 2D vertical de l'écoulement à densité variable avec la présence d'une discontinuité verticale près du ruisseau Dean (coupe CD; carte 1). a) Charges hydrauliques et lignes d'écoulement en régime permanent; b) Concentration relative en sel ($C_{\max} = 157\,000$ mg/L) [exagération 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 4.11) 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, particulièrement si cette migration était soutenue par de fortes pressions en profondeur (Gassiat et al., 2013).

4.5. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité des modèles numériques permet d'évaluer comment le modèle réagit à des variations d'un paramètre du modèle, ce qui permet de mieux juger des variations envisageables des résultats simulés par rapport au modèle calé (Anderson et Woessner, 1992). Ces variations peuvent être associées à l'incertitude liée à l'estimation des paramètres de l'aquifère, aux contraintes et aux conditions limites. L'analyse de sensibilité pour ce projet présente un aspect original parce que le modèle numérique représente non seulement l'écoulement de l'eau souterraine, mais aussi le transport de solutés. La gamme des effets à considérer lors de l'analyse de sensibilité est donc plus élargie que pour un modèle numérique qui ne considère souvent que l'écoulement.

4.5.1. Choix des paramètres

Les paramètres qui ont fait l'objet d'une analyse de sensibilité sont :

- la conductivité hydraulique pondérée globalement sur tout le domaine,
- la conductivité hydraulique des couches profondes seulement,
- l'anisotropie des couches profondes,
- la porosité pondérée globalement sur tout le domaine,
- la dispersivité pour le transport de sels.

Étant donné la grande difficulté à caler le modèle, les conductivités hydrauliques des couches superficielles ont été considérées représentatives. Ces valeurs de conductivités n'ont donc pas été modifiées dans le cadre de cette analyse puisqu'elles sont trop sensibles. La recharge est également considérée adéquate pour limiter le nombre de simulations, puisqu'elle a été estimée

par des méthodes indépendantes (section 3.5). Pour chaque cas testé, une simulation couplée de l'écoulement et du transport de sels a été réalisée. Les fichiers d'entrées et de sorties de chaque simulation réalisées sont joints sur CD à l'annexe 5.

Pour évaluer la sensibilité de la conductivité hydraulique, de la porosité et de la dispersivité, deux cas ont été testés pour chacun de ces paramètres afin d'observer la variation liée aux changements de ces paramètres. Le premier cas considère la diminution et le second considère l'augmentation du paramètre. Pour l'anisotropie, la sensibilité de ce paramètre a été vérifiée en testant trois cas avec des rapports de K_x et K_z différents qui seront détaillés plus loin.

Le tableau 4.3 présente les différents paramètres analysés ainsi que les valeurs utilisées formant ainsi onze scénarios simulés (P-K1, P-K2,...). À titre comparatif, les valeurs du modèle original (ORIG) ont été ajoutées au tableau. Les valeurs de conductivité hydraulique présentées dans ce tableau font références à celles de la figure 4.3. La liste des simulations réalisées pour chaque paramètre testé est présentée au tableau A5.1 de l'annexe 5. Pour chacun des paramètres, la simulation a été poursuivie jusqu'à l'obtention du régime permanent. Tel que mentionné précédemment, le régime permanent théorique ne peut pas être atteint ici compte tenu qu'il s'agit du lessivage de sels dans le système. Dans un modèle couplé l'écoulement ne peut donc pas atteindre la stabilisation tant que le modèle de transport n'est pas complètement stabilisé. Le système d'écoulement et de transport est tout de même considéré en régime permanent compte tenu de la faible variation des charges hydrauliques et des concentrations en sels ainsi que du temps simulé allant au-delà de 37 000 années. Pour un scénario donné (ex. : P-K1), la simulation a dû être poursuivie plusieurs fois avant d'atteindre le régime permanent. Le tableau A5.1 présente les noms en détails de chacune de ces simulations. Le nombre d'années simulées pour chaque scénario y est également indiqué. Le temps de calcul des simulations étant très long (3 à 5 jours pour chaque simulation), le régime permanent pour le transport de sels n'a pas pu être atteint tel que mentionné précédemment (effet de lessivage). Toutefois, les résultats sont tout de même proches d'une stabilisation et sont ainsi considéré équivalent au régime permanent.

Tableau 4.3 Paramètres analysés en comparaison avec le modèle calé

Conductivité hydraulique globale

| <i>Paramètre analysé</i> | Modèle calé | | K x 2 | | K / 2 | |
|--|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>Nom de la simulation</i> | ORIG | | P-K1 | | P-K2 | |
| | K_x | K_z | K_x | K_z | K_x | K_z |
| <i>Valeurs de K_x et K_z correspondantes aux K du modèle calé (figure 4.3)</i> | 4.00E-06 | 4.00E-06 | 8.00E-06 | 8.00E-06 | 2.00E-06 | 2.00E-06 |
| | 2.00E-06 | 2.00E-06 | 4.00E-06 | 4.00E-06 | 1.00E-06 | 1.00E-06 |
| | 1.00E-05 | 1.00E-05 | 2.00E-05 | 2.00E-05 | 5.00E-06 | 5.00E-06 |
| | 4.00E-07 | 4.00E-09 | 8.00E-07 | 8.00E-09 | 2.00E-07 | 2.00E-09 |
| | 5.00E-08 | 5.00E-10 | 1.00E-07 | 1.00E-09 | 2.50E-08 | 2.50E-10 |
| | 9.00E-09 | 9.00E-11 | 1.80E-08 | 1.80E-10 | 4.50E-09 | 4.50E-11 |

Conductivité hydraulique en profondeur

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom de la simulation</i> | K_x | K_z |
|--------------------------|-----------------------------|----------|----------|
| Modèle calé | ORIG | 9.00E-09 | 9.00E-11 |
| K / 2 | P-Kprof1 | 4.50E-09 | 4.50E-11 |
| K x 2 | P-Kprof2 | 1.80E-08 | 1.80E-10 |

Anisotropie en profondeur

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom de la simulation</i> | K_x / K_z | K_x | K_z |
|--------------------------|-----------------------------|-------------|----------|----------|
| Modèle calé | ORIG | 100 | 9.00E-09 | 9.00E-11 |
| $K_x = K_z$ | P-ani1-1 | 1 | 9.00E-09 | 9.00E-09 |
| inverser K_x et K_z | P-ani2-1 | 0.01 | 9.00E-11 | 9.00E-09 |
| K_x / K_z | P-ani3-1 | 1000 | 9.00E-09 | 9.00E-12 |

Porosité globale

| <i>Paramètre analysé</i> | n | n / 2 | n x 2 |
|--|------|-------|-------|
| <i>Nom de la simulation</i> | ORIG | P-n1 | P-n2 |
| <i>Valeurs de n en fonction de la profondeur</i> | 0.2 | 0.1 | 0.4 |
| | 0.1 | 0.05 | 0.2 |
| | 0.05 | 0.025 | 0.1 |

Dispersivité

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom de la simulation</i> | α_{LH} | α_{LV} ($\alpha_{LH}/1.33$) | α_{TH} ($\alpha_{LH}/10$) | α_{TV} ($\alpha_{LH}/1000$) |
|--------------------------|-----------------------------|---------------|---|---------------------------------------|---|
| Modèle calé | ORIG | 20 | 15 | 1 | 0.01 |
| $\alpha_{LH} * 2.5$ | P-disp1 | 50 | 37.5 | 2.5 | 0.025 |
| $\alpha_{LH} / 2$ | P-disp2 | 10 | 7.5 | 0.5 | 0.005 |

4.5.2. Résultats de l'analyse de sensibilité

En tout, onze cas ont été simulés afin d'établir une comparaison avec le modèle calé. Chacun de ces cas est illustré par deux figures représentant les résultats pour chaque modèle, soit l'écoulement et le transport de sels. Les figures au centre de chaque page présentent les résultats pour le modèle calé (ORIG) afin de faciliter la comparaison avec les cas testés pour l'analyse de sensibilité. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés aux figures 4.12 à 4.16 à la fin du chapitre.

Des profils ont également été réalisés pour chaque simulation afin de faciliter la comparaison entre les résultats des différents paramètres. Les profils d'élévation de la nappe, de la salinité ainsi que de la vitesse d'écoulement horizontale (v_x) ont été extraits. Les profils verticaux ont été extraits sous le ruisseau Dean (à 1 280 m sur l'axe des x, ligne AA' de la figure 4.4a) puisqu'il s'agit de l'emplacement prévu pour le forage exploratoire Haldimand n°4. Ces graphiques sont présentés à la fin du chapitre, aux figures 4.17 à 4.20. Les sections suivantes décrivent les résultats de l'analyse de sensibilité pour chaque paramètre à l'étude. Le profil de salinité montre une concentration relative en sels établie avec une concentration maximale de 157 000 mg/L.

4.5.2.1. Conductivité hydraulique globale

L'étude de la variation de la conductivité hydraulique a d'abord été réalisée sur l'ensemble des conductivités du domaine. Le tableau 4.3 présente les valeurs de conductivité simulées pour les deux cas testés, soit une diminution de moitié et une augmentation du double de la conductivité hydraulique par rapport aux conductivités du modèle calé. La figure 4.12 montre les résultats de ces simulations. On observe que l'augmentation de la conductivité hydraulique globale entraîne un abaissement de la nappe tandis qu'une diminution entraîne un rehaussement de la nappe. Les endroits les plus sensibles à ce paramètre correspondent aux endroits où la recharge est plus importante. Les patrons d'écoulement ne sont pas affectés de façon importante par le changement de ce paramètre. Il y a aussi un effet de pertes de charges qui est particulièrement visible sous les hauts topographiques (limite sud et Haldimand) où les pertes sont moins grandes avec $Kx2$ et se traduisent par un abaissement de la surface de la nappe.

La figure 4.17 présente les profils de charge hydraulique comparés à la topographie. La ligne noire correspond à la topographie le long de la coupe du modèle. On constate que le seul

paramètre qui entraîne une variation de l'élévation de la nappe est la conductivité hydraulique globale. La valeur de la conductivité hydraulique utilisée pour le cas de base est celle qui donne des profils de charge les plus plausibles, i.e. pas trop au-dessus ou en dessous de la topographie. Ces simulations paramétriques supportent donc les valeurs de K global utilisées pour le modèle calé, si on accepte que la recharge imposée au modèle est représentative puisqu'elle a été estimée de façon indépendante et validée par la reproduction d'un hydrogramme de puits.

L'effet de ce paramètre sur le transport de sels est observé par une légère remontée de l'interface d'eau douce avec l'augmentation de la conductivité hydraulique globale telle qu'illustré à la figure 4.18a.

4.5.2.2. Conductivité hydraulique en profondeur

La modification de la conductivité hydraulique en profondeur affecte seulement les 47 couches inférieures du modèle qui sont représentées en bleu foncé sur la figure 4.3. Les résultats de la modification de K en profondeur montrent que le modèle est peu sensible à ce changement. On n'observe d'ailleurs aucun changement au profil d'élévation de la nappe (figure 4.17b).

Ces simulations montrent moins d'effets sur les charges et les patrons d'écoulement que celles avec un changement de K global. Les profils de charges comparées à la topographie ne montrent pratiquement aucun effet. Cet effet est plutôt réaliste puisque l'écoulement se fait de façon prédominante dans la partie supérieure où K n'a pas été modifié.

L'effet sur le profil vertical de salinité est plus important que pour le K global. On note un rehaussement de la concentration en sels en profondeur qui est plus marqué à partir de 500 m de la base du modèle. Toutefois, l'interface d'eau douce n'est pas affectée de façon significative par le changement de K en profondeur.

Le modèle est donc peu sensible aux valeurs de K en profondeur et il y a une bonne incertitude sur les valeurs réelles de K en profondeur.

4.5.2.3. Anisotropie en profondeur

L'anisotropie en profondeur affecte seulement les 47 couches inférieures du modèle qui sont représentées en bleu foncé sur la figure 4.3. Trois cas d'anisotropie profonde ont été testés. Un cas isotrope (K_x égal à K_z), un cas où K_x et K_z sont inversés par rapport au modèle calé et un cas

ou K_x / K_z égal à 1000, soit un ordre de grandeur de plus que les valeurs utilisées pour le modèle calé.

Les résultats montrent que l'anisotropie en profondeur a un effet majeur sur les patrons d'écoulement et la distribution des types d'eau, même si cela ne se reflète pas sur les charges à la surface qui sont pratiquement les mêmes. Cette observation confirme encore une fois que l'écoulement en surface est contrôlé par les couches superficielles. L'effet sur les vitesses d'écoulement demeure également presque inchangé en surface peu importe si on modifie ou non l'anisotropie en profondeur tandis que cet effet est important en profondeur. Les résultats ont montrés que l'utilisation d'une plus grande anisotropie (facteur 1000) donne des résultats similaires au modèle calé (facteur 100). En augmentant l'anisotropie en profondeur l'écoulement se retrouve plus restreint dans la partie supérieure du modèle ce qui a pour effet un rehaussement de l'interface d'eau douce sous Haldimand et une diminution des vitesses en profondeur. Même si la simulation n'a pas tout à fait atteint le régime permanent, on peut tout de même constater que l'augmentation de l'anisotropie en profondeur a pour effet de rehausser la base de l'eau douce par rapport au modèle calé. Plus l'anisotropie est grande moins la base de l'interface d'eau douce sera profonde. Le résultat pour une anisotropie de 1000 semble aussi plausible que le cas de base. Toutefois l'absence de donnée sur la salinité de l'eau à différentes profondeurs sous Haldimand ne nous permet pas de déterminer lequel des cas d'anisotropie est donc le plus plausible.

En résumé, l'anisotropie en profondeur du modèle calé ne peut être validée par les résultats de ces simulations. L'anisotropie utilisée pour le cas de base de même que le cas de l'anisotropie d'un facteur 1000 semblent les plus « plausibles ». On constate que les patrons d'écoulement régionaux sont très sensibles à l'anisotropie en profondeur.

4.5.2.4. Porosité

La porosité a été modifiée pour l'ensemble du domaine. Les deux cas testés correspondent à une hausse du double et une baisse de moitié des valeurs de porosité. Les résultats de la modification de la porosité montrent que le modèle numérique est peu sensible à ce changement.

La porosité a un effet sur les vitesses d'écoulement dans la partie superficielle. Une augmentation de la porosité entraîne une augmentation des vitesses (figure 4.19d). De plus,

l'augmentation de la porosité a aussi pour effet de rehausser les eaux salines profondes, sans toutefois modifier l'interface d'eau douce sous Haldimand. Cette situation est causée par l'apport plus important d'eau douce au sud du modèle qui pour effet de rehausser l'interface d'eau saline causé par le lessivage de l'eau saline.

4.5.2.5. Dispersivité – Écoulement et transport

Il n'y a pratiquement pas d'effet du changement assez important de dispersivité, même sur la distribution des types d'eaux. C'est peut-être dû au fait qu'il n'y a pas d'interfaces inclinées ou de couches minces d'eau avec des salinités différentes.

Conductivité hydraulique globale

Note : les élévations des graphiques sont celles du modèle et non celles par rapport au niveau de la mer

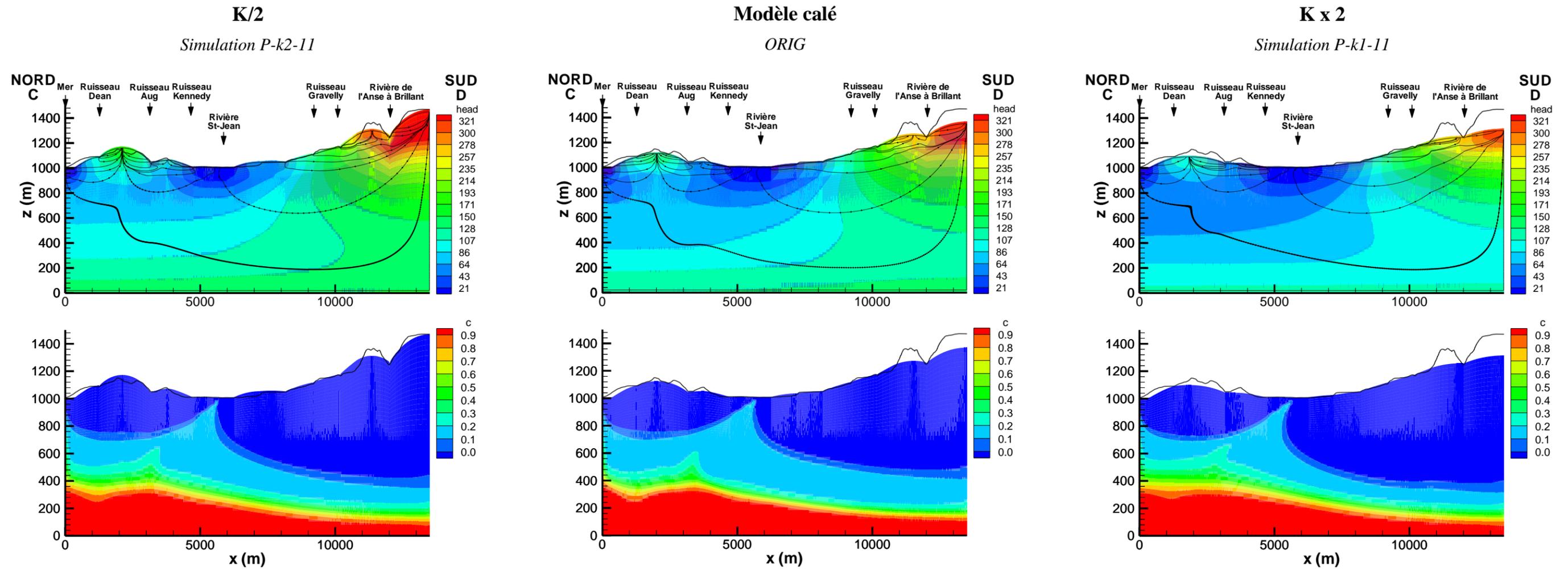


Figure 4.12 Analyse paramétrique - Conductivité hydraulique globale

Conductivité hydraulique en profondeur

Note : les élévations des graphiques sont celles du modèle et non celles par rapport au niveau de la mer

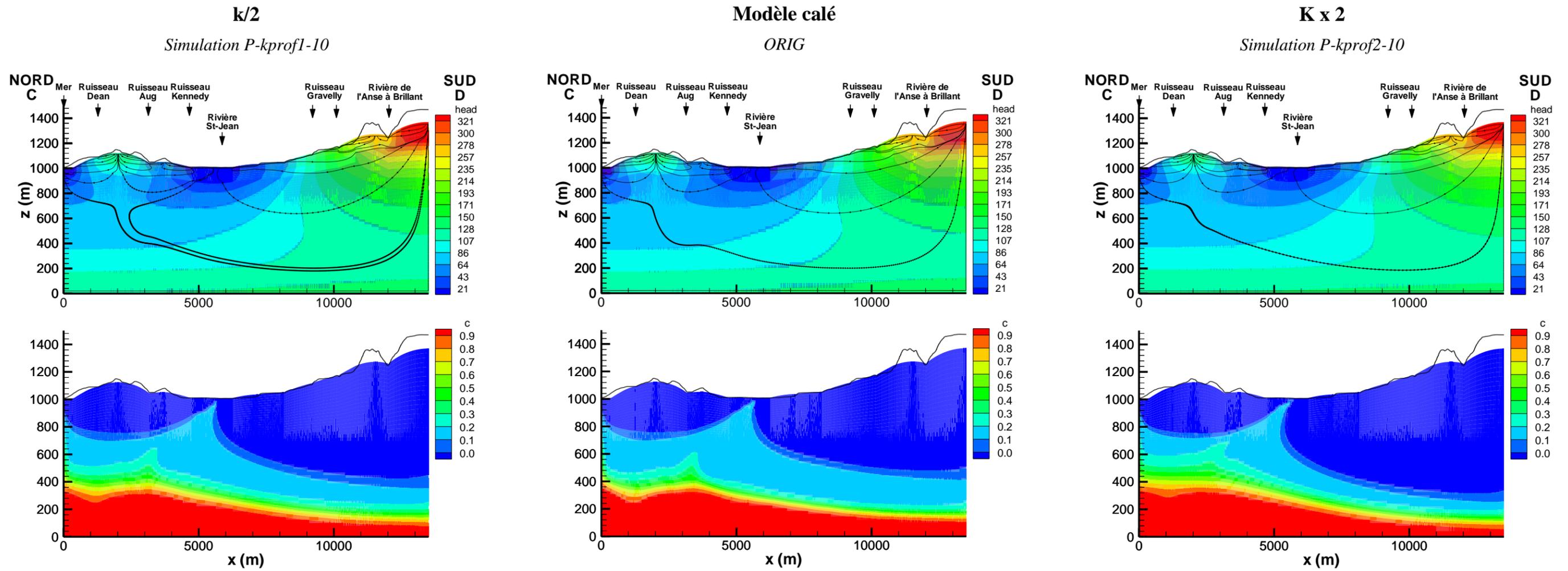


Figure 4.13 Analyse paramétrique - Conductivité hydraulique en profondeur

Anisotropie en profondeur

Note : les élévations des graphiques sont celles du modèle et non celles par rapport au niveau de la mer

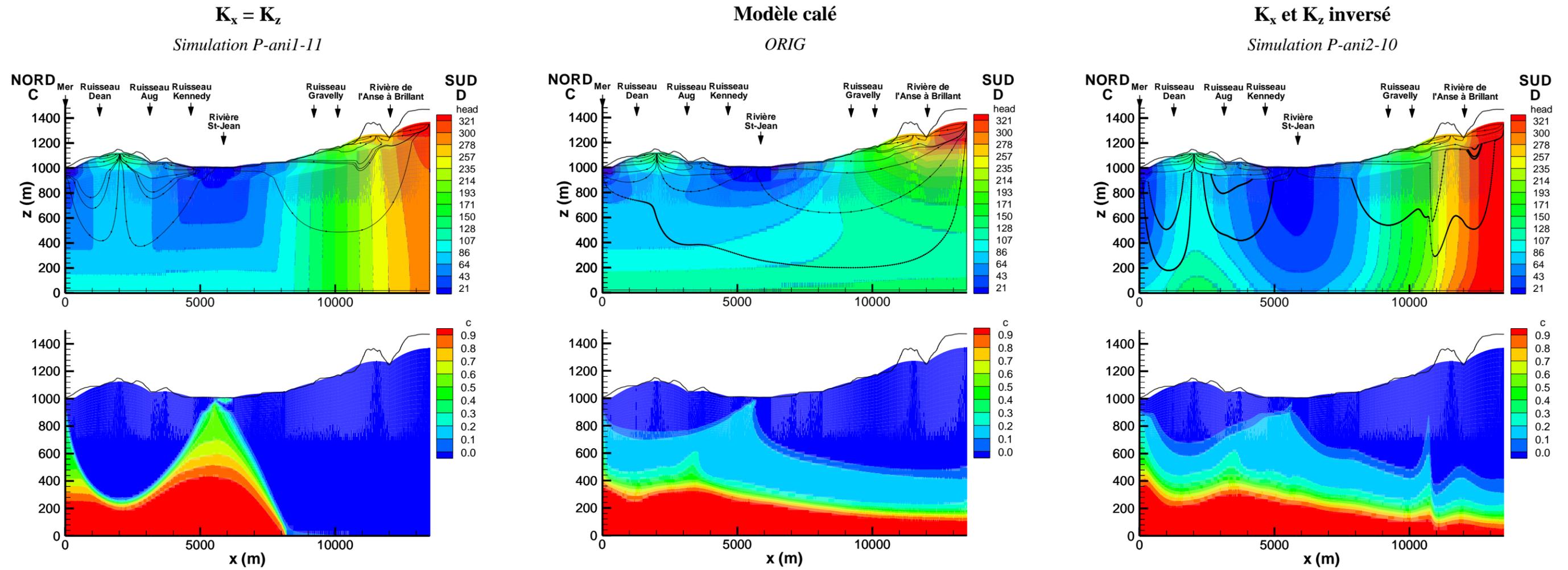


Figure 4.14 Analyse paramétrique – Anisotropie en profondeur

Anisotropie en profondeur

Note : les élévations des graphiques sont celles du modèle et non celles par rapport au niveau de la mer

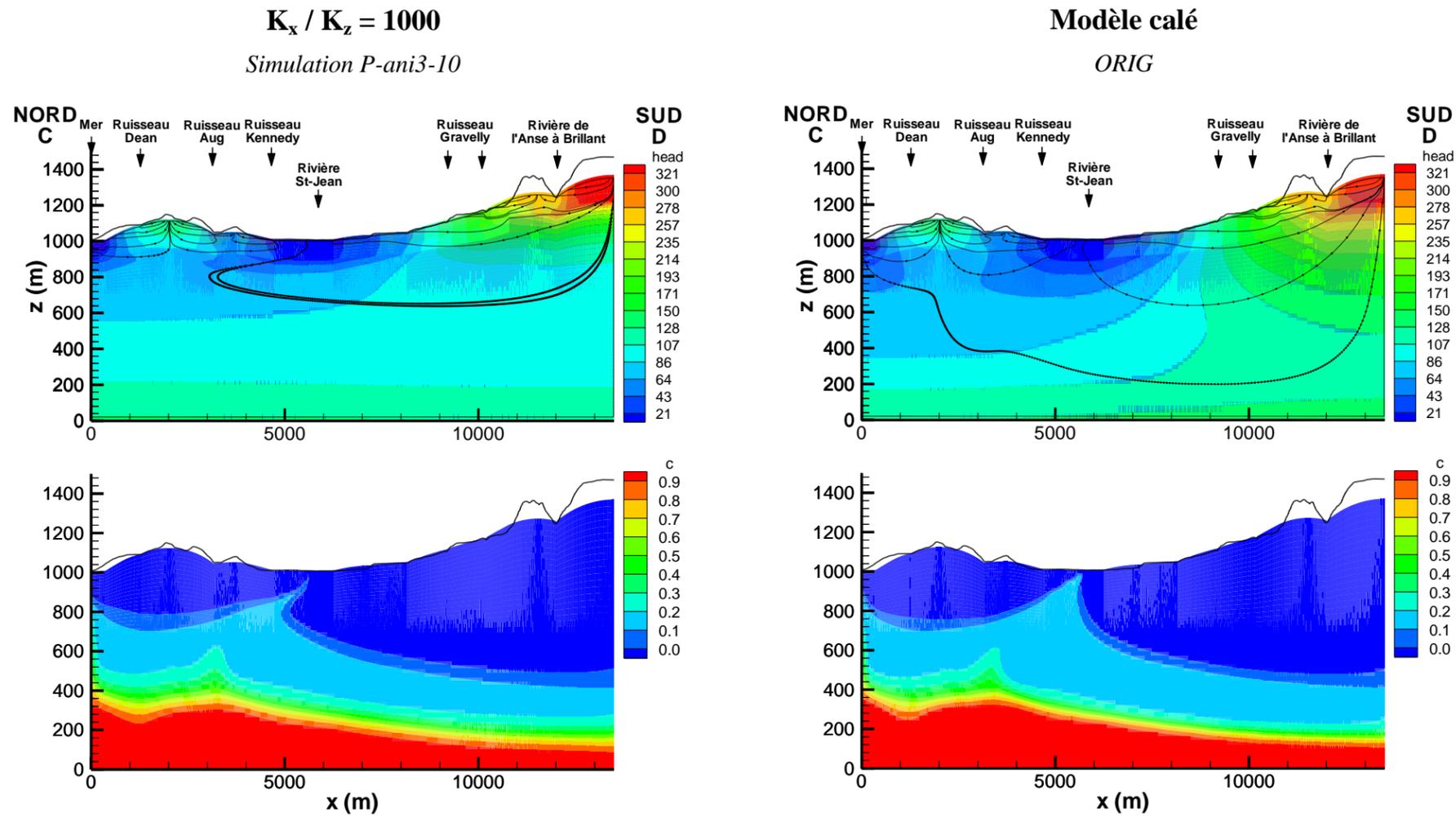


Figure 4.14 (suite) Analyse paramétrique – Anisotropie en profondeur

Porosité

Note : les élévations des graphiques sont celles du modèle et non celles par rapport au niveau de la mer

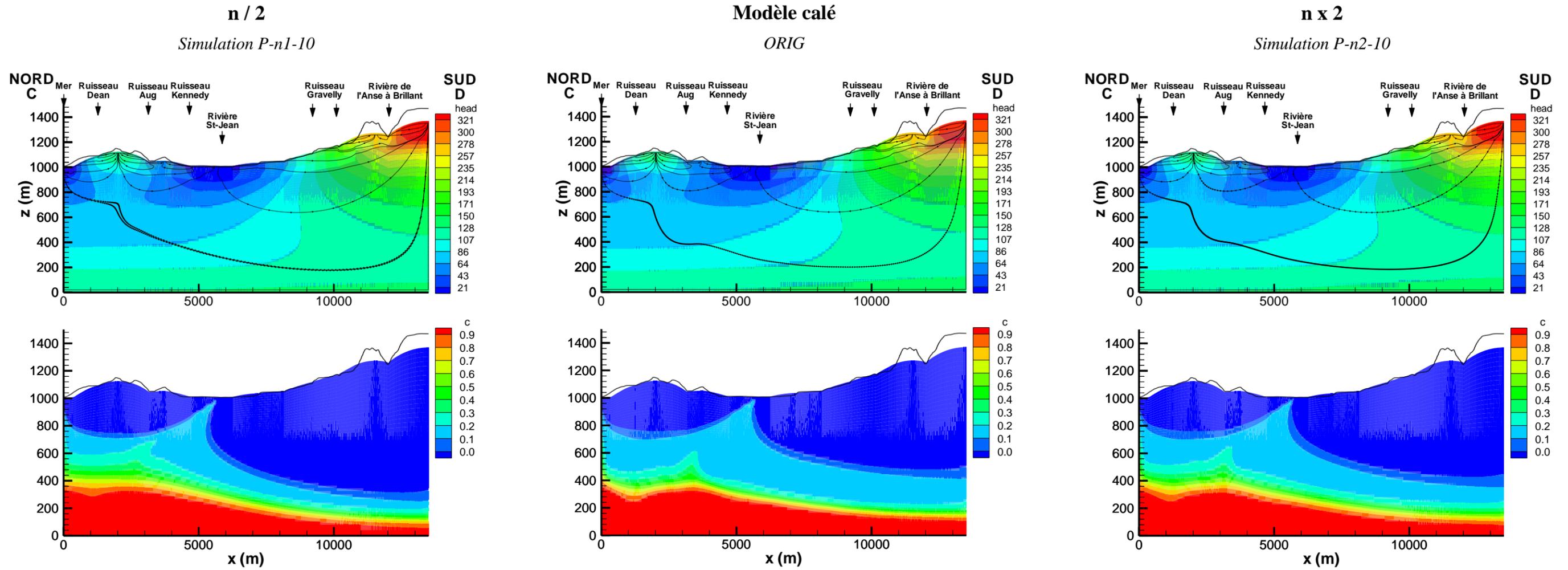


Figure 4.15 Analyse paramétrique - Porosité

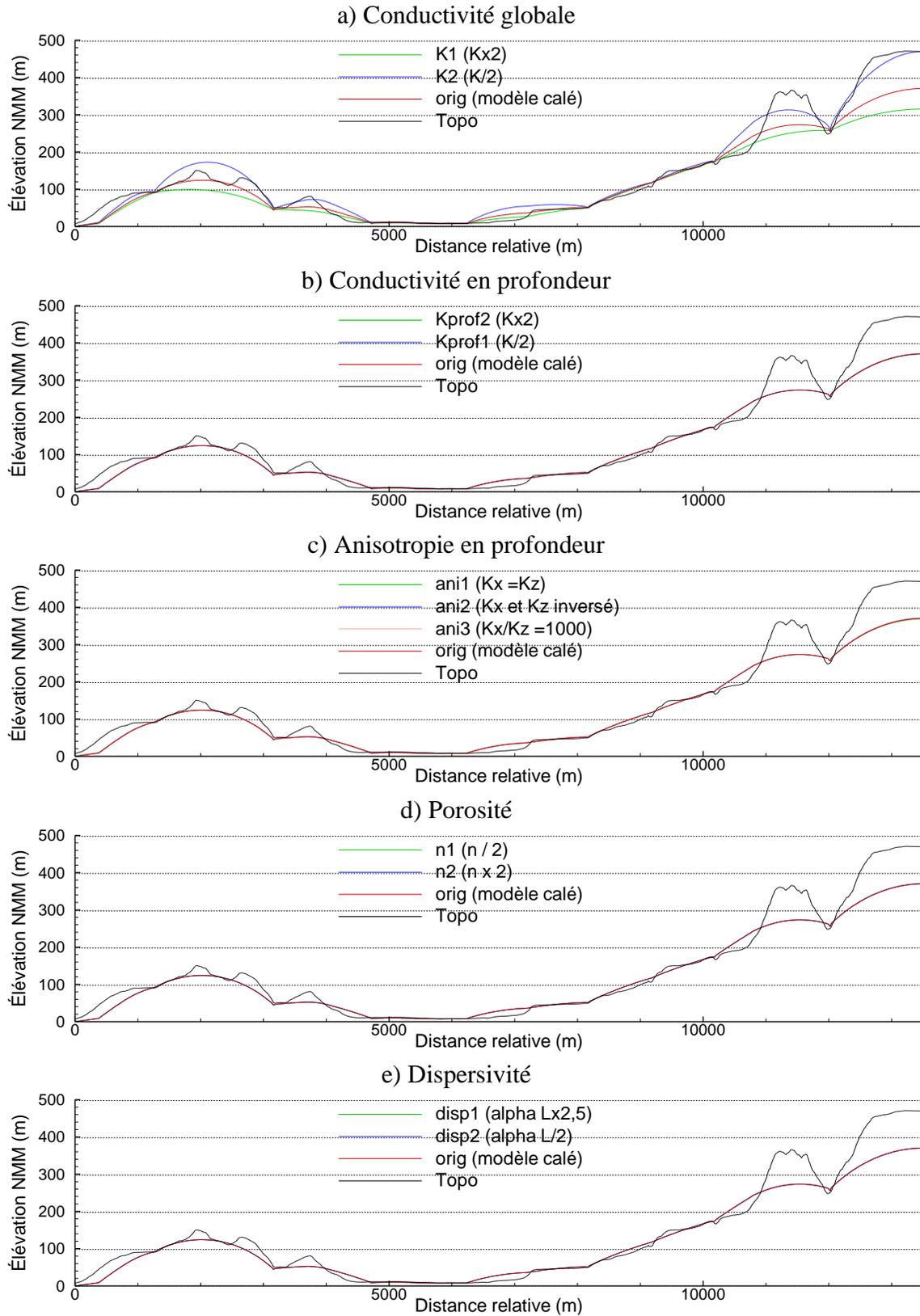


Figure 4.17 Analyse paramétrique – Élévation de la nappe

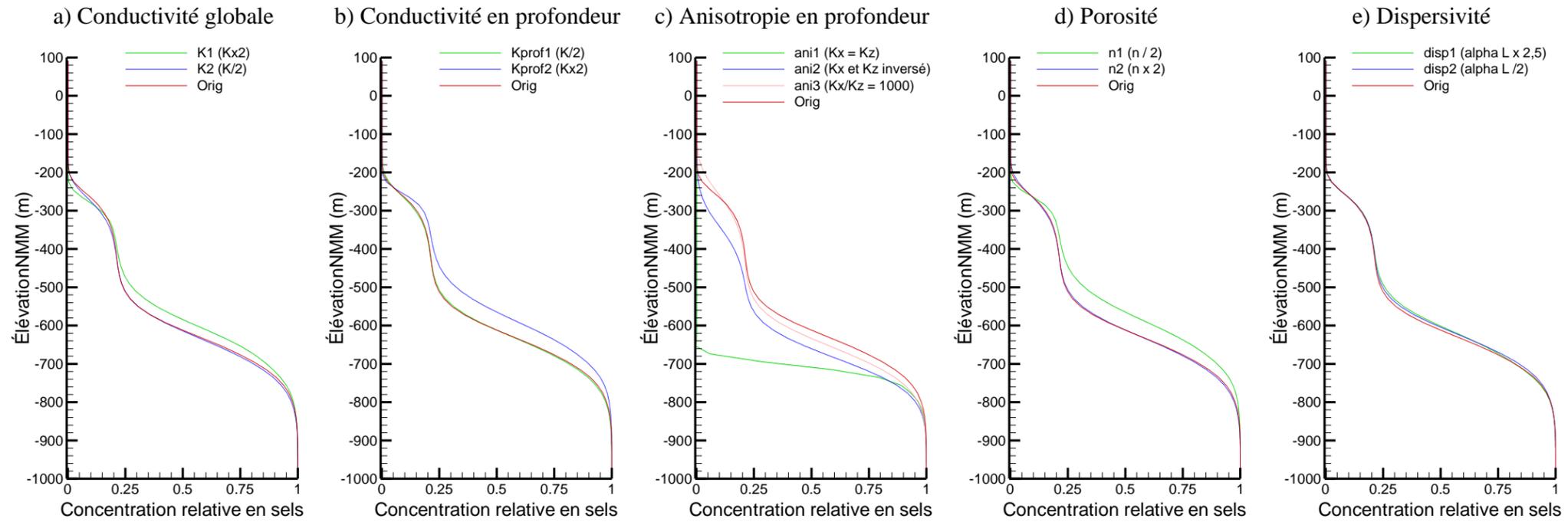


Figure 4.18 Analyse paramétrique – Profils de salinité de long de la ligne AA' (figure 4.4a)

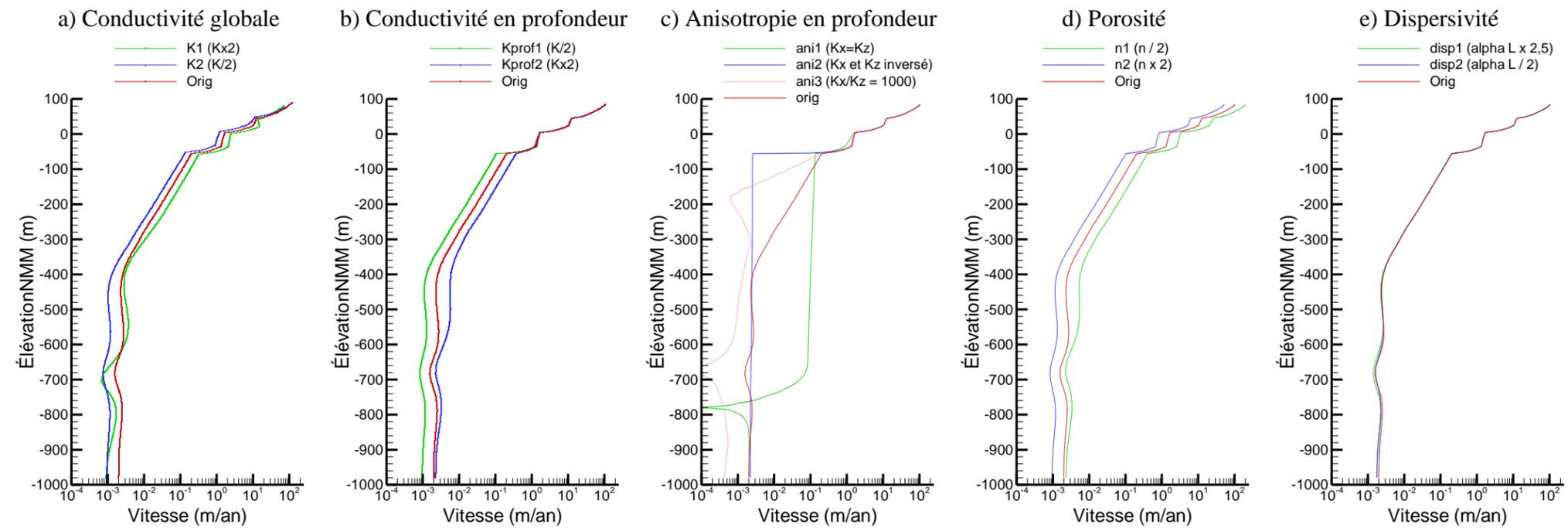


Figure 4.19 Analyse paramétrique – Profils de vitesse de long de la ligne AA' (figure 4.4a)

5. CONCLUSIONS

5.1. Principales conclusions

Les travaux documentés dans ce mémoire présentent la caractérisation et la modélisation des conditions d'écoulement à densité variable au-dessus du réservoir pétrolier de Haldimand à Gaspé.

Les travaux de caractérisation ont servi à définir les conditions d'écoulement de l'eau souterraine. Les voies de migration, qui sont contrôlées par l'écoulement, montrent que les milieux récepteurs d'une contamination éventuelle aux sites pétroliers seraient les cours d'eau. Les puits résidentiels et municipaux ne seraient pas des milieux récepteurs puisqu'ils ne se situent pas dans le même bassin versant. Les positions des puits d'observation existants permettraient de détecter la contamination avant qu'elle n'atteigne les milieux récepteurs. La caractérisation a également permis de produire un modèle conceptuel hydrogéologique qui a servi de base au développement du modèle numérique (écoulement, transport, âge). La vulnérabilité de l'eau souterraine à une contamination en surface pour le secteur Haldimand est de moyenne à très élevée. Un éventuel épanchement en surface aurait donc 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.

Au niveau des matériaux, le roc poreux et fracturé (grès et mudrocks) 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, est contrôlée par 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. Au niveau de l'écoulement de l'eau souterraine, les hauts topographiques ne sont pas recouverts de till, ce qui en font 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 implique aussi une réduction de la vulnérabilité. 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. 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.

La modélisation numérique a permis de mieux comprendre le système d'écoulement régional et ses implications sur le risque environnemental. La simulation représente un écoulement à densité variable qui tient compte de la migration de sels et d'hydrocarbures dissous sans considérer de phase immissible. De plus, la voie potentielle de migration du méthane le long du forage pétrolier n'a pas été considérée parce que la modélisation vise la représentation le système régional et non pas l'entourage immédiat du puits pétrolier. À une échelle locale, l'écoulement actif sous Haldimand serait peu profond allant jusqu'à environ 120 m sous le niveau moyen de la mer (NMM). De l'eau douce pourrait se trouver jusqu'à environ 200 m sous le NMM. La profondeur de cette interface est considérée comme maximum étant donné l'approche conservatrice utilisée dans le modèle. À l'échelle régionale, la modélisation montre un apport important d'eau souterraine à partir des hautes terres situées au sud de la rivière St-Jean qui est un exutoire important, mais cette eau poursuit son écoulement jusque sous Haldimand et 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 1 million d'années) de la profondeur vers les exutoires du système d'écoulement, particulièrement la rivière St-Jean, sans nécessiter de voies d'écoulement préférentielles. Sous la péninsule Haldimand, on retrouverait des eaux à long temps de résidence (1000 à 10 000 ans) à de relativement faibles profondeurs, ce qui expliquerait l'observation des eaux souterraines plus évoluées indiquées par la géochimie (Peel, 2014) dont la répartition pourrait être influencée par un patron complexe de fracturation près de la surface du roc. Enfin le traçage de particules montre que l'émission de fluides en profondeur prendrait de très longs temps à atteindre la surface sans voie de migration préférentielle. On constate également qu'il y a peu de lien entre la surface et la profondeur. L'isolement du réservoir est d'ailleurs démontré par l'analyse des pressions réalisée par Peel (2014).

L'analyse paramétrique du modèle numérique a permis d'observer l'effet de la variation de certains paramètres sur le modèle. Les paramètres qui ont été analysés sont la conductivité hydraulique globale, la conductivité hydraulique en profondeur, l'anisotropie en profondeur, la

porosité ainsi que la dispersivité. Ces simulations ont démontré que la conductivité hydraulique globale est le seul paramètre qui a une influence sur le profil d'élévation de la nappe, mais qu'une anisotropie en profondeur plus forte que celle sélectionnée initialement dans le modèle serait plausible et entraînerait une profondeur d'eau douce sous Haldimand moins importante que celle indiquée par le cas de base (modèle calé).

5.2. Recommandations

L'analyse du risque réalisée dans le cadre du rapport remis au MDDELCC (Raynauld et al., 2014) a démontré que les épanchements de liquides en surface sont les mécanismes d'émissions les plus susceptibles de se produire. Une attention particulière au choix du site pour un futur forage pétrolier est donc un premier pas vers la réduction du risque environnemental pour les eaux souterraines. L'étude de la vulnérabilité des aquifères permet de cibler les endroits les plus sensibles à la contamination de surface. Le choix d'un site de forage devrait donc tenir compte de la vulnérabilité et ainsi éviter les endroits les plus vulnérables. Un futur site de forage devrait également tenter d'éviter d'avoir des puits résidentiels, des puits municipaux ainsi que des cours d'eau comme milieu récepteur d'une contamination éventuelle au site de forage. Pour ce faire, la définition des bassins hydrologiques et hydrogéologiques permet d'identifier rapidement les milieux récepteurs potentiels. Une fois le site de forage choisi, il est important de prévoir l'emplacement des puits d'observation puisque ces ouvrages serviront de puits de surveillance. De plus, des mesures de protection de l'aquifère au roc, telle que la mise en place d'une membrane sous le site de forage, permettraient de limiter le risque de contamination de l'aquifère au roc directement au site de forage. Une gestion rigoureuse des opérations de transport, transfert et entreposage des fluides contribuerait aussi à la réduction du risque de contamination. Le coffrage du puits doit également être assez profond et la cimentation doit être adéquate afin de minimiser la possibilité de fuites le long du coffrage. De plus, il serait fort utile de réaliser une étude spécifique des failles afin de vérifier leur nature, perméable ou non. Il faudrait aussi s'assurer que tout forage qui perce le réservoir est bien obturé avant de procéder à tout travaux de fracturation hydraulique du réservoir puisque Raynauld et al. (2014) ont indiqué que certains anciens puits d'exploration atteignaient le réservoir pétrolier. Une vérification devrait donc être

faite de la qualité des mesures d'abandon et de cimentation des anciens puits qui avaient été réalisées par le MRN (Foragaz, 1999).

Concernant le modèle numérique, il serait intéressant de poursuivre l'analyse de sensibilité pour évaluer les effets de la variation des différents paramètres sur le temps de résidence de l'eau souterraine. De plus, la fracturation hydraulique est un autre effet qui pourrait être étudié avec le modèle numérique si cette opération venait à être considérée pour l'exploitation du réservoir pétrolier.

5.3. Apports scientifiques et pratiques

Au niveau scientifique, les travaux de caractérisation hydraulique et géochimique ont permis la définition d'un modèle conceptuel du système aquifère qui a servi de base au développement d'une modélisation numérique. Cette modélisation a montré un effet intéressant d'écoulement et de transport de masse couplé avec l'effet de densité. Le système d'écoulement imbriqué retrouvé à Haldimand mène à la présence d'eaux évoluées et très anciennes à de faibles profondeurs sous la péninsule. Le modèle permet ainsi de soutenir l'interprétation géochimique qui, quant à elle, supporte la représentativité du modèle d'écoulement. Les travaux donnent donc un exemple d'apport mutuel entre la géochimie de l'eau souterraine et la modélisation numérique de l'hydraulique d'un système aquifère.

Au niveau pratique, les travaux de caractérisation réalisés dans le cadre de ce mémoire ont permis d'acquérir une bonne compréhension des conditions hydrogéologiques du secteur d'Haldimand. Les résultats montrent aussi l'importance de considérer l'écoulement à l'échelle régionale pour évaluer les liens potentiels entre les aquifères superficiels et les niveaux profonds où se trouvent les réservoirs pétroliers. De plus, ceux-ci ont permis développer une approche d'évaluation du risque environnemental pour les eaux souterraines par rapport aux forages pétroliers et gaziers dans une région spécifique. Cette démarche constitue également un exemple d'application au nouveau cadre réglementaire (RPEP; MDDELCC, 2014). Ces travaux ont servi de base à l'évaluation du risque dont les résultats se trouvent dans l'étude globale présentée au MDDELCC (Raynauld et al., 2014).

6. RÉFÉRENCES

- APPELO, C.A.J., ET D. POSTMA. 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- 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*.
- BAALOUSHA, H. 2005. « Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza Strip, Palestine ». *Environmental Geology*, vol. 48, p. 889-900.
- 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.
- BOUCHER, A. 2013. « SGeMS 3.0 source code beta. Geostatistical Libraries and Software ». En ligne. <<https://github.com/ar2tech/ar2tech-SGeMS-public>>.
- 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.
- 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.

- CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES (CAC), 2014. Incidences environnementales liées à l'extraction du gaz de schiste au Canada, Comité d'experts chargé de l'évaluation, Harnacher la science et la technologie pour comprendre les incidences environnementales liées à l'extraction du gaz de schiste, Ottawa, ON, CAC.
- 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*. Mémoire 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- FREEZE, R.A., ET J.A. CHERRY. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs. N.J.
- FRITZ, P. 1997. « Saline groundwater and brines in cristalline 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.
- 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.
- KAZEMI, G. A., J. H. LEHR ET P. PERROCHET. 2006. *Groundwater Age*. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 325 pp.
- 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.
- LAFORST 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., 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.

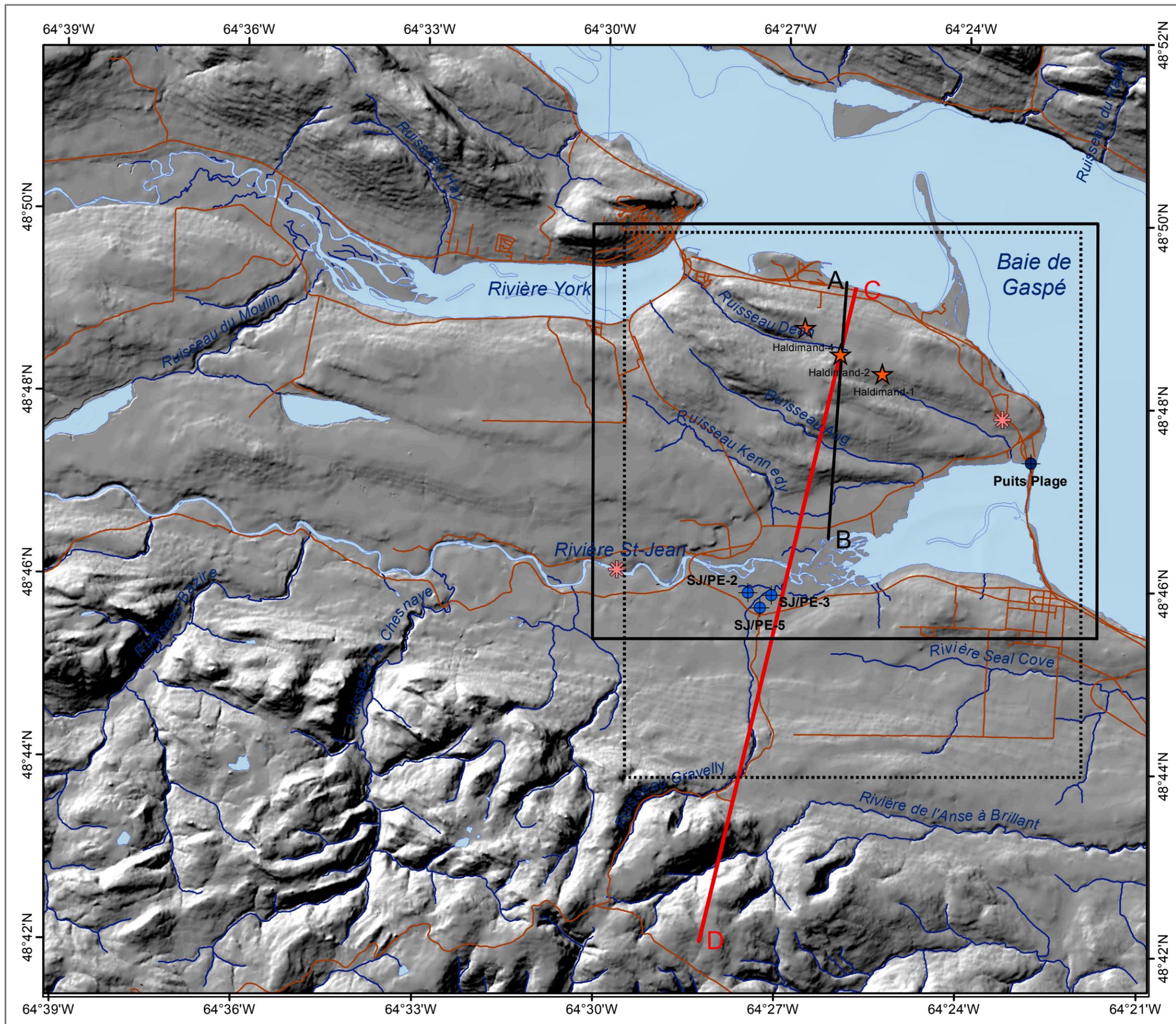
- LEFEBVRE, R., I. MALTAIS, D. PARADIS ET Y. MICHAUD. 2011. « Recharge assessment from daily soil moisture balance and well hydrographs, Portneuf unconfined aquifer, Canada ». *Geohydro 2011*, congrès conjoint de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues (IAH-CNC), de l'Association 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.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). 2014. « Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection ».
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC).. 2013. « Projet de règlement – Avis dans la *Gazette officielle du Québec* du 29 mai 2013 ».
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). 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 ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MDDELCC). 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.
- PEEL, M., 2014. *Investigation géologique et géochimique des relations entre un réservoir pétrolier et un aquifère superficiel dans le secteur Haldimand, Gaspé*. Mémoire de maîtrise, Institut National de la Recherche Scientifique -Eau, Terre et Environnement, Québec, 157 pp et 5 annexes.
- 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.
- PÉTROLIA, 2013. Communication personnelle.
- PINET, N., D. LAVOIE, P. BROUILLETTE, D.J. DION, P. KEATING, D. BRISEBOIS, M. MALO ET S. CASTONGUAY. 2005. *Gravity and aeromagnetic atlas of the Gaspé Peninsula*. Commission géologique du Canada, Dossier public 5020.
- RAYNAULD, M., H. CROW, R. LEFEBVRE, J.W. MOLSON, J. AHAD, N. BENOIT ET E. GLOAGUEN., 2013. « Caractérisation des conditions hydrogéologiques au-dessus du réservoir pétrolier d'Haldimand, Gaspé, Québec. » *Geohydro 2013*, congrès conjoint de l'Association internationale des hydrogéologues (IAH-SNC), de la North American Geosynthetic Society (NAGS) et de la Société canadienne de géotechnique (SCG) tenu à Montréal, du 29 septembre au 3 octobre 2013, 8 p.

- RAYNAULD, M., M. PEEL, R. LEFEBVRE, H. CROW, J.W. MOLSON, J. AHAD ET E. GLOAGUEN., 2014. *Caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand*, Institut National de la Recherche Scientifique - Eau, Terre et Environnement, Québec, Rapport de recherche R-1497, Mai 2014, 179 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.
- ROY, S., 2008, Maturation thermique et potentiel pétrologène de la Ceinture de Gaspé, Gaspésie, Québec, Canada. Thèse doctorale, INRS-ETE, 473 p.
- 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.
- SCHULZE-MAKUCH, D. 2005. « Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior ». *Ground Water*, vol. 43, n° 3, p. 443-456.
- 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.
- 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.
- TEC PLOT 9.0. 2009. Streamtrace calculation. En ligne. <<http://www.tecplot.com/knowledgebase/2009/09/24/streamtrace-calculation/>>. Consulté en janvier 2015.
- TØTH, J. 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins on central Alberta, Canada. *J. Geophysical Research* 67:4375-4387.
- 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>.

- 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.
- 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>.

CARTES



Caractérisation et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

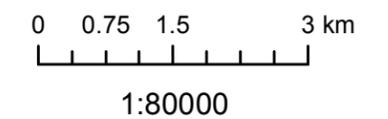
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

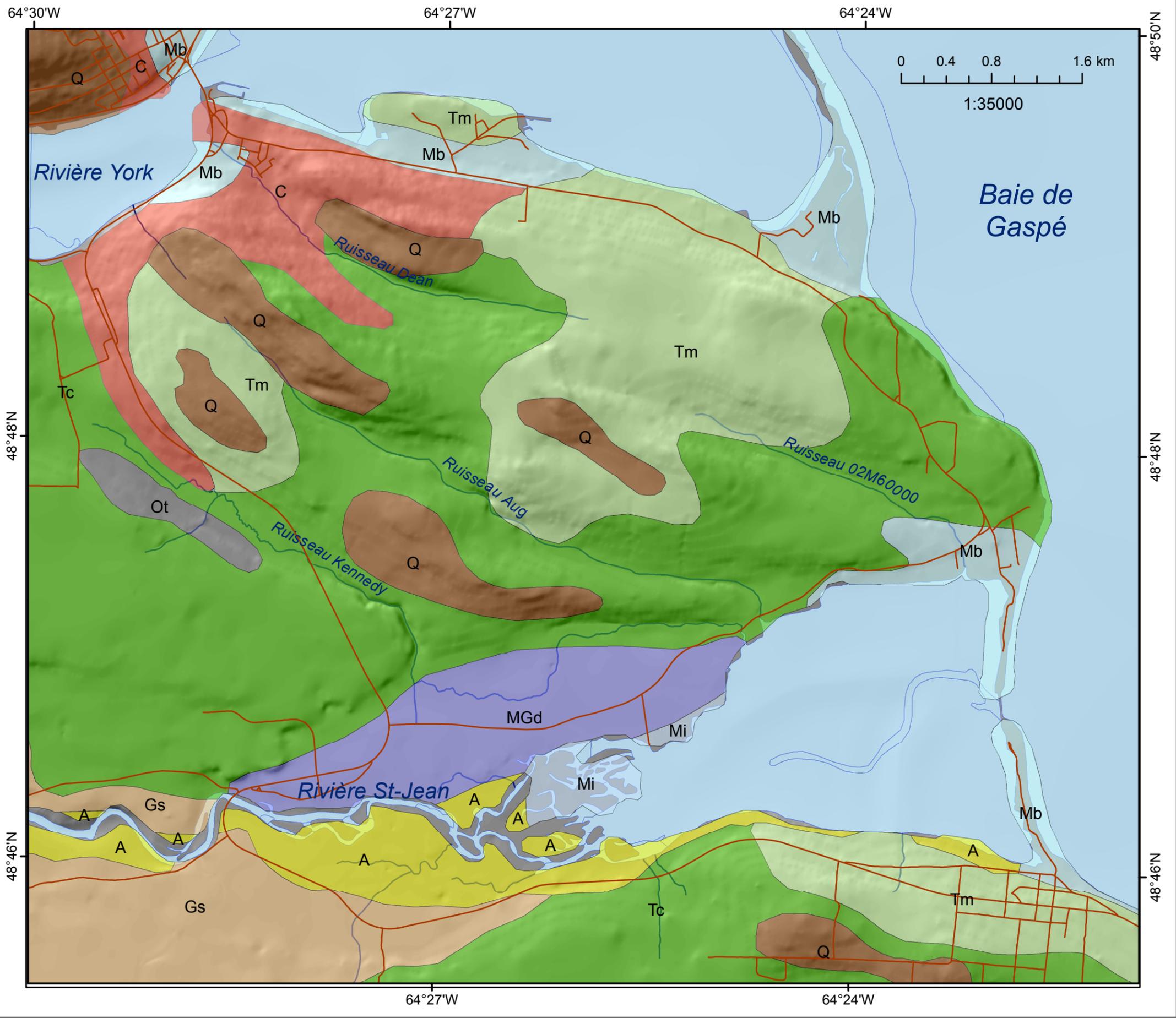
Carte 1

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 - Secteur Haldimand
- 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

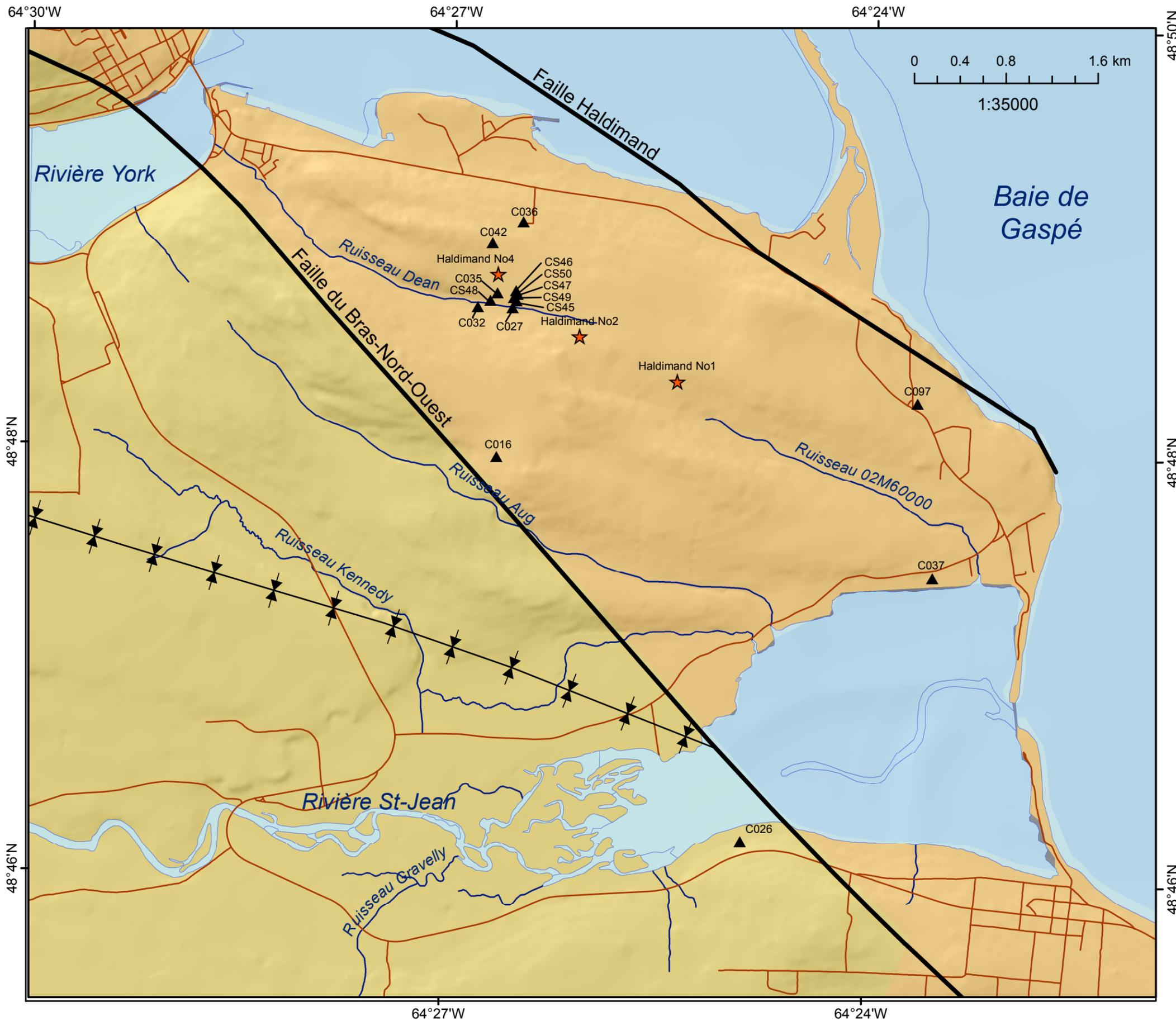
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 3

Géologie du roc (Brisebois et al., 1991)

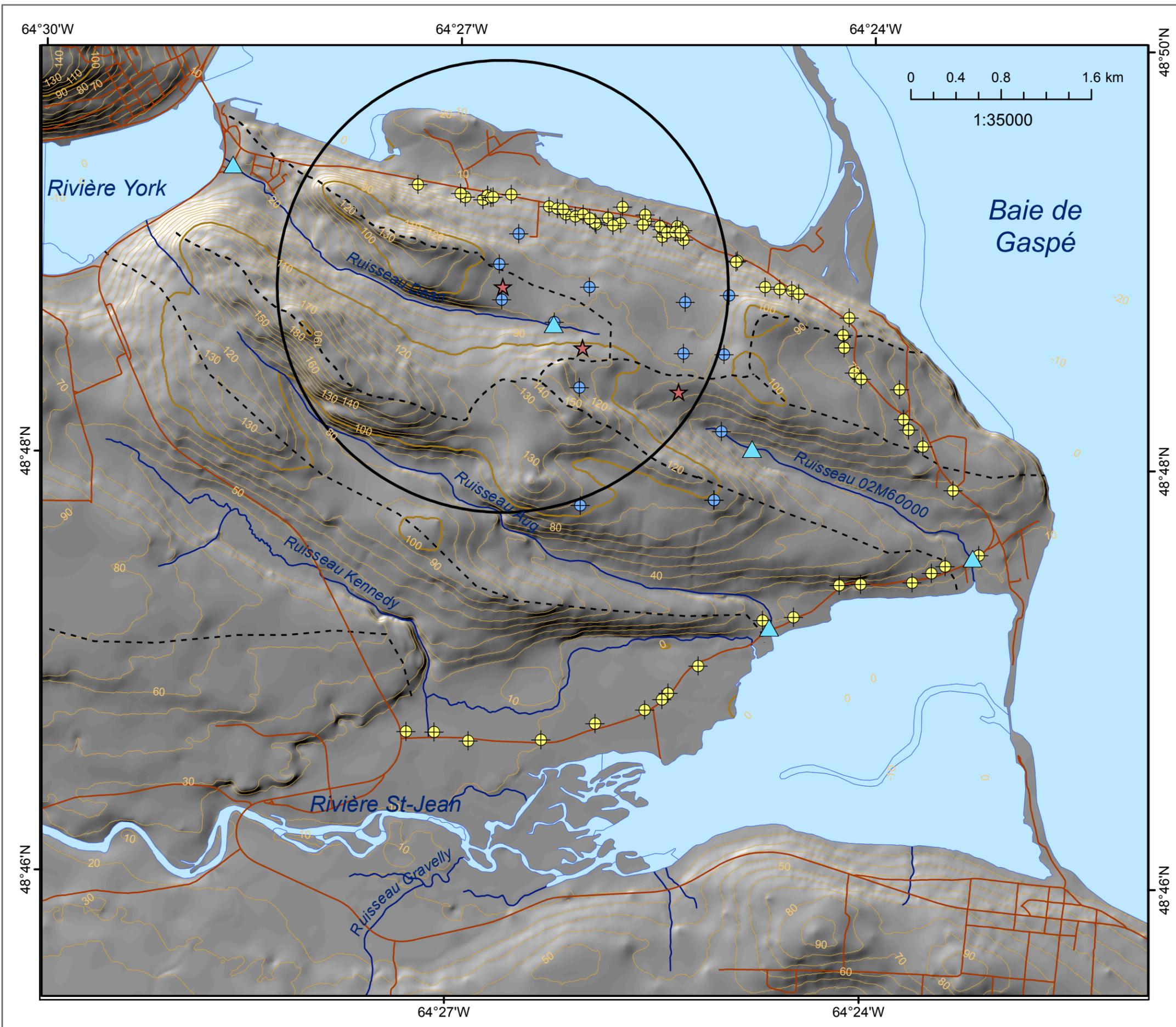
- ★ Sites de forage pétrolier Pétrolia
- ▲ Anciens forages pétroliers (SIGPEG, Pétrolia)

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

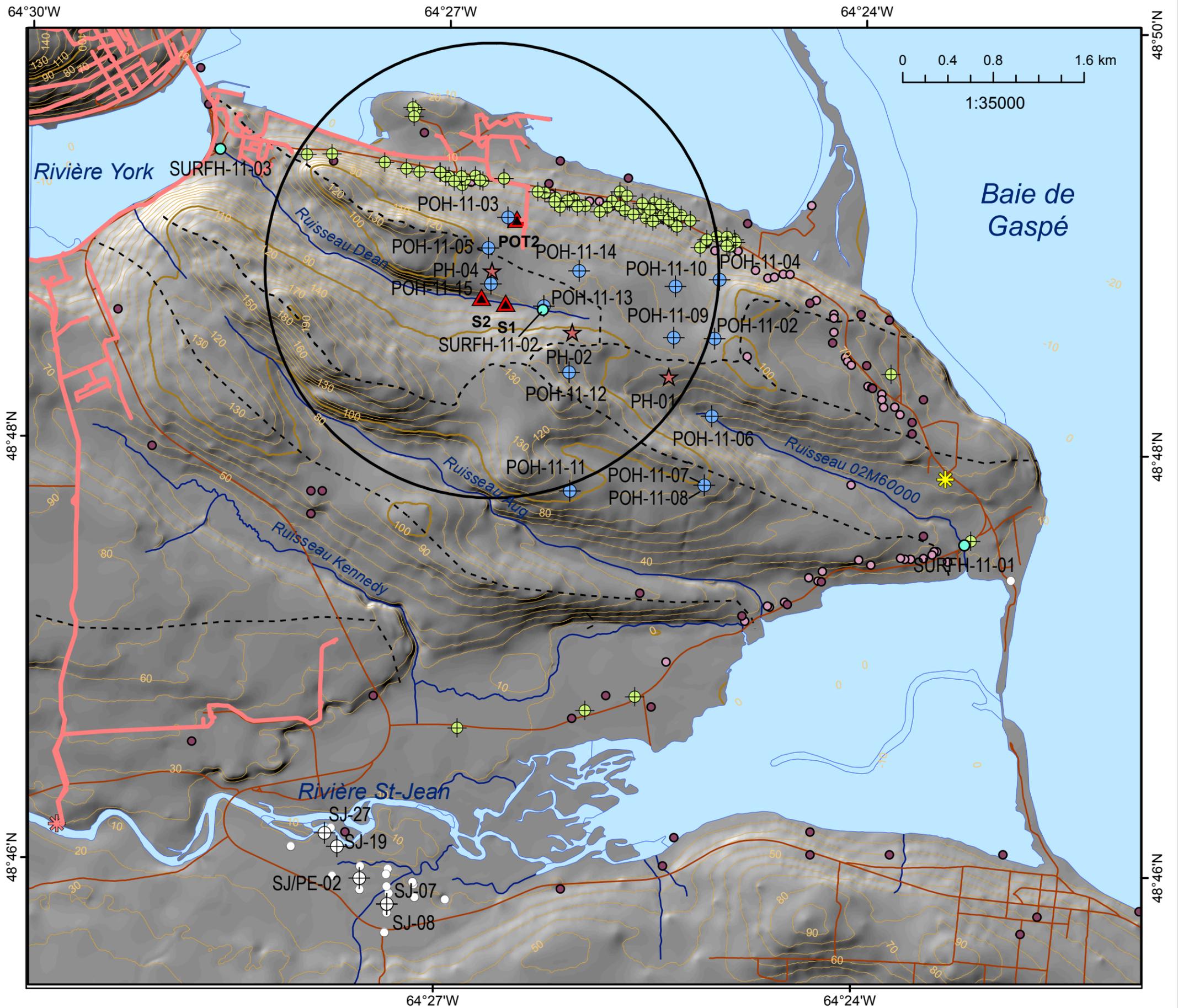
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

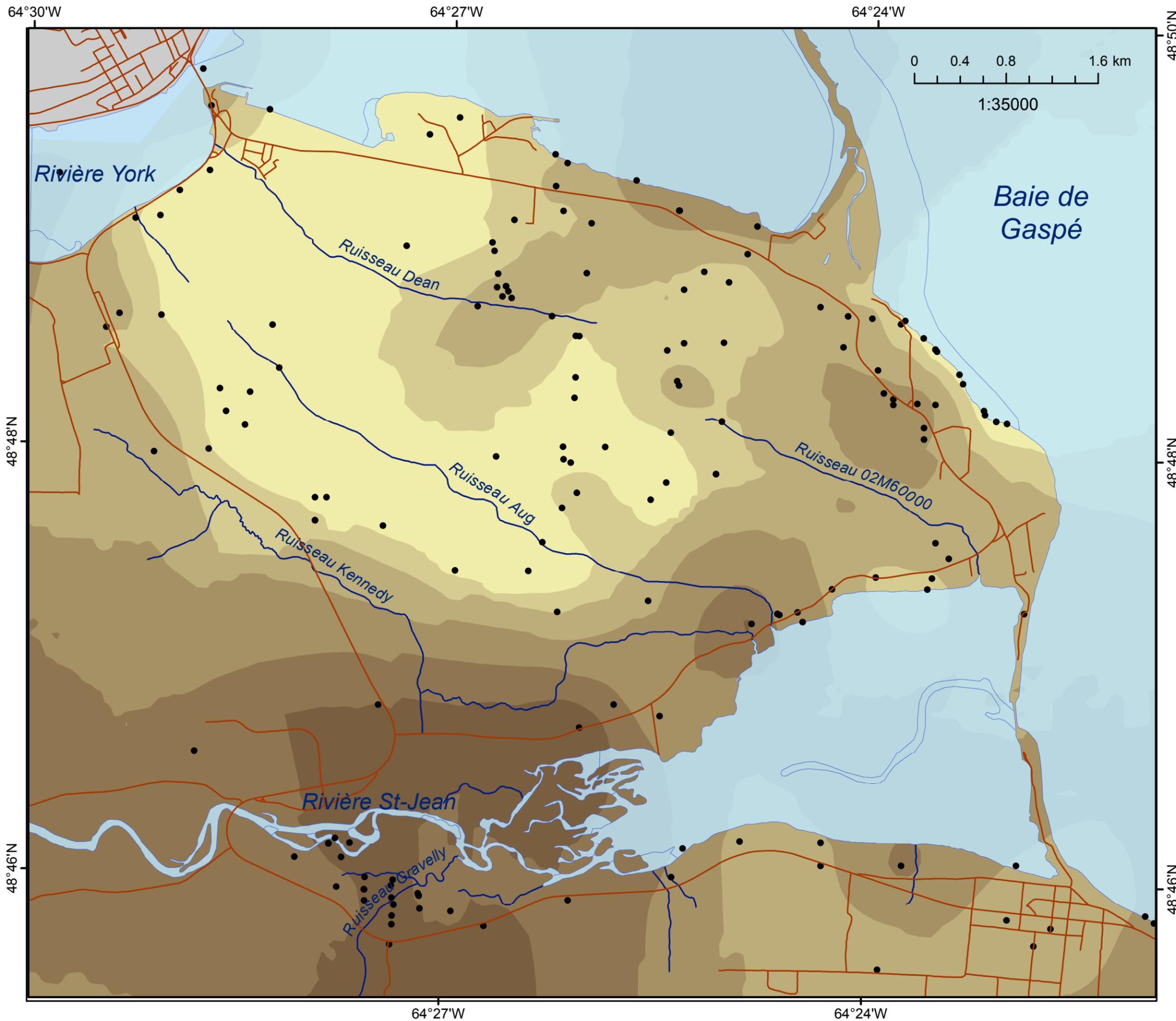
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 5

Localisation des sites d'échantillonnage
du MDDELCC 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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.

64°30'W

64°27'W

64°24'W

48°50'N

0 0.4 0.8 1.6 km

1:35000

Rivière York

Baie de Gaspé

Ruisseau Jean

Ruisseau Aug

Ruisseau Kennedy

Rivière St-Jean

Ruisseau Gravelly

48°48'N

48°48'N

48°46'N

48°46'N

64°27'W

64°24'W

INRS

Université d'avant-garde

Caractérisation et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 7

Contrôles sur les épaisseurs

— Routes

Données utilisées pour le krigage

○ Données quaternaires 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

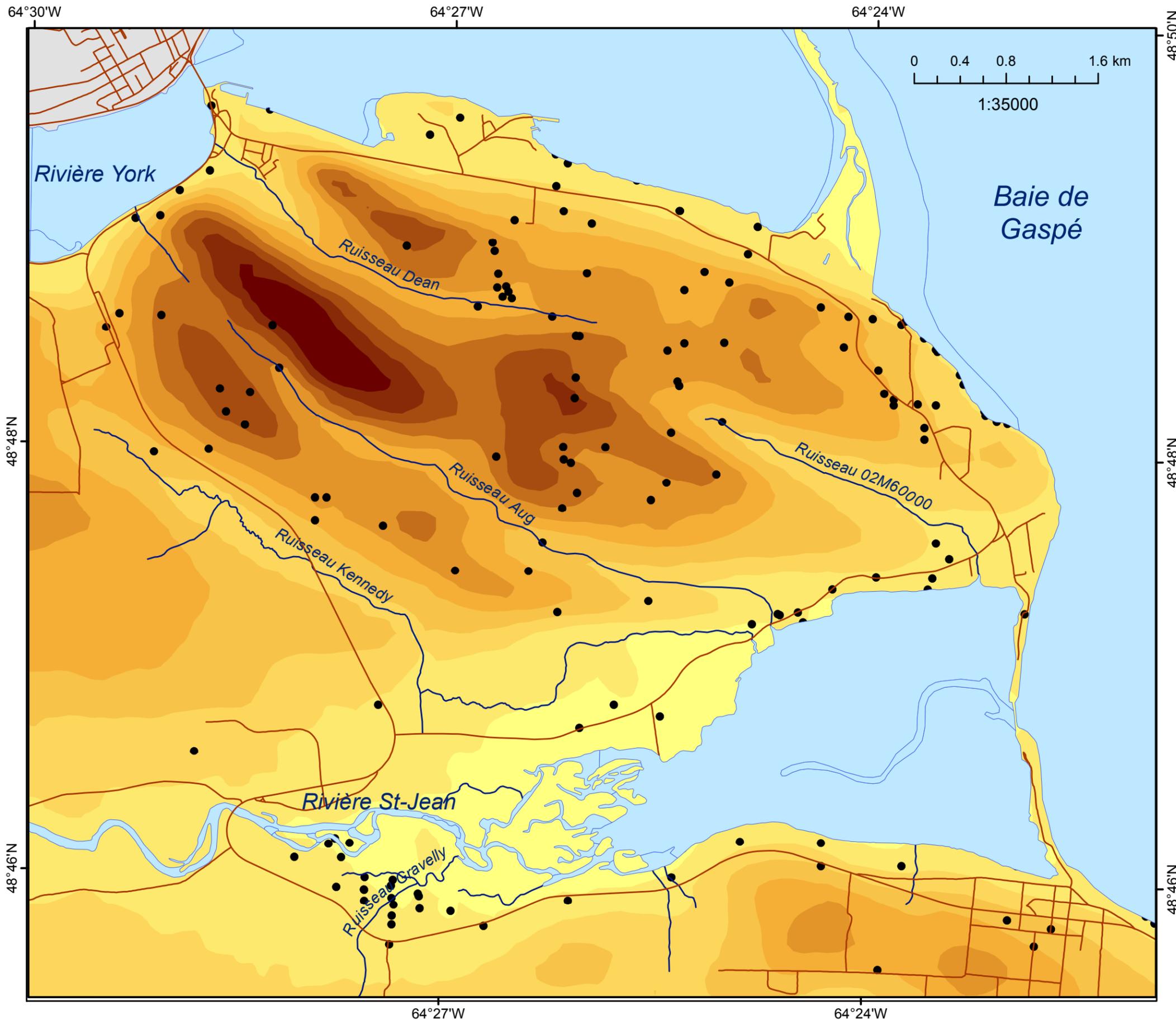
4 - 7

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

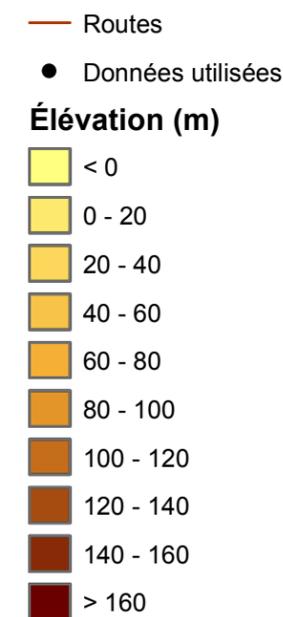
Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

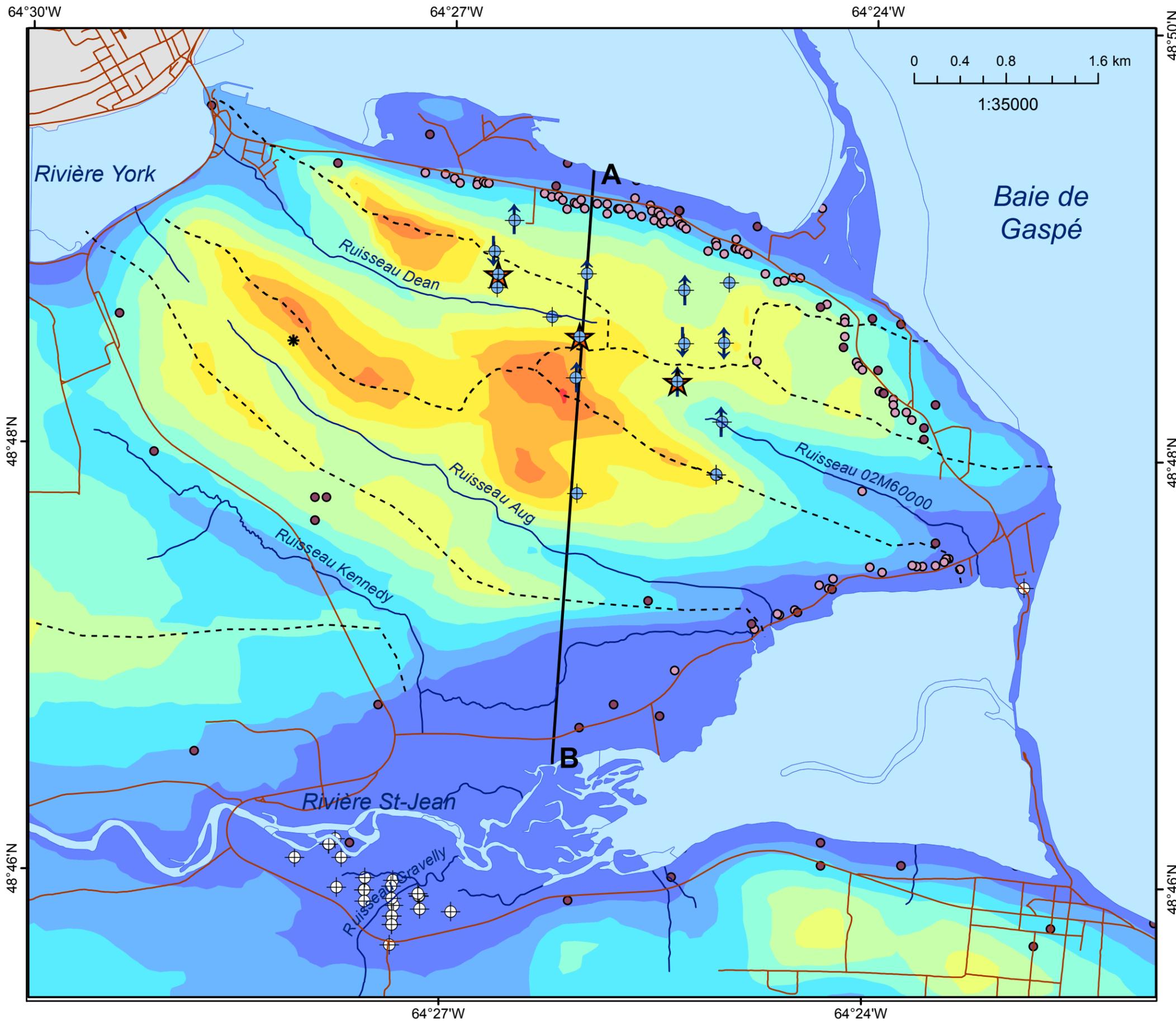
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 8

Élévation de la surface du roc



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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 9

Piezométrie de l'aquifère au roc

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

Données utilisées

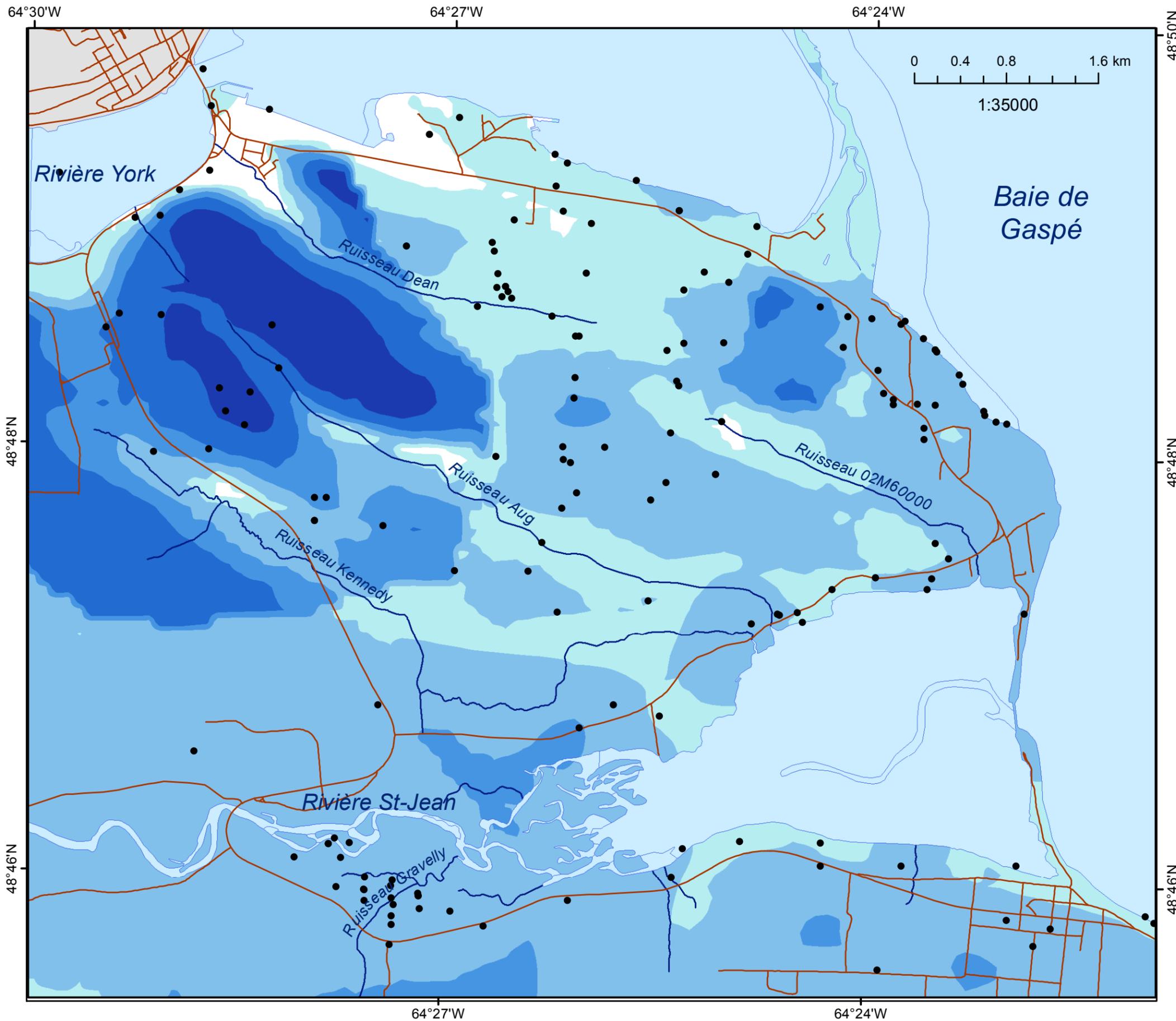
- ⊕ Puits d'observation (Septembre 2013)
- ⊕ Puits municipaux (Arrakis, 2011)
- ⊙ Puits résidentiels (LNA, 2008)
- Données SIH
- * Contrainte fixée
- ★ Sites de forage pétrolier Pétrolia

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

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

Piezométrie (m NMM)

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



Caractérisation et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynald

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

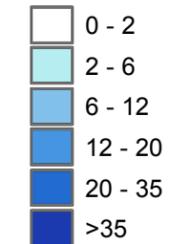
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 10

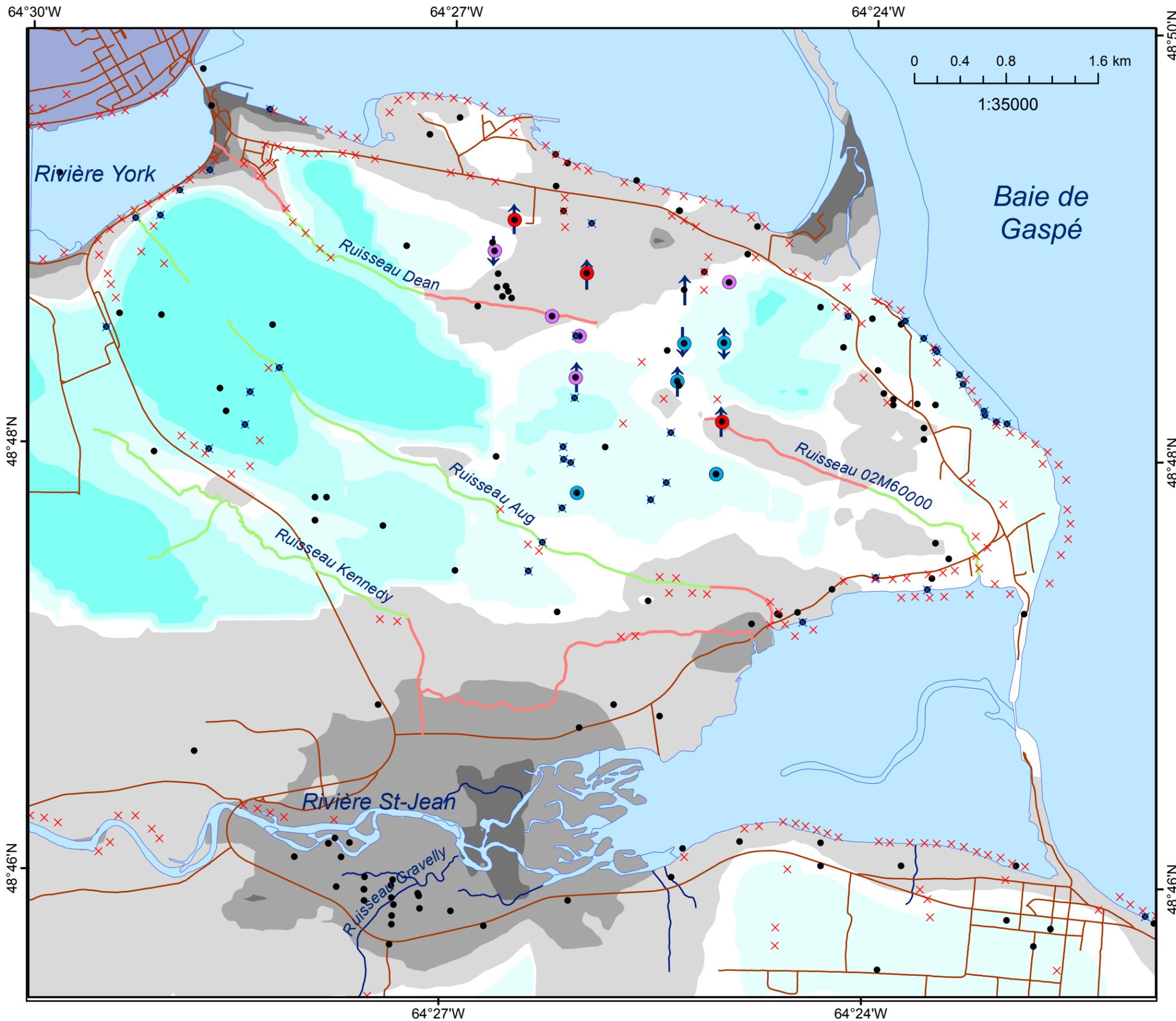
Profondeur de la nappe

● Données utilisées

Profondeur (m)



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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

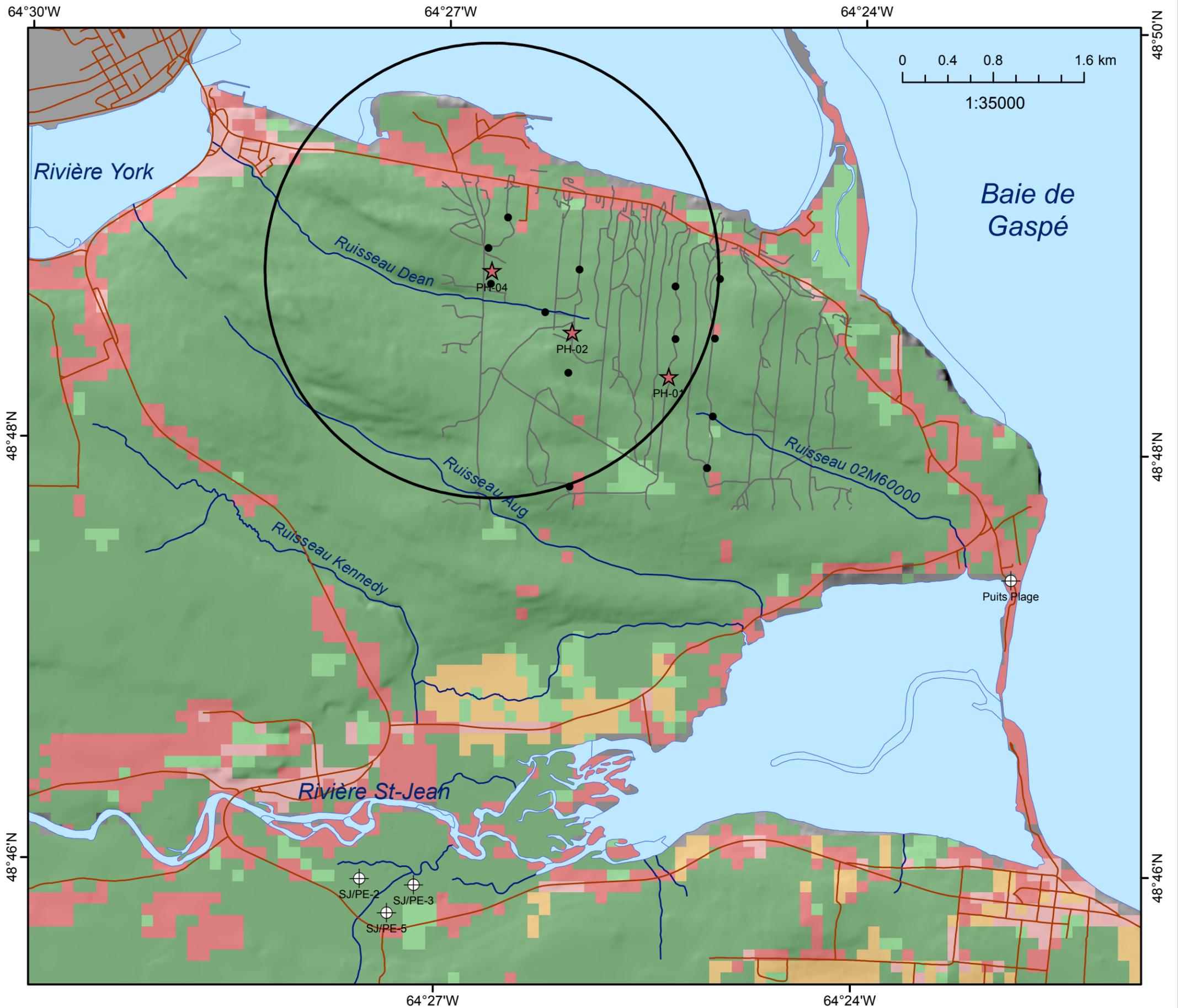
INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

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 | Conditions captives |
| ■ -10 - -5 | |
| ■ -5 - 2.5 | Conditions libres Zones de recharge |
| ■ 2.5 - 5 | |
| ■ 5 - 10 | |
| ■ 10 - 20 | |
| ■ >20 | |

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

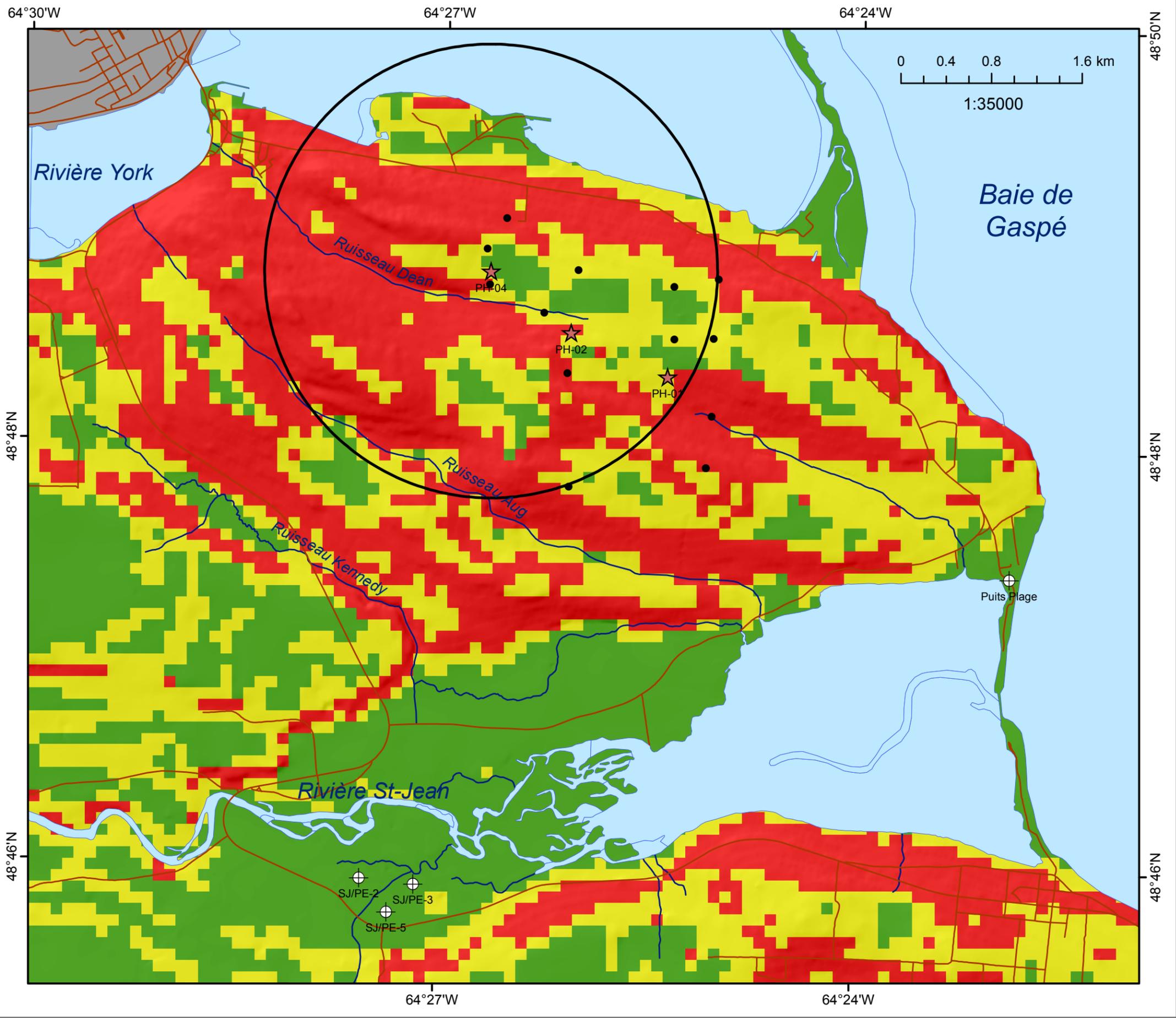
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

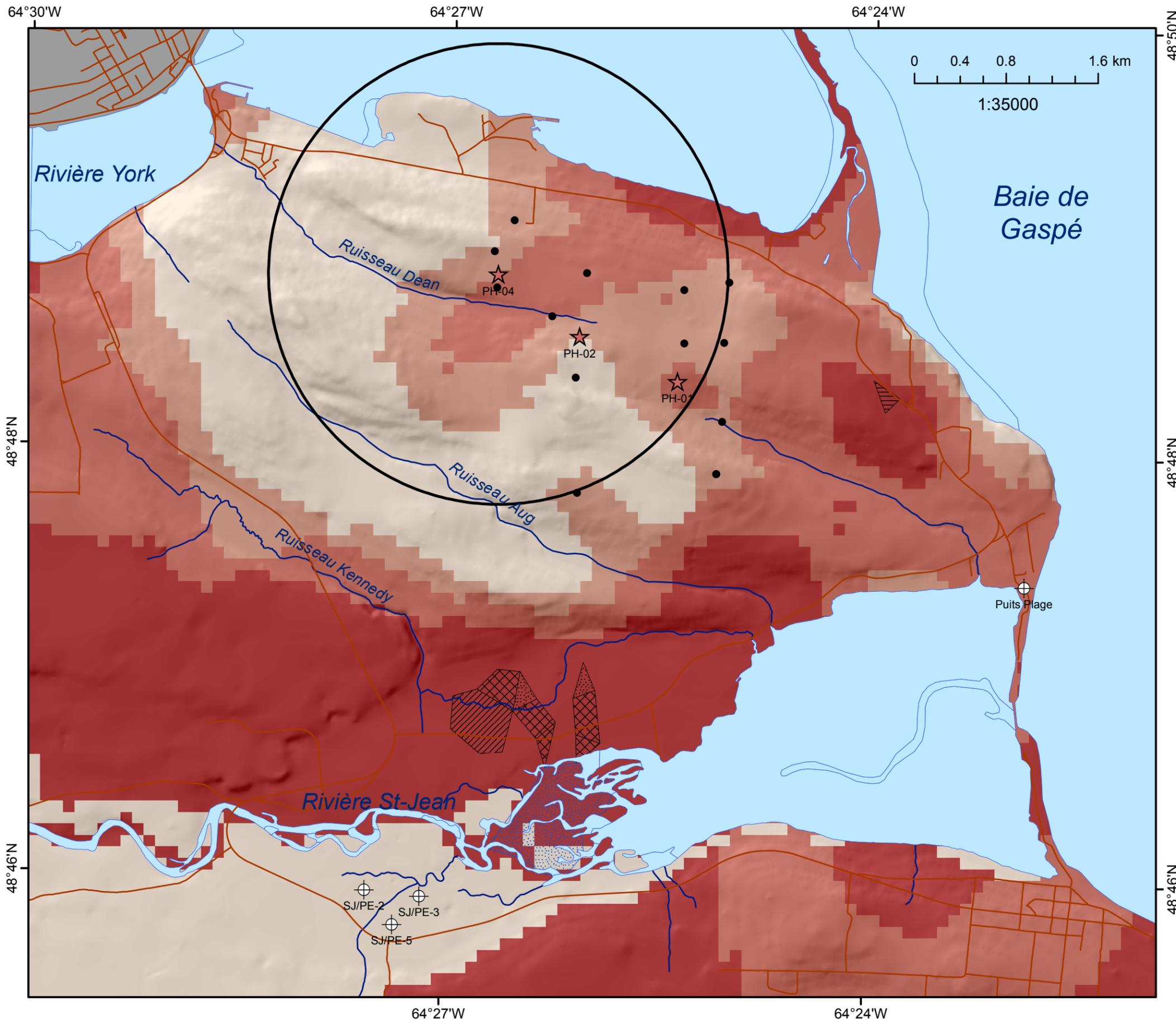
Carte 13

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 (>math>8\%</math>) |



Caractérisation et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 14

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

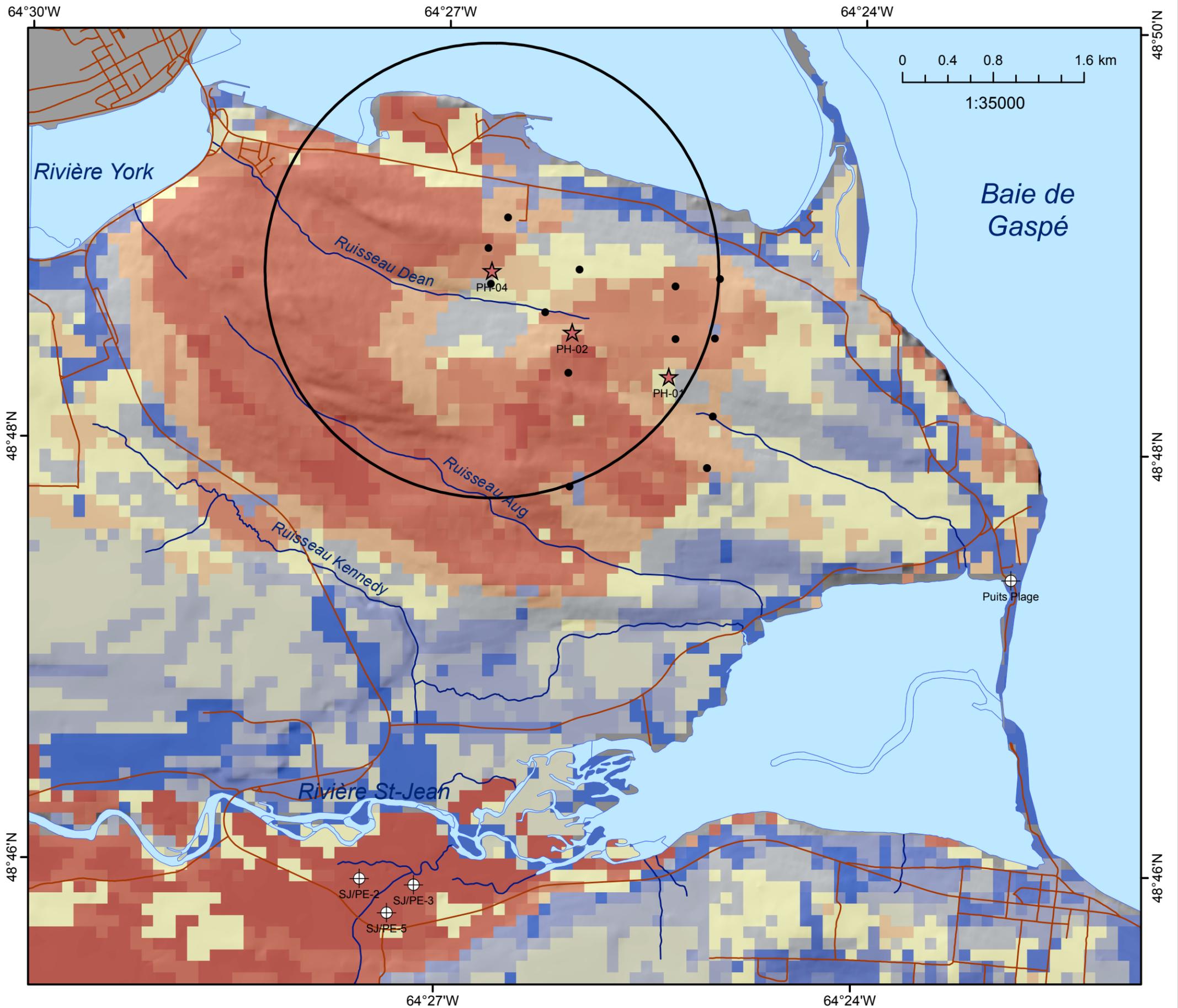
- ⊕ Puits municipaux
- ★ Puits d'alimentation forage pétrolier
- Puits d'observation
- Rayon de 2 km du PH-04

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

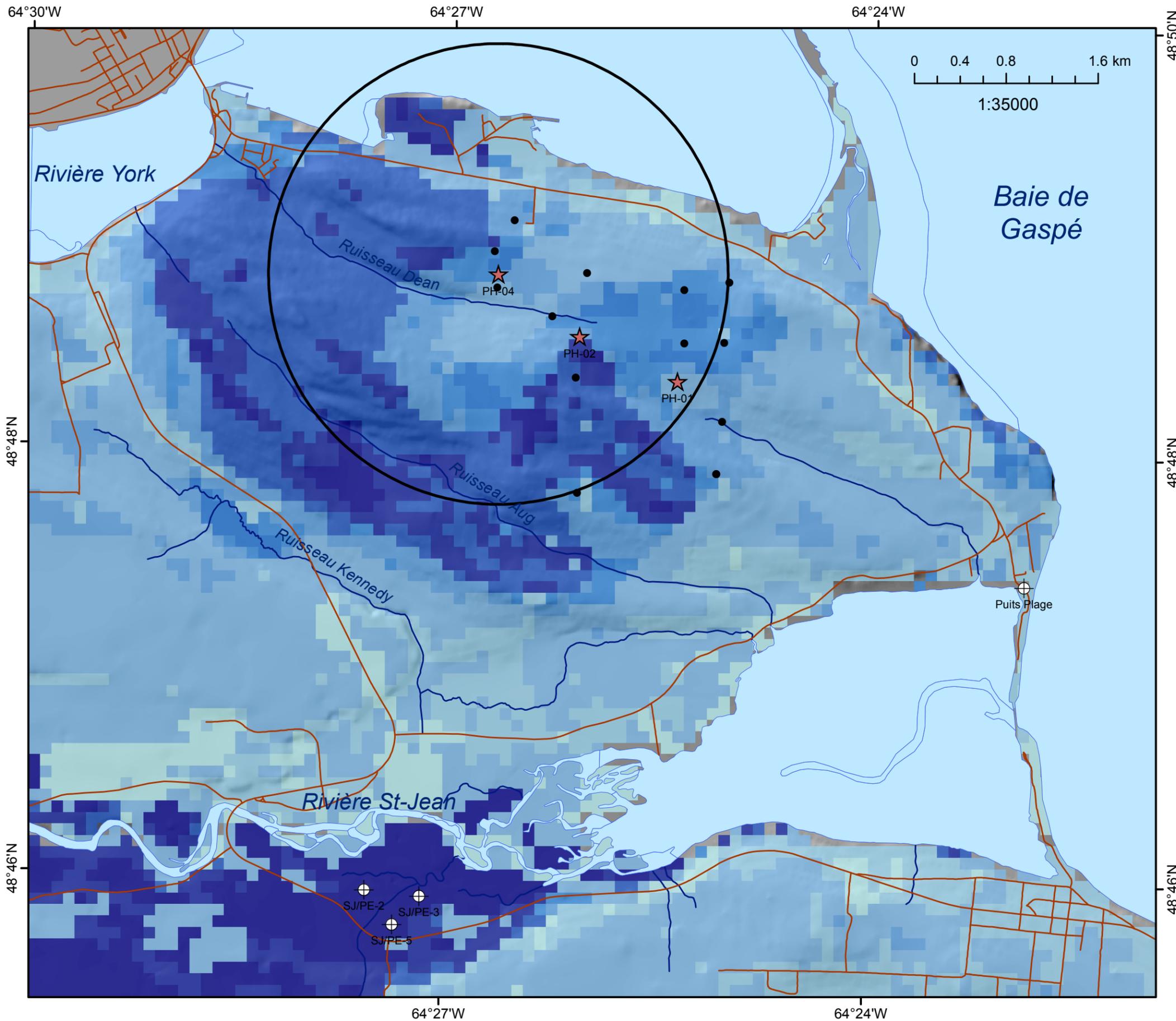
Carte 15

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

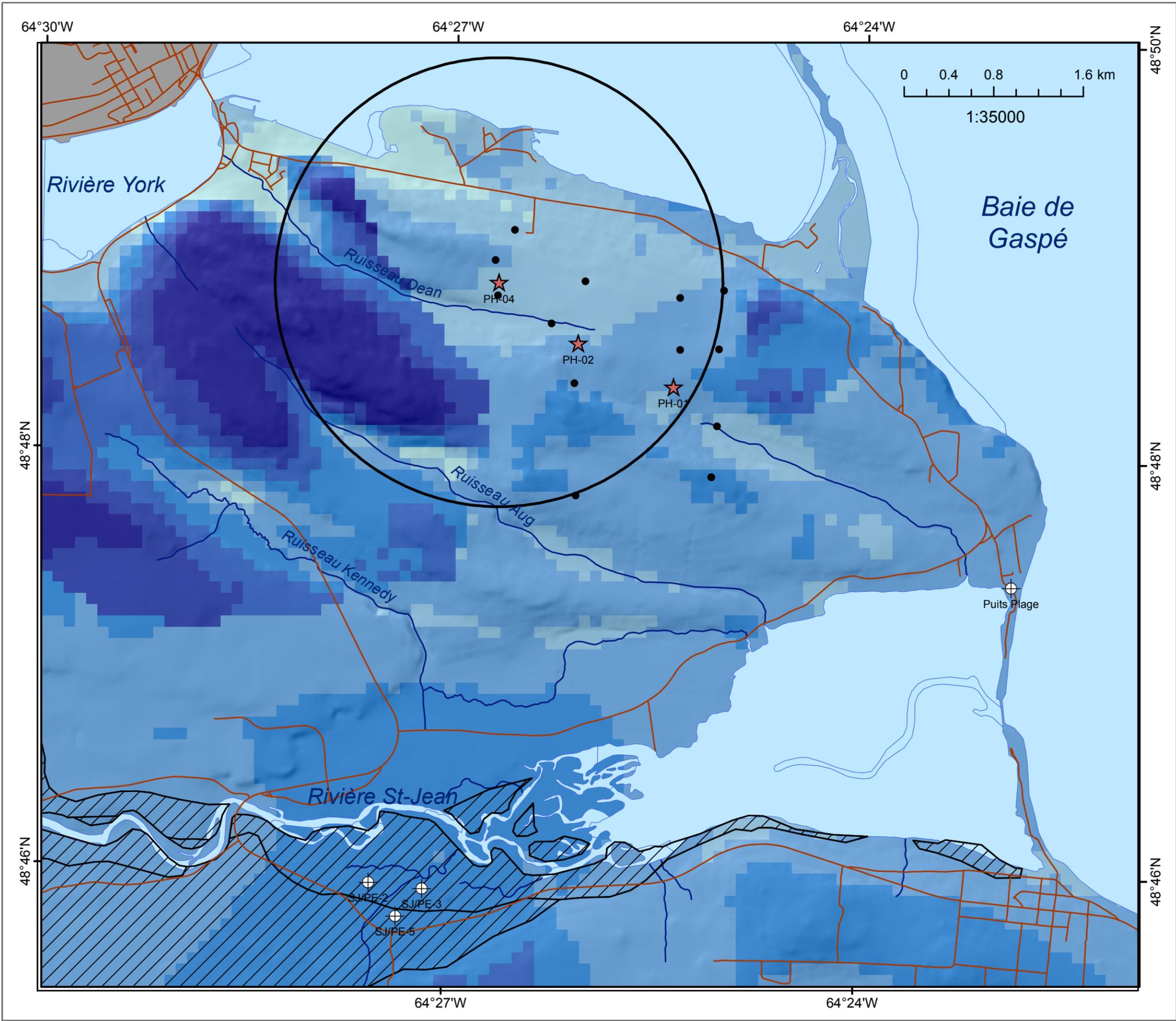
Carte 16

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

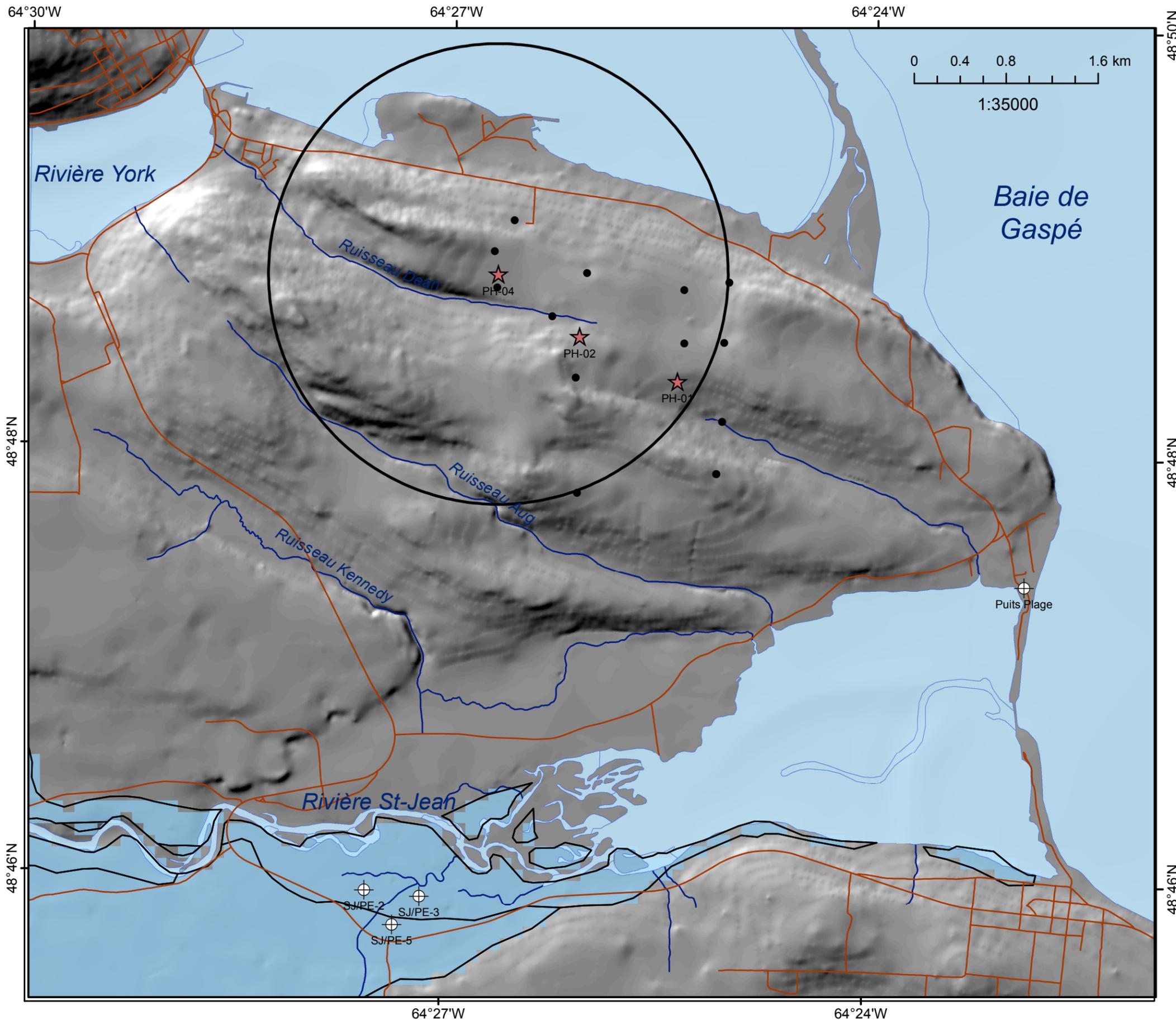
Carte 17

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

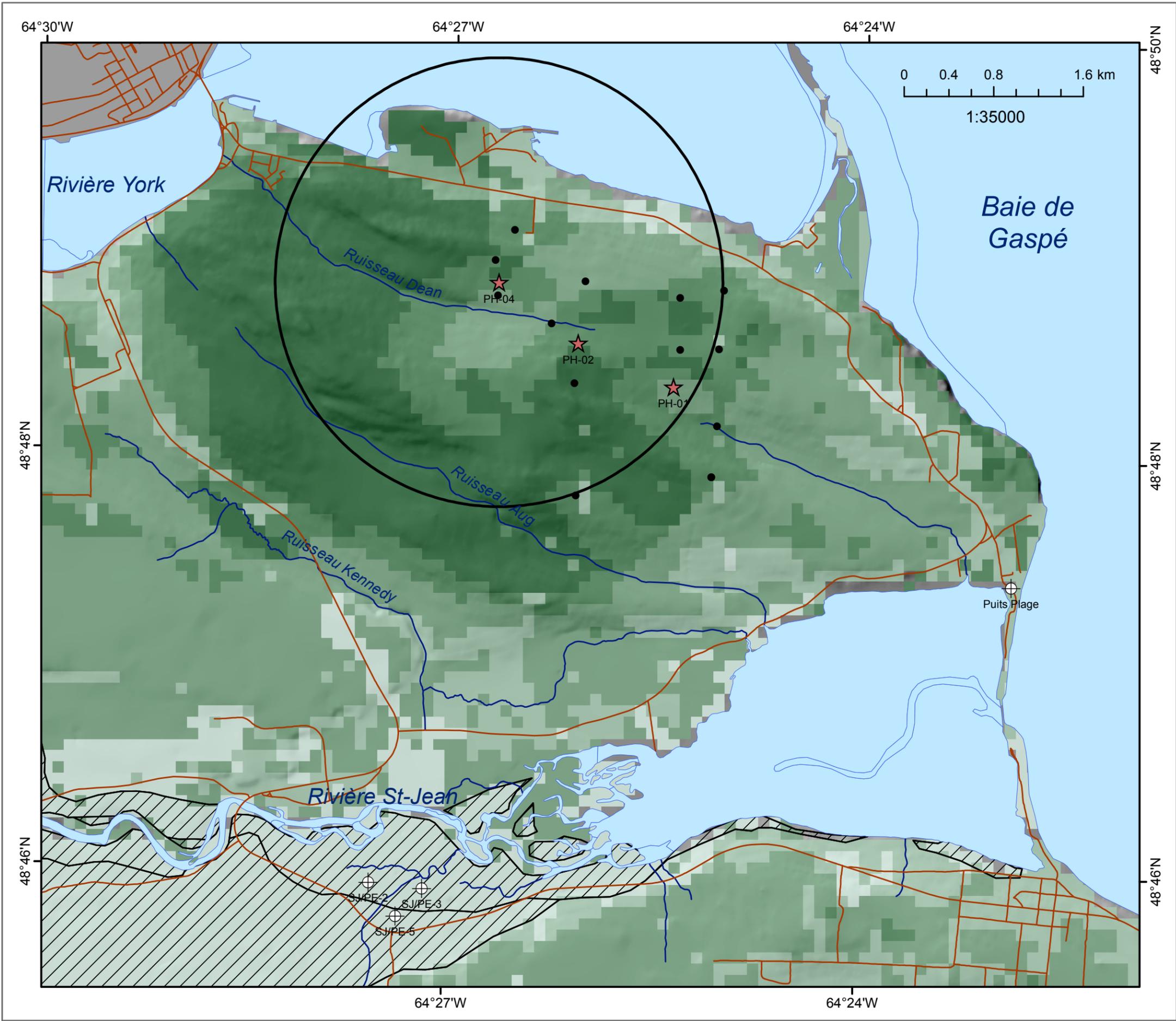
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

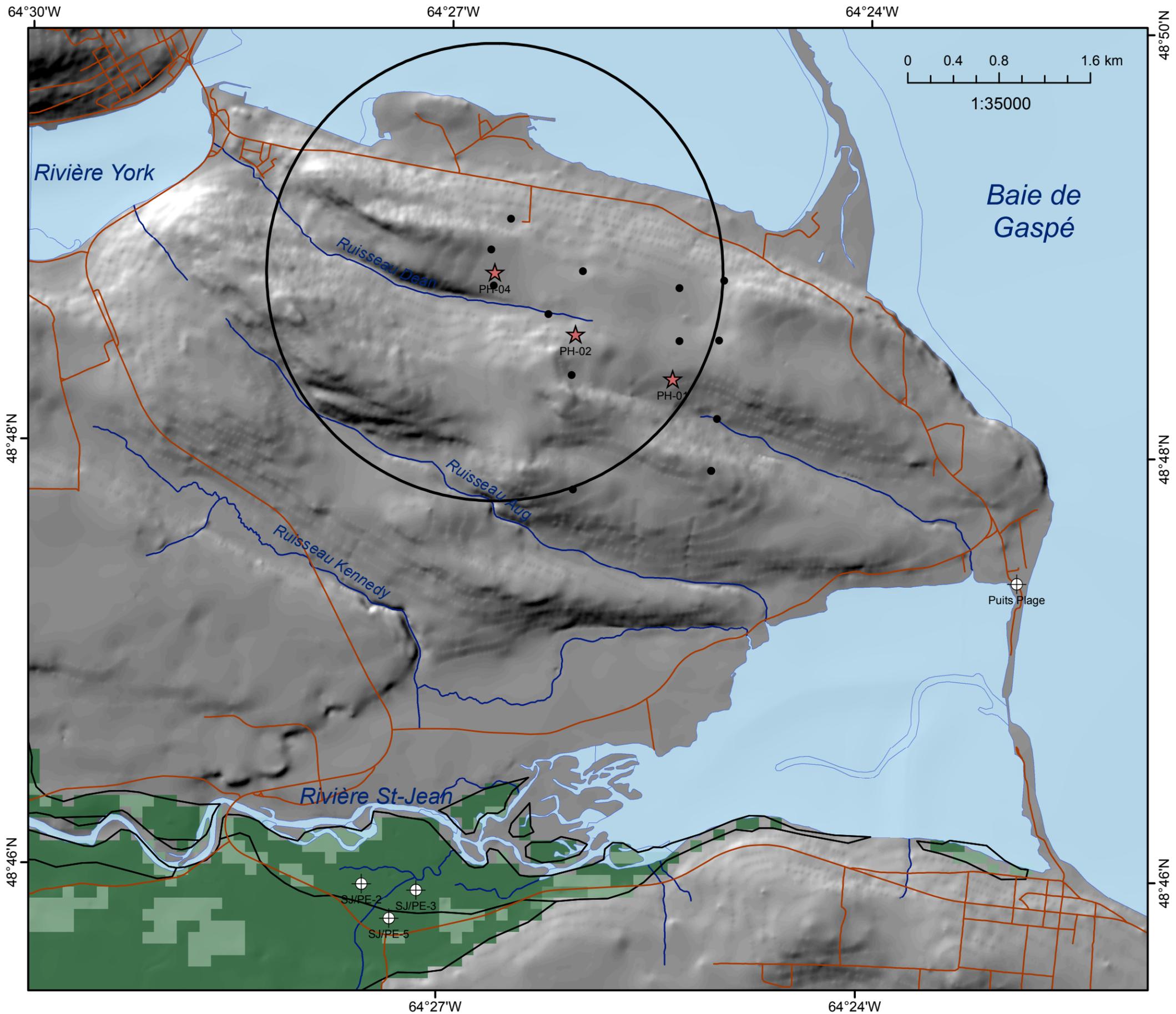
Carte 19

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

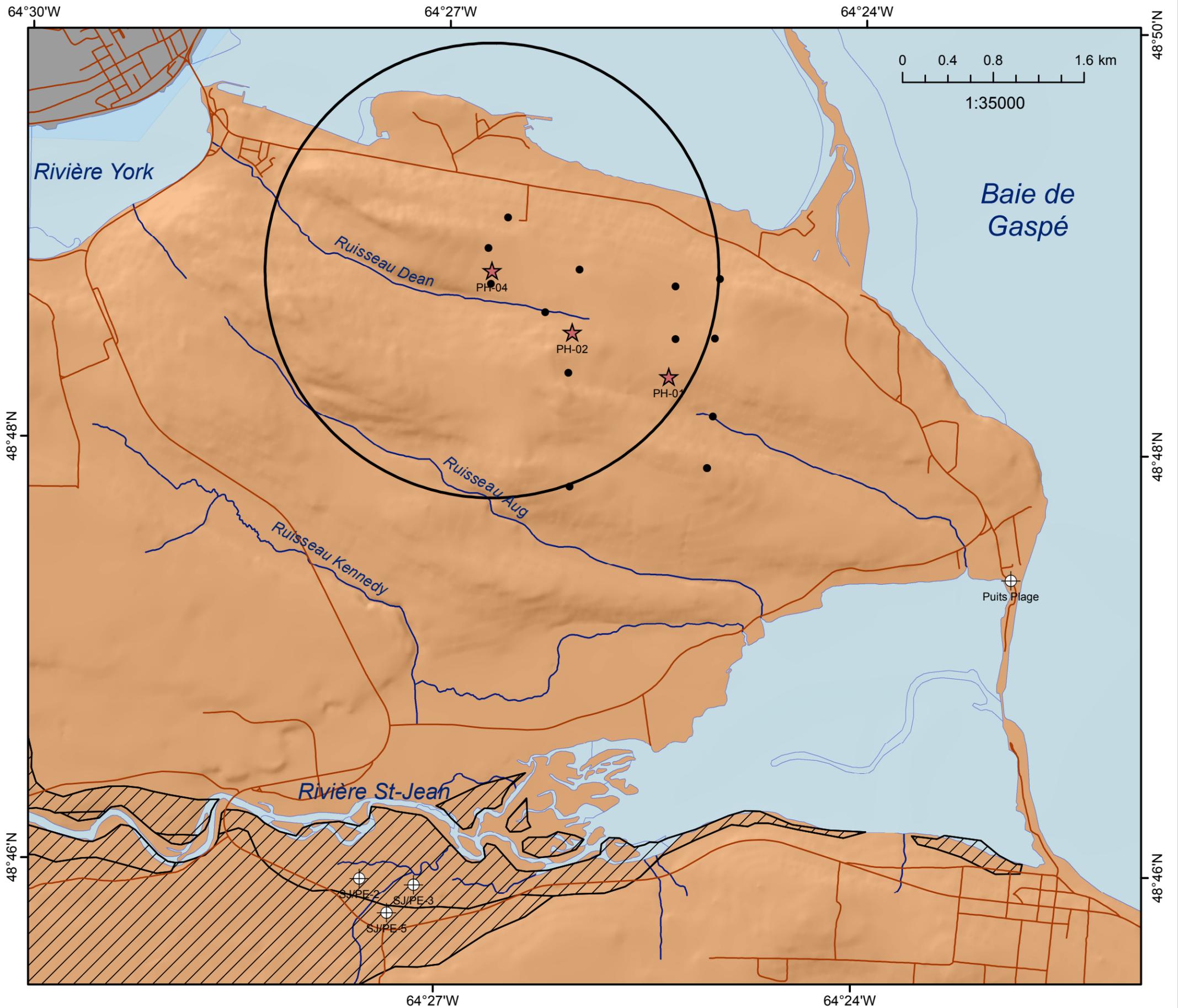
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

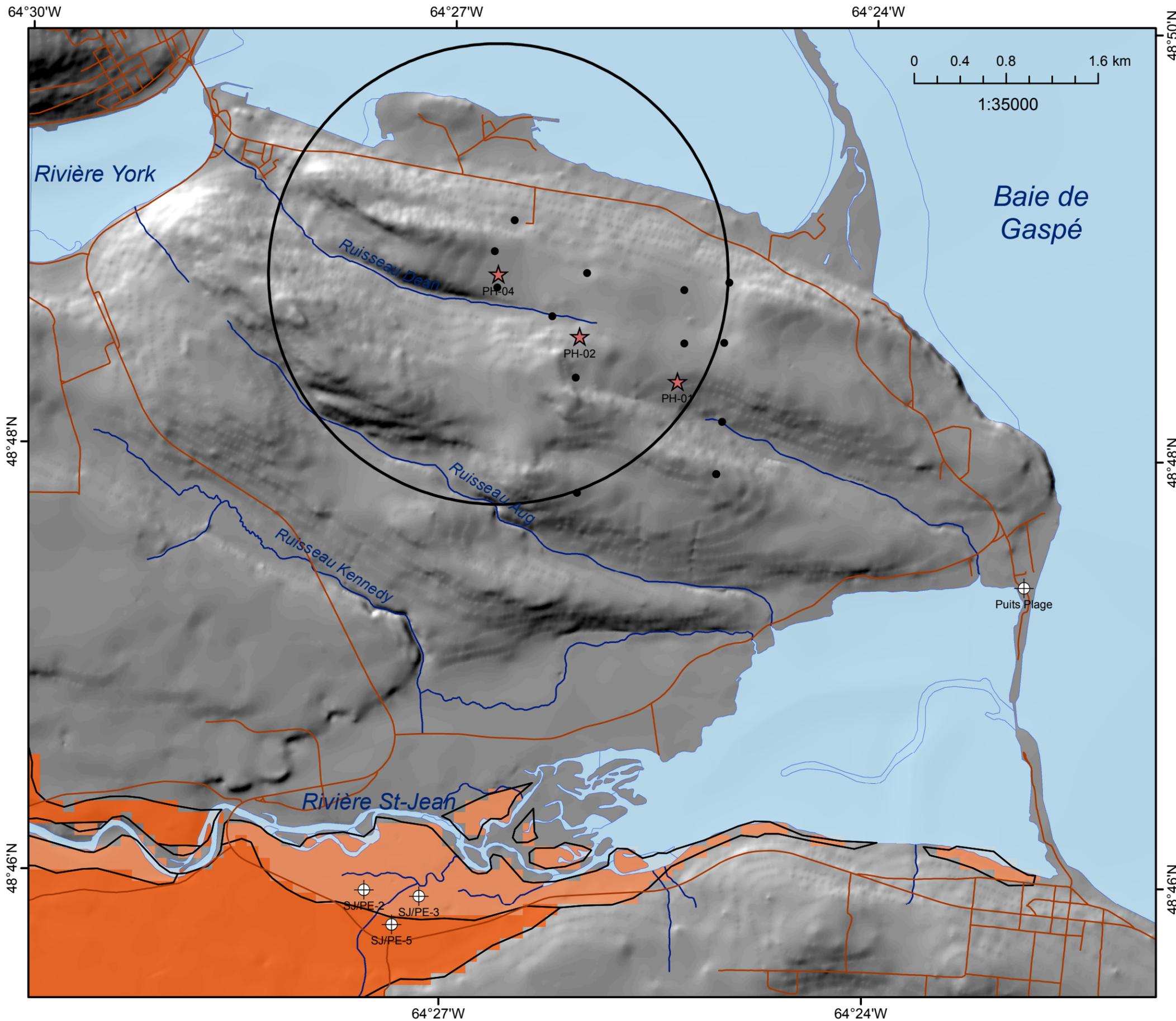
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

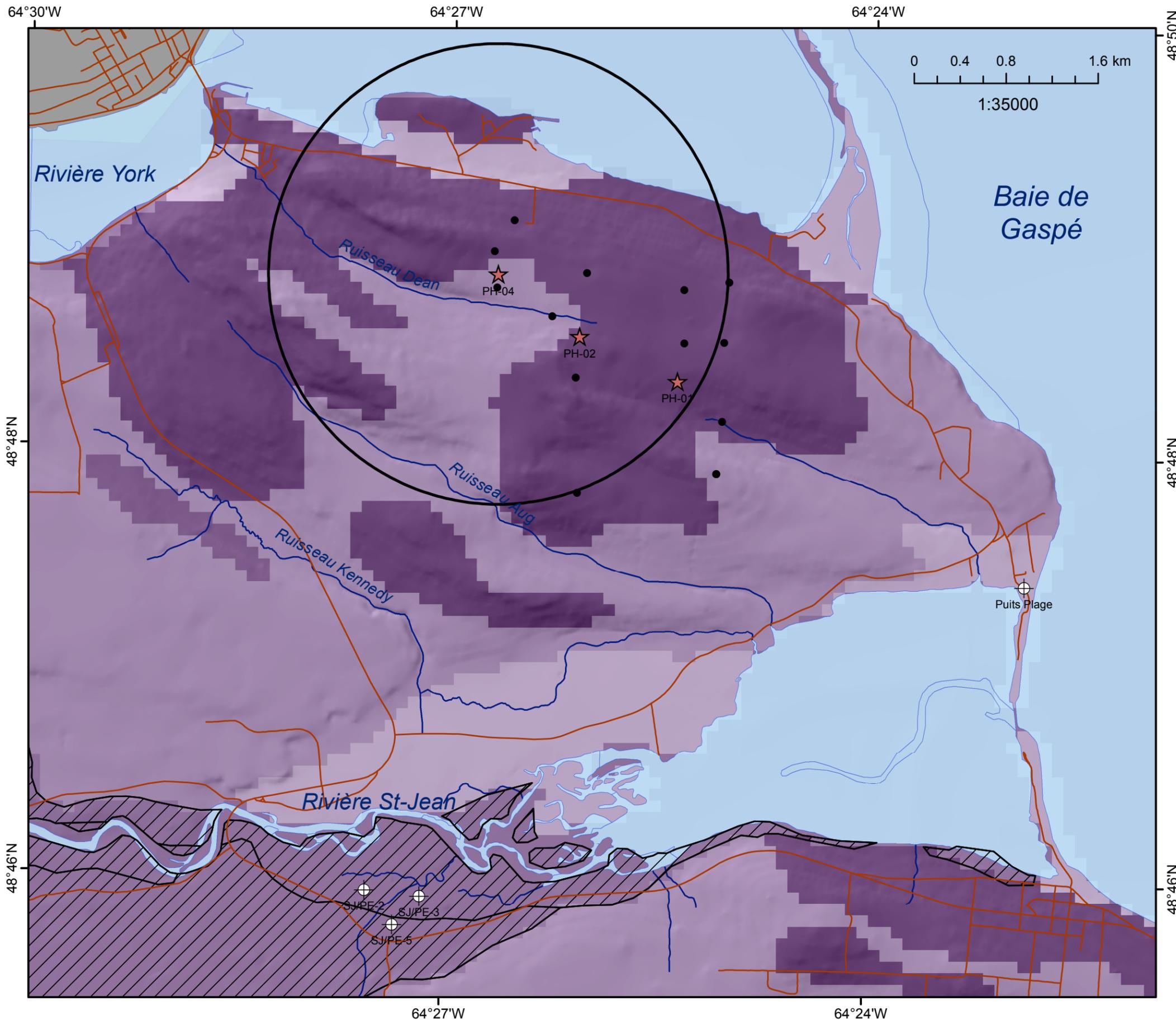
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

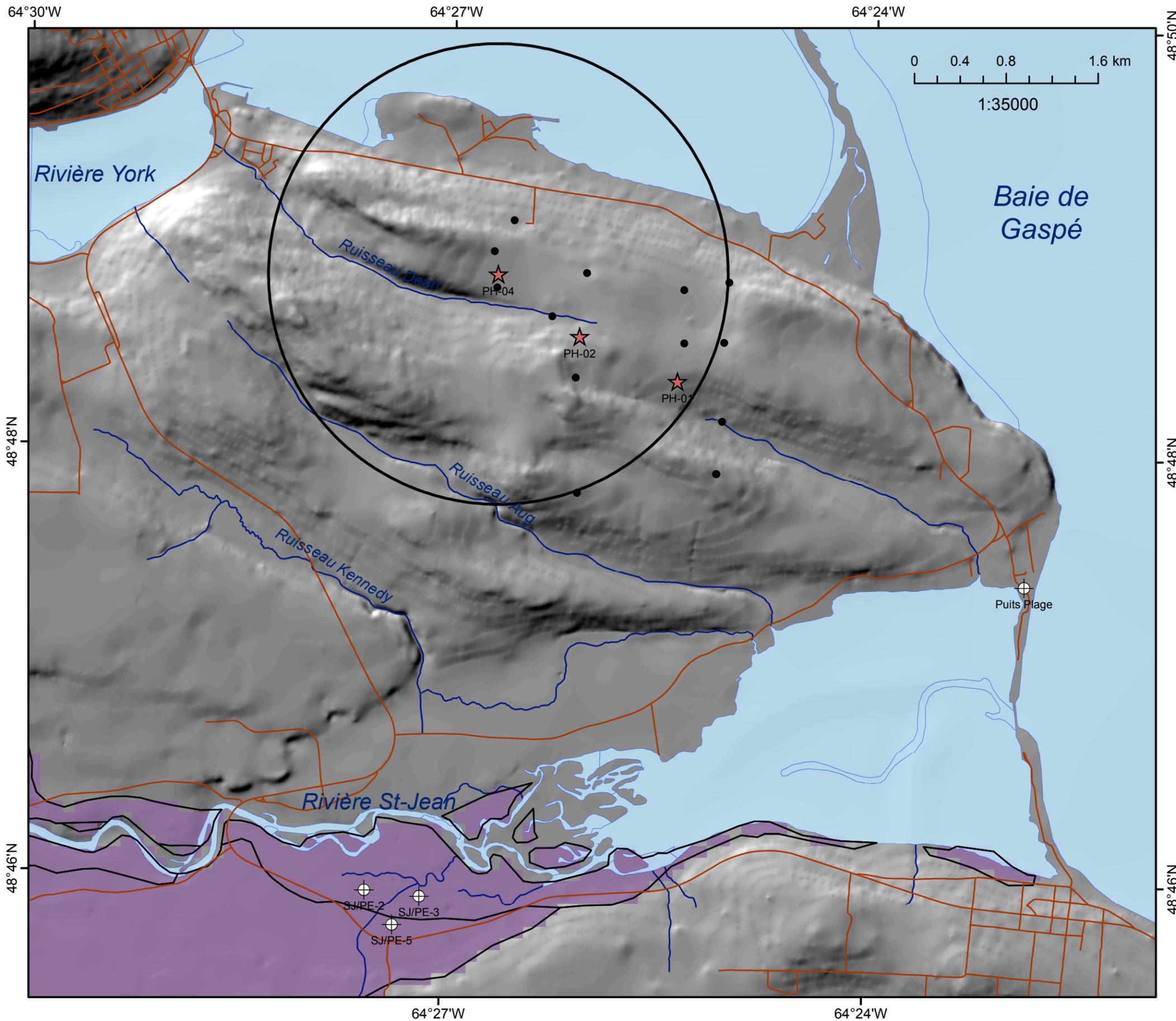
Carte 23

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

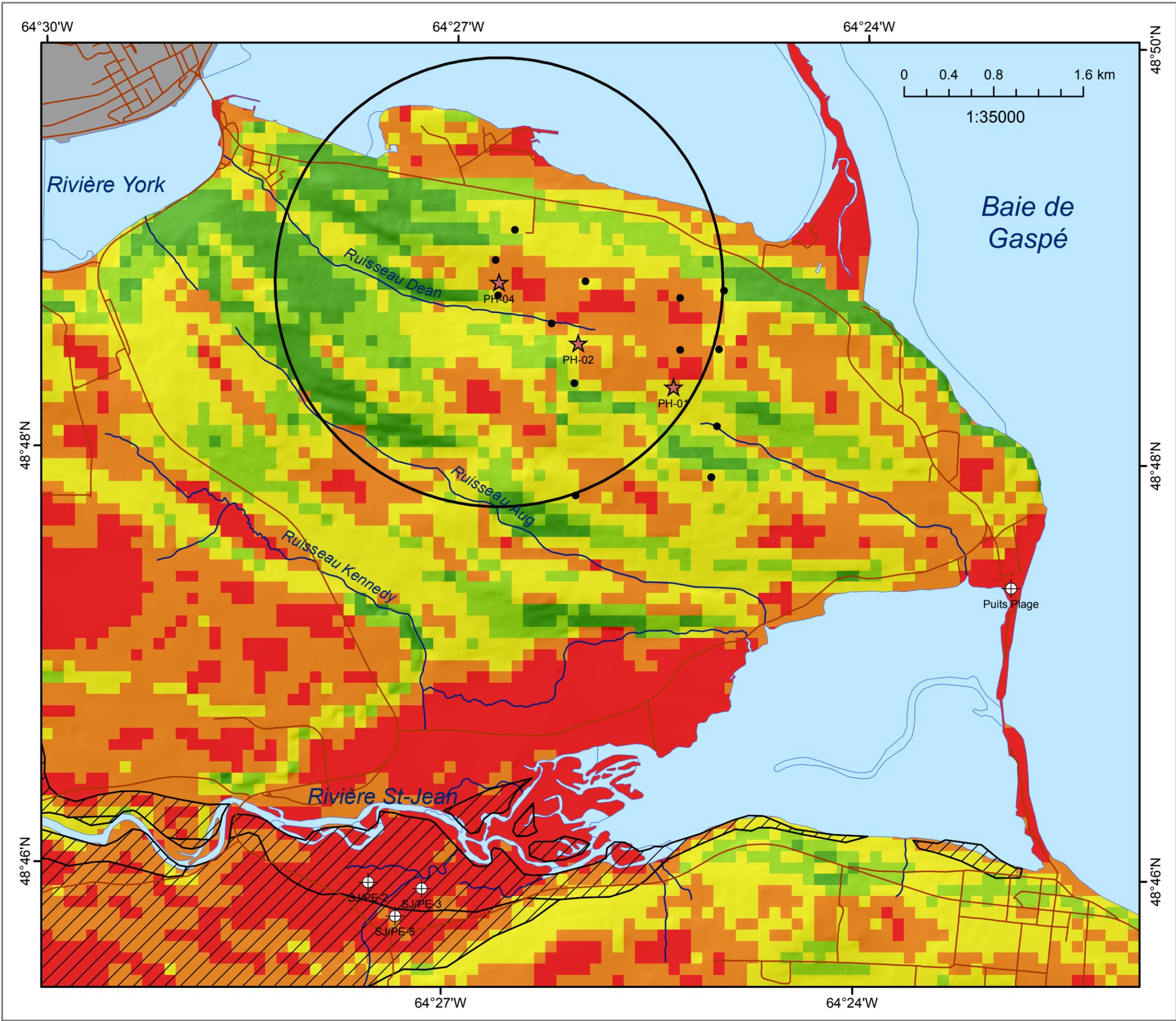
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

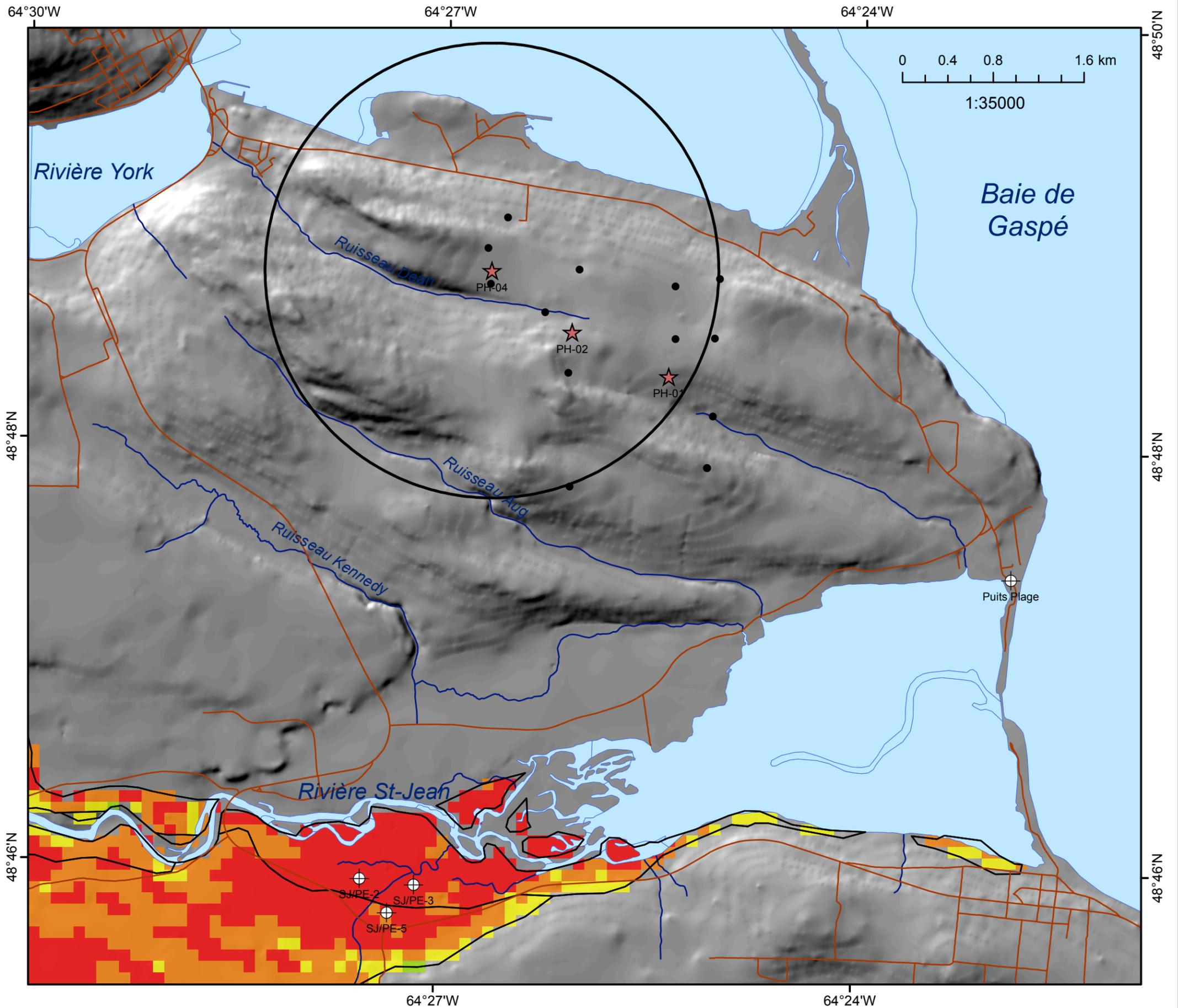
Carte 25

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

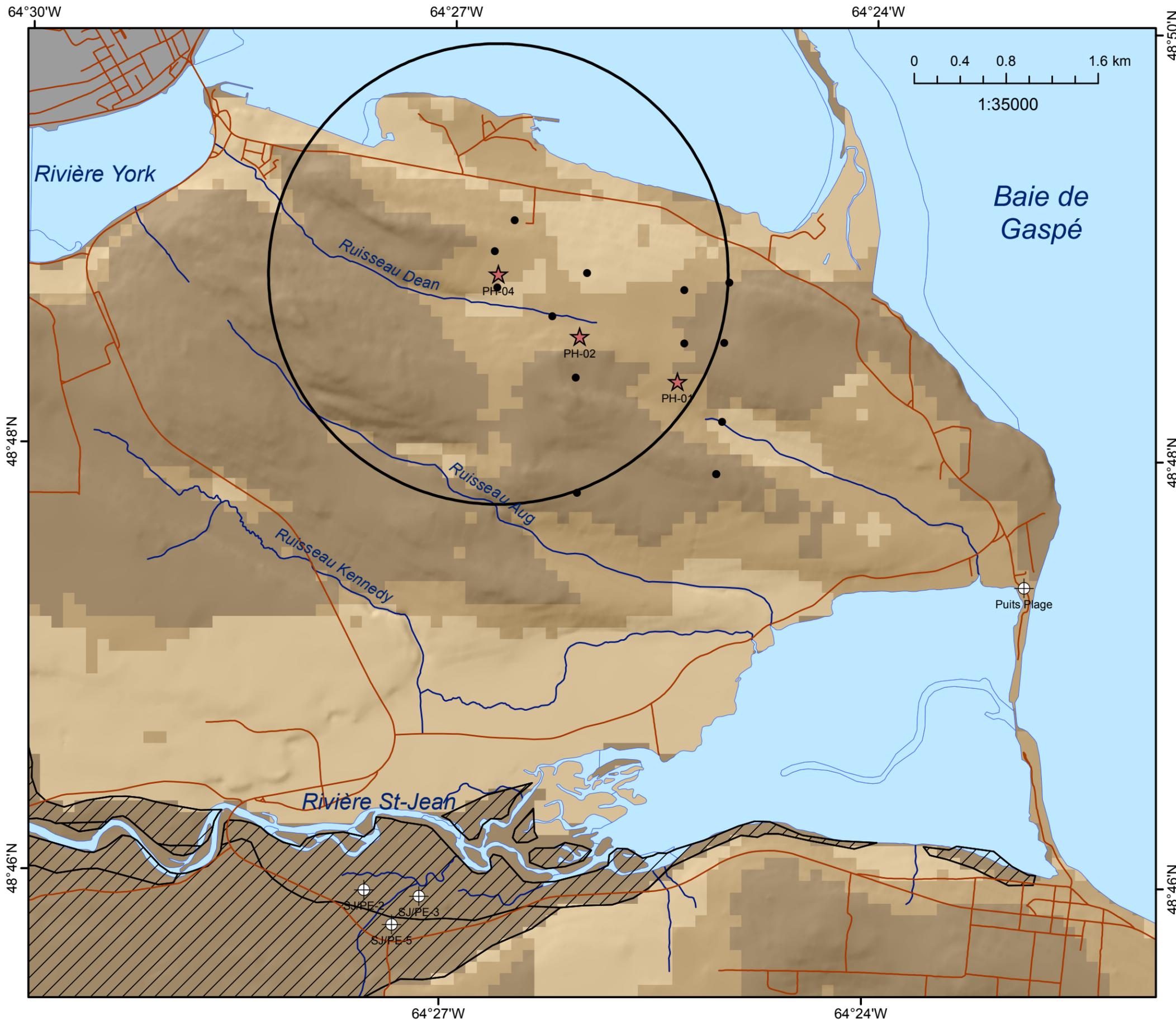
Carte 26

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

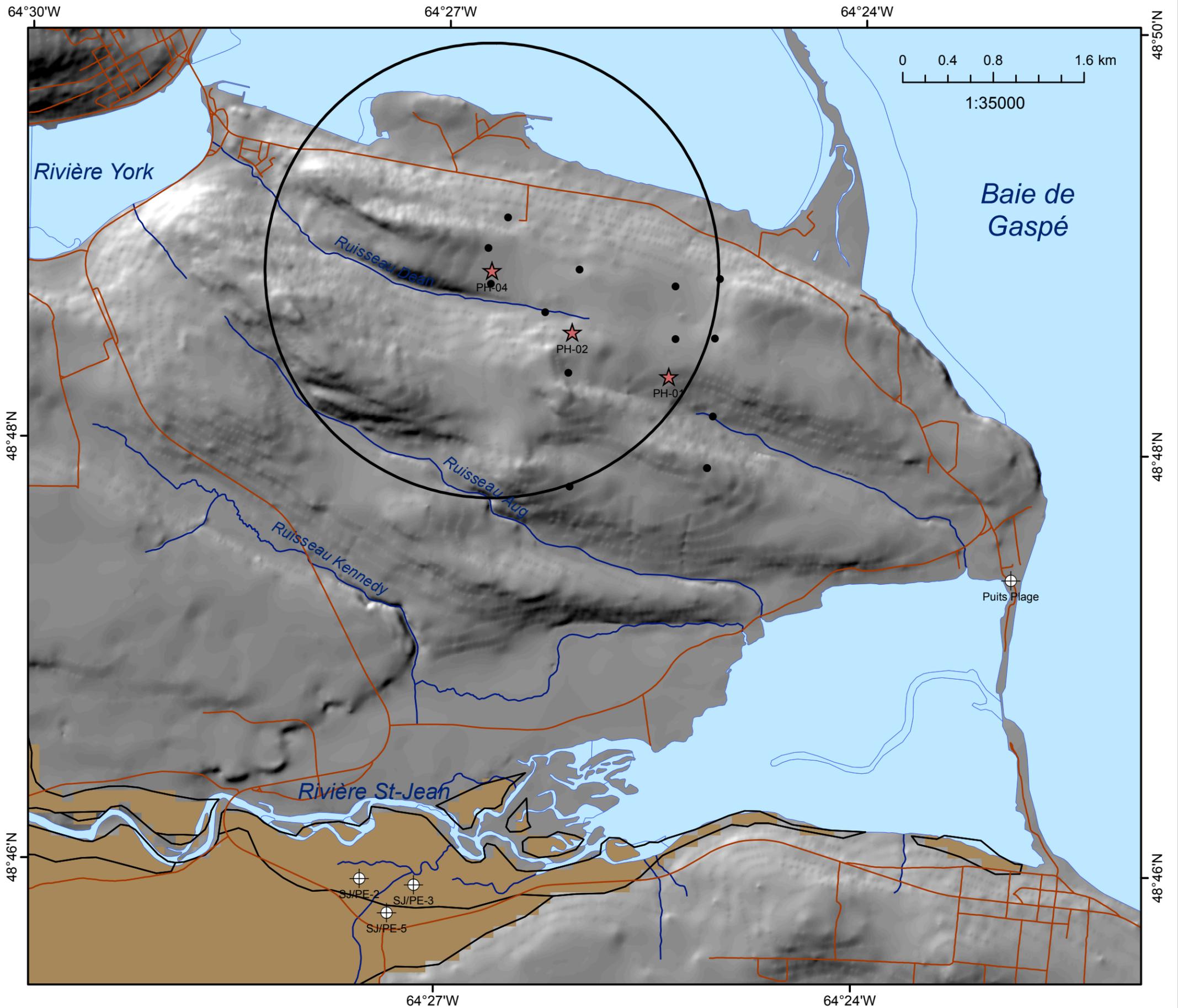
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

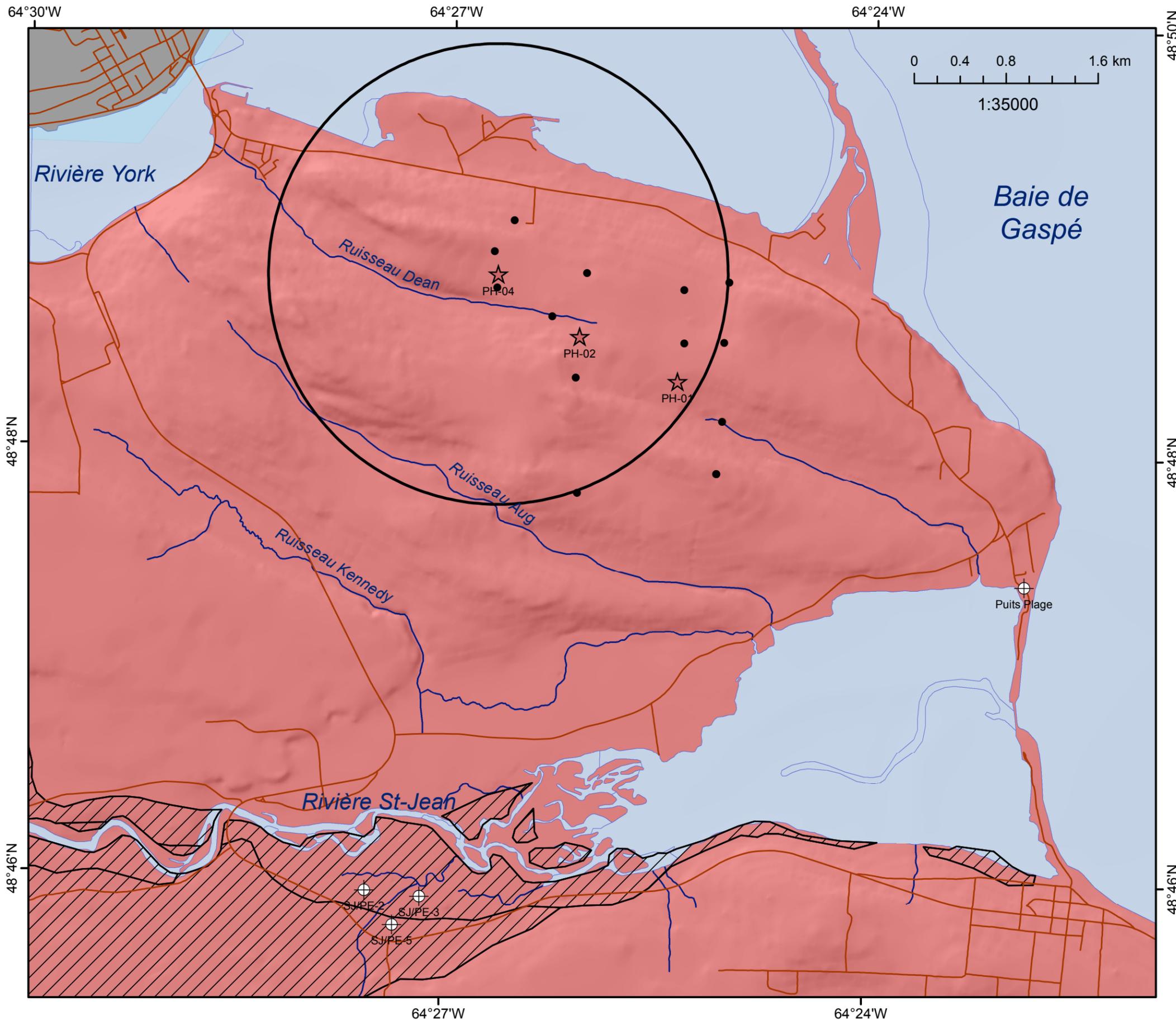
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynald

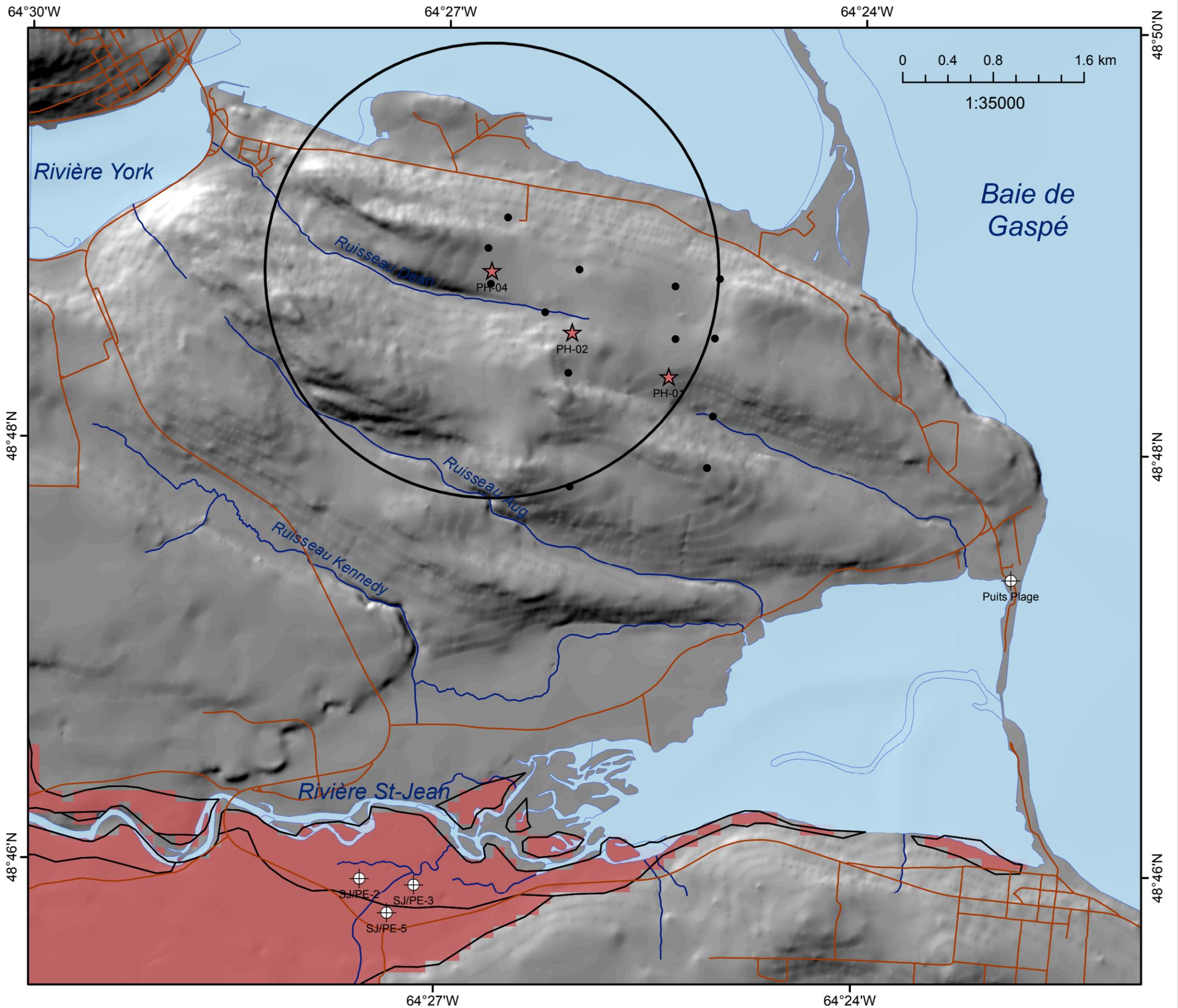
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 (4.72e-7 à 4.72e-5 m/s)



Caractérisation et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

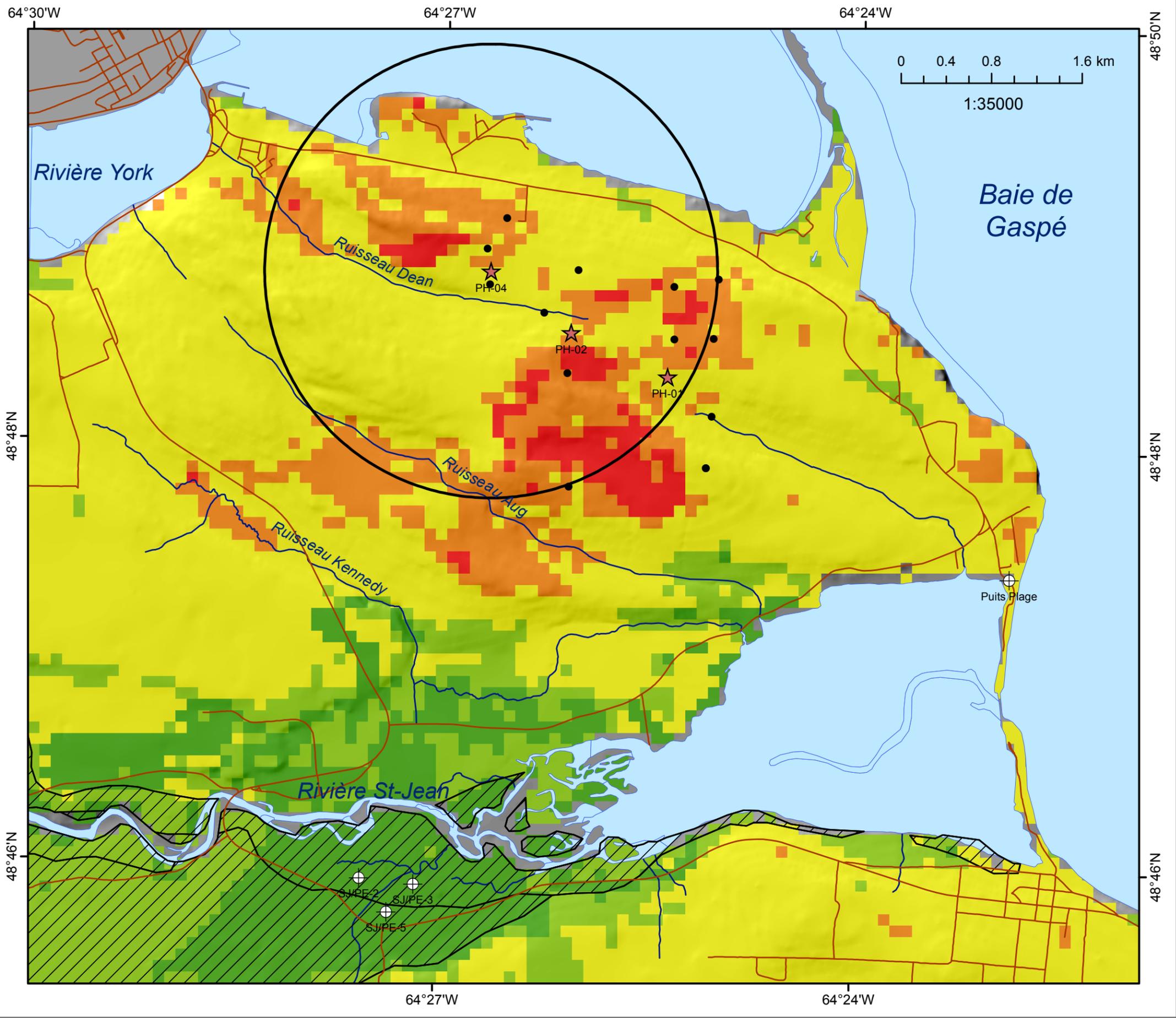
Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 (>9.43e-4 m/s)



Caractérisation et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

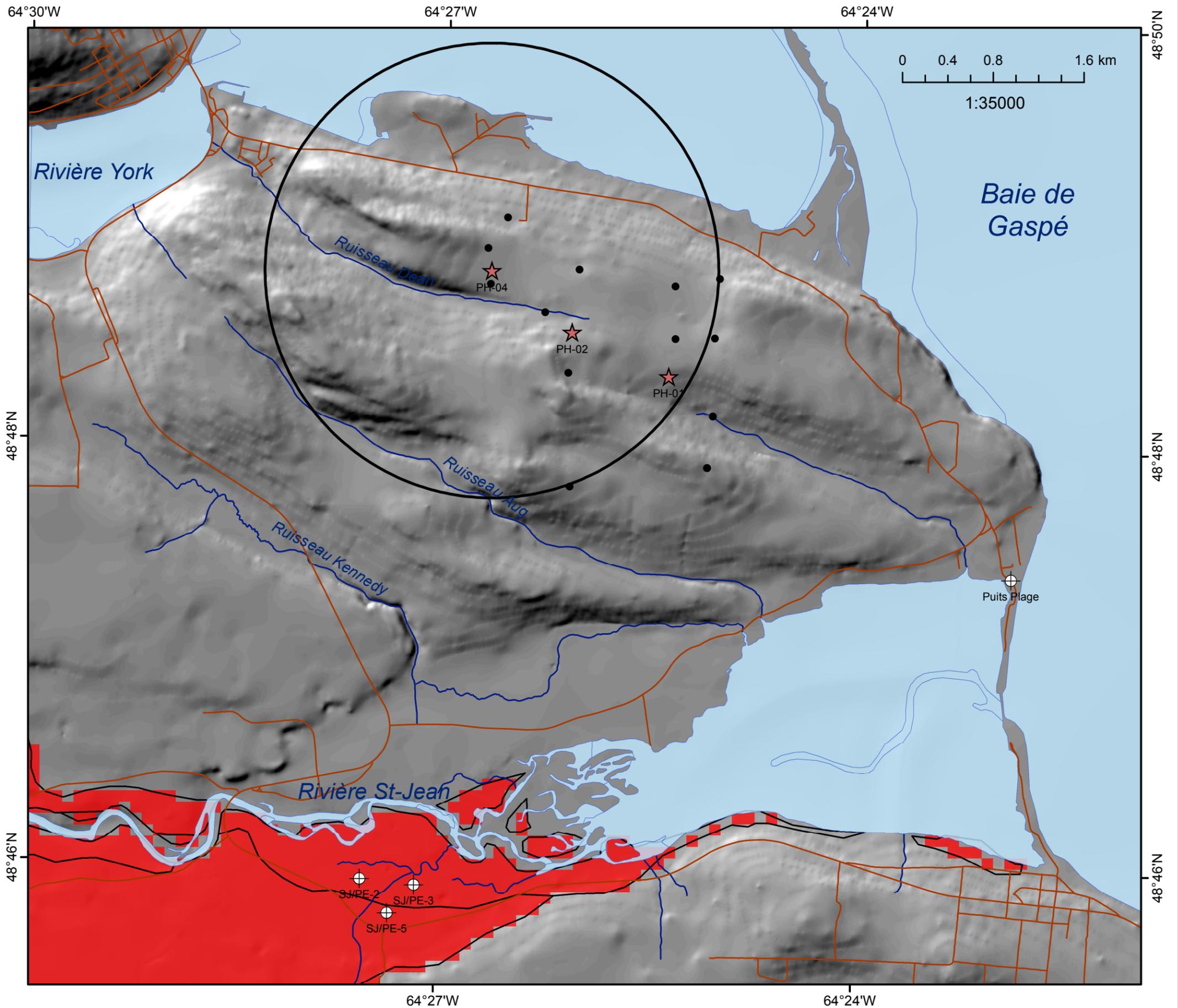
Carte 31

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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 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 et modélisation
des conditions d'écoulement à
densité variable au-dessus du
réservoir pétrolier, secteur
Haldimand à Gaspé

Mélanie Raynauld

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau ou en sciences de la terre

INRS, Centre - Eau, Terre et Environnement
Décembre 2014

Carte 33

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

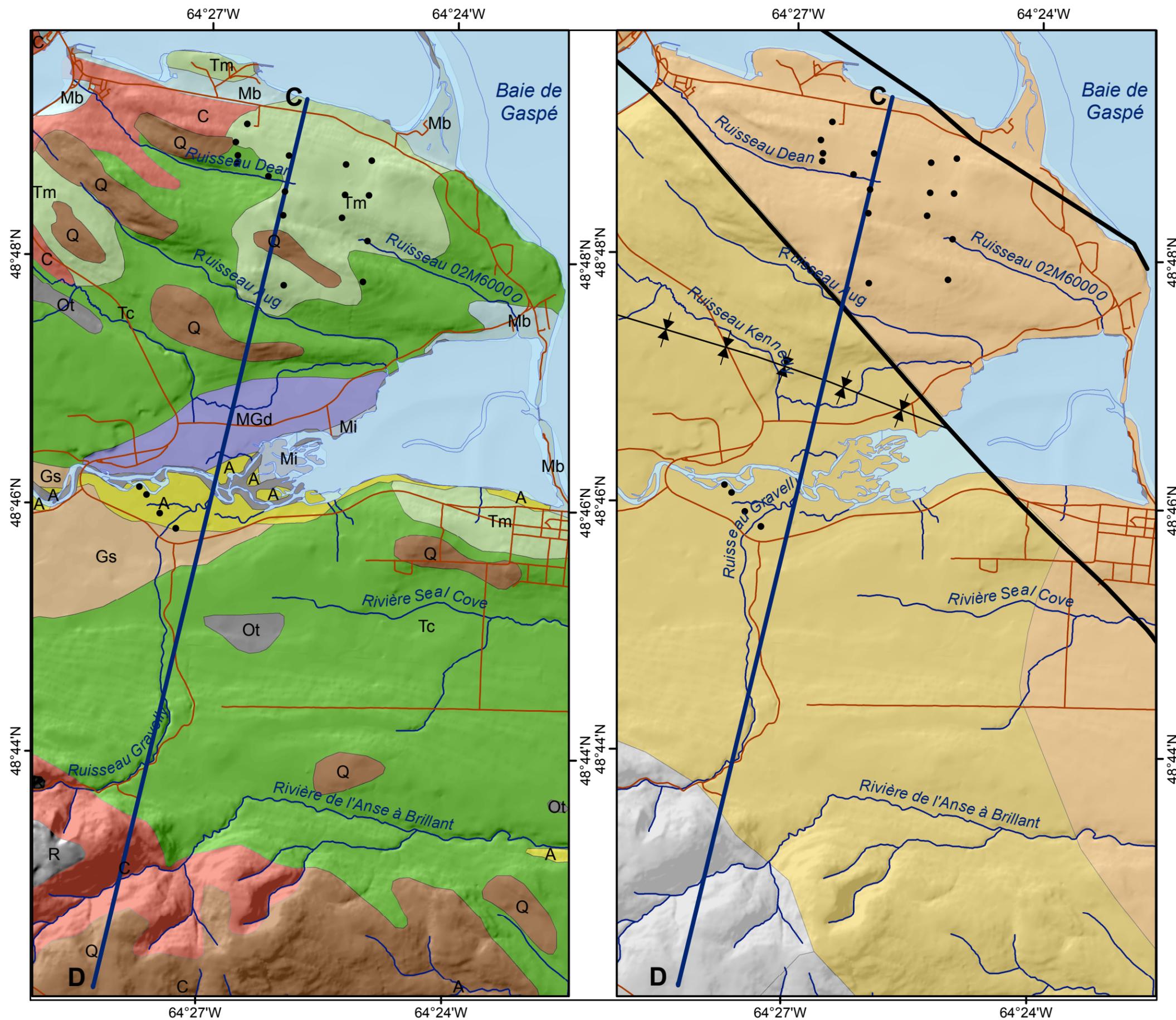
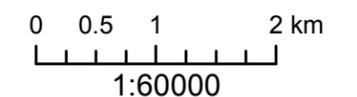
MGd - Sédiments deltaïques et prodeltaïques

Gs - Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique

Tc - Till en couverture généralement continue

Tm - Till en couverture mince et discontinue

Q - Roc altéré



Annexe 1 – Conférence GéoMontréal 2013

Caractérisation des conditions hydrogéologiques au-dessus du réservoir pétrolier d'Haldimand, Gaspé, Québec



¹Mélanie Raynauld, ²Heather Crow, ⁴Nathalie Fagnan, ¹René Lefebvre, ³John W. Molson, ¹Erwan Gloaguen & ²Nicolas Benoit

¹Institut national de la recherche scientifique – Centre-Eau Terre Environnement, Québec, Canada

²Ressources Naturelles Canada – Commission Géologique du Canada, Ottawa et Québec, Canada

³Département de Géologie et Génie Géologique – Université Laval, Québec, Canada

⁴TechnoRem, Laval, Canada

ABSTRACT

A groundwater study was carried out in the Haldimand sector of Gaspé to assess the potential link between a petroleum reservoir, whose potential is being evaluated, and the shallow fractured rock aquifer system. For this study, observation wells were installed, groundwater and surface water were sampled and analyzed, and geophysical logs were taken in the wells. The hydrogeological and hydrogeochemical conditions were then defined on the basis of existing and newly acquired data, thus allowing the development of a conceptual model and numerical model of the aquifer system. The understanding of groundwater flow conditions in this context will allow an assessment of environmental risk for groundwater quality related to petroleum industry activities.

RÉSUMÉ

Une étude hydrogéologique a été menée dans le secteur d'Haldimand, à Gaspé, afin d'évaluer le lien potentiel entre un réservoir pétrolier, dont le potentiel est en voie d'évaluation, et le système aquifère superficiel dans le roc fracturé. Pour cette étude, des puits d'observation ont été aménagés, des échantillons d'eau souterraine et de surface ont été prélevés et analysés et des diagraphies ont été réalisées dans les puits. Les conditions hydrogéologiques et hydrogéochimiques ont ensuite été définies à partir de données existantes et de celles nouvellement acquises, ce qui a permis de développer un modèle conceptuel ainsi qu'un modèle numérique du système aquifère. La compréhension des conditions d'écoulement de l'eau souterraine dans ce contexte permettront d'évaluer le risque environnemental pour la qualité de l'eau souterraine que pourraient poser les activités pétrolières.

1 INTRODUCTION

Les activités reliées à l'exploration et à l'exploitation des ressources d'hydrocarbures requièrent la compréhension des risques environnementaux associés à ces activités, notamment en relation avec la dégradation de la qualité de l'eau souterraine. Le débat est d'actualité au niveau international en raison de l'accroissement des découvertes 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...). Au Canada, les ressources potentielles de gaz non conventionnel, estimées à plus de 3300 Tcf (Trillion cubic feet), sont considérables (Rivard et al., sub.).

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, l'eau souterraine et de surface, constitue une des principales préoccupations et un projet de règlement prévoit l'obligation de la part des compagnies d'exploration pétrolière et gazière de faire une étude hydrogéologique dans un rayon de 2 km autour des forages pétroliers ou gaziers (MDDEFP, 2013). Cette étude doit notamment comprendre l'échantillonnage et l'analyse des eaux souterraines dans tous les puits d'approvisionnement à l'intérieur de ce rayon.

En revanche, il n'existe pas d'exemple de caractérisation environnementale des aquifères dans des contextes d'exploration pétrolière au Québec. Une telle caractérisation exige l'évaluation des liens potentiels entre les unités productrices d'hydrocarbures, situées à des milliers de mètres de profondeur, et les aquifères superficiels, ce qui nécessite des développements technologiques et scientifiques.

C'est dans ce contexte que nous présentons les résultats initiaux de la caractérisation hydrogéologique d'un site d'exploration pétrolière au Québec. Cette étude permet l'acquisition et l'interprétation des données prévues par le projet de règlement; 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 pour définir les conditions hydrogéologiques. L'ensemble des données est intégré et interprété quantitativement grâce au développement d'un modèle numérique d'écoulement et de transport de masse. La compréhension du système d'écoulement et de ses relations avec les unités géologiques plus profondes permettra de mieux encadrer les activités pétrolières et d'assurer la protection de la qualité de l'eau souterraine.

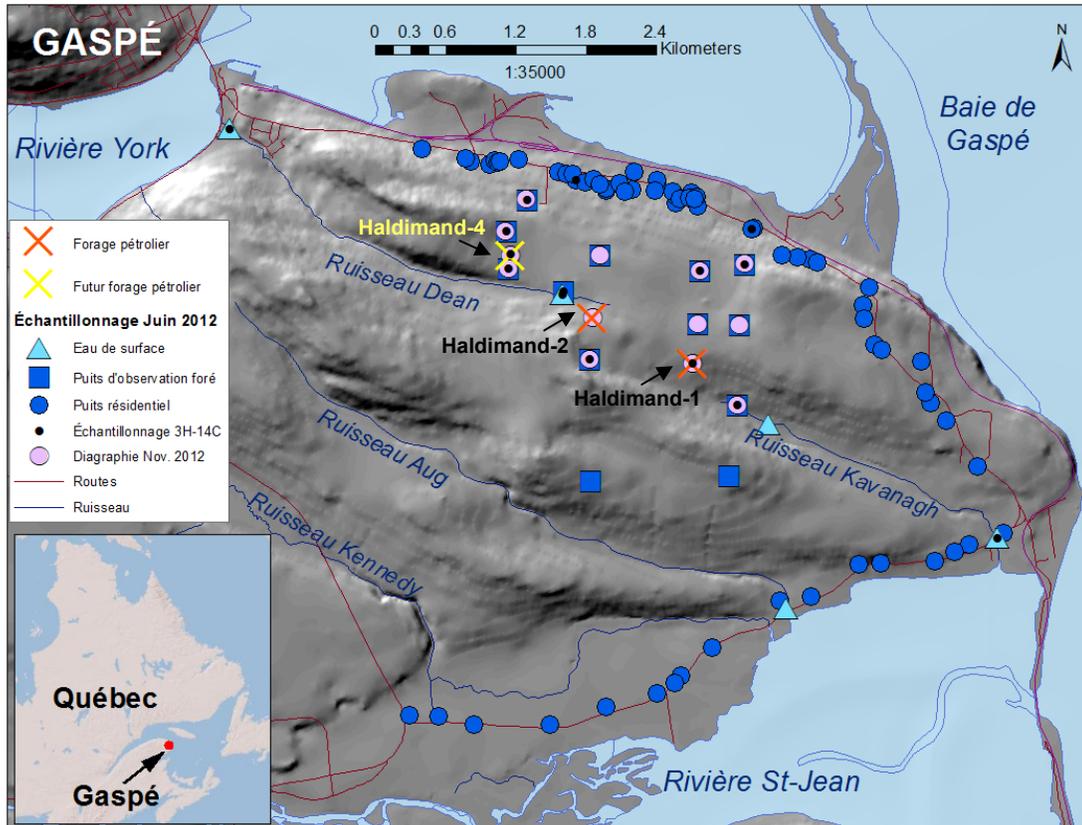


Figure 1. Zone d'étude (secteur Haldimand) et sites d'échantillonnage

2 MISE EN CONTEXTE

La figure 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 atteint une élévation maximale de 202 m au centre de la péninsule. En direction de la mer l'altitude diminue pour atteindre le niveau moyen des mers de 0 m.

Des suintements naturels d'hydrocarbures à la surface du sol ont été observés à plusieurs endroits dans ce secteur. La continuité latérale et verticale des formations rocheuses de même que leurs liens hydrauliques potentiels avec les aquifères superficiels sont des enjeux clés de la caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand.

Le principal aquifère du secteur est constitué de la partie supérieure du socle rocheux fracturé. Les puits de la région sont ouverts au roc et atteignent une profondeur maximale de 77,7 m (moyenne de 30,5 m). Les principaux utilisateurs de l'eau souterraine sont majoritairement résidentiels et situés en périphérie de la péninsule d'Haldimand. D'anciens puits pétroliers abandonnés se trouvent au site d'Haldimand, ainsi que les puits pétroliers actifs Haldimand-1 et Haldimand-2 (figure 1), dont les profondeurs du toit du réservoir atteignent respectivement 930 et 722 m (Pétrolia, 2012). Un troisième puits pétrolier (Haldimand-4) est en attente

d'autorisation pour forage. Un puits d'alimentation en eau est associé à chacun de ces forages pétroliers.

2.1 Géologie des formations superficielles

La géologie des formations superficielles présentée à la figure 2 est issue de la compilation de Veillette et Cloutier (1983). Le secteur à l'étude comprend onze unités quaternaires distinctes. Les sédiments glaciaires (2b, 2c), de même qu'une unité dite de roc altéré (1), sont omniprésents sur l'ensemble du secteur à l'étude et ils couvrent près de 80% de la surface. Une étendue importante de sédiments fluvioglaciaires (3b) et des alluvions (7) se trouvent dans la vallée de la rivière St-Jean au sud de la zone ainsi que des sédiments deltaïques et prodeltaïques (5b) à l'embouchure nord de la rivière. On retrouve des sédiments marins littoraux (6a, 6b) à quelques endroits au bord de la mer, des dépôts de versant à l'embouchure sud de la rivière York et une tourbière (8) à la tête du ruisseau Kennedy. Des dépôts de versants non différenciés (9) recouvrent la partie nord-ouest de la péninsule.

La figure 3 présente l'épaisseur totale des dépôts correspondant à la différence entre l'élévation du modèle numérique de terrain (MNT) et l'estimation de la topographie du roc. La topographie du roc a été calculée par krigeage avec dérive externe avec le logiciel SGeMS (Boucher, 2013). La dérive, correspondante au MNT, permet de palier à la distribution clairsemée de puits. Sur

l'ensemble de la zone d'étude, les secteurs présentant des dépôts meubles épais se trouvent près des vallées et des rivières. Les secteurs minces sont majoritairement localisés près des hauts topographiques au centre de la péninsule. Ces derniers constituent potentiellement des zones de recharge préférentielle, tel que décrite à la section 3.

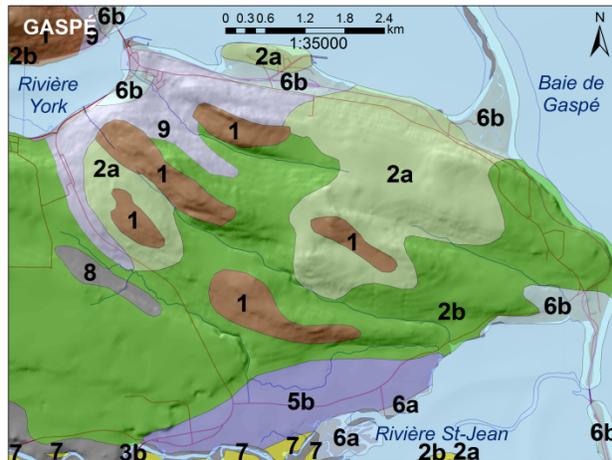


Figure 2. Géologie du quaternaire : 1) Roc altéré, 2a) Till mince (<1 m), 2b) Till continu (> 1m), 3b) Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique, 5b) Sédiments deltaïques, 6a) Sédiments intertidaux, 6b) Sédiments littoraux, 7) Alluvions, 8) Sédiments de tourbières et 9) Dépôts de versant non différenciés (Veillette et Cloutier, 1993)

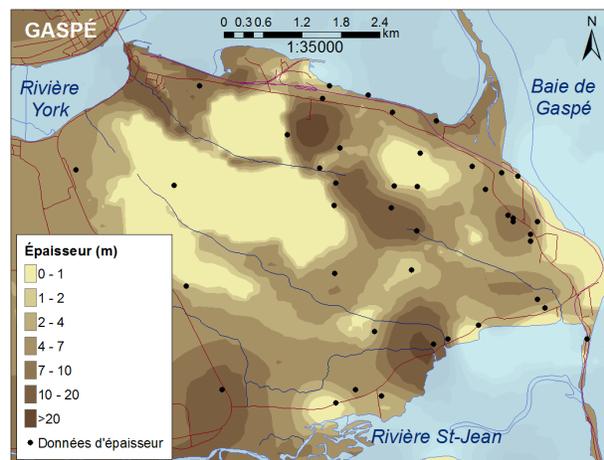


Figure 3. Épaisseur des formations quaternaires

2.2 Géologie du socle rocheux

La géologie du socle rocheux à l'intérieur de la zone d'étude est principalement constituée de deux unités d'âge Dévonien. Ces deux unités, le Battery Point à l'est et le York River à l'ouest, sont séparées par la faille du Bras-Nord-Ouest (figure 4). À l'ouest de cette faille, la formation du York River affleure par endroit, tandis qu'à l'est de la faille le York River plonge sous le Battery Point pour atteindre une profondeur de plus de 1000 m. Le

contexte géologique lithostructural est présenté par le bloc schématique de la figure 5 (Pétrolia, 2012).

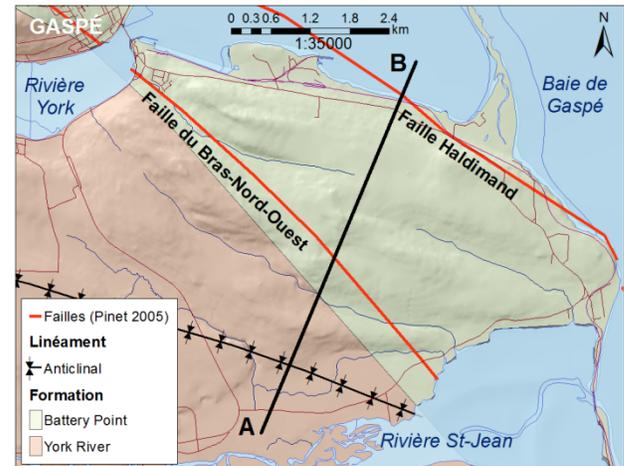


Figure 4. Géologie du roc (Brisebois, Lachambre et Piché, 1991) et représentation des failles selon Pinet (2005)

Le Battery Point est une formation fluviale composée de grès et de mudrocks (Desbiens, 1990). La formation du York River s'inscrit dans une séquence régressive marine-continentale qui se compose également de grès et de mudrocks (Desbiens, 1990). Le York River constitue le réservoir pétrolier situé à l'est sous le Battery Point, entre les profondeurs d'environ 630 à 1200 m (Pétrolia, 2012). Ces formations sont plissées selon un anticlinal orienté ESE-ONO. Le site d'Haldimand est recoupé par deux failles importantes, la faille du Bras-Nord-Ouest et la faille Haldimand (figure 4).

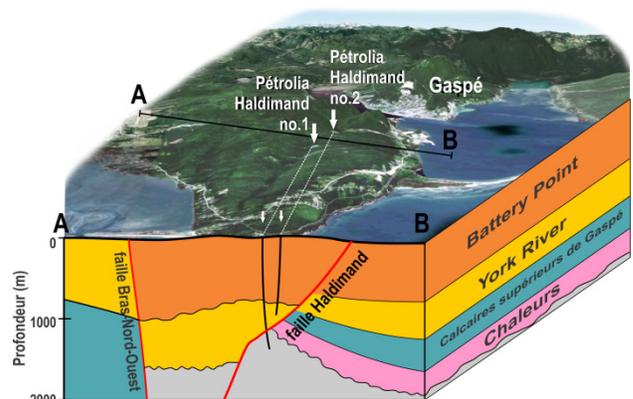


Figure 5. Coupe géologie structurale A-B (Pétrolia, 2012)

2.3 Acquisition des données

La campagne de terrain de la caractérisation hydrogéologique, réalisée par la firme Technorem, s'est déroulée de novembre 2011 à octobre 2012. Un total de 14 puits d'observation et un puits d'alimentation pour le forage Haldimand-4 ont été aménagés dans la zone d'étude, ce qui s'ajoute au 2 puits d'observation déjà existants. La caractérisation s'est poursuivie par une campagne d'échantillonnage et d'essais hydrauliques

réalisés à l'été 2012. L'échantillonnage inclut également les 3 puits d'alimentation des forages pétroliers, 66 puits résidentiels et 6 sites de prélèvement d'échantillons d'eau de surface (figure 1). La caractérisation a été complétée à l'automne 2012 par le prélèvement supplémentaire d'échantillons d'eau pour l'analyse isotopique du ^{14}C ainsi que pour la réalisation de diagraphies par la Commission Géologique du Canada dans 13 puits d'observation (11 ouverts au roc, 2 supportés par un tubage de PVC).

L'analyse des données produites par ces travaux a permis d'établir les conditions hydrogéologiques et hydrogéochimiques du secteur d'Haldimand. Les résultats fourniront le cadre de base pour l'élaboration du modèle conceptuel ainsi que du modèle numérique d'écoulement de l'eau souterraine dans le système aquifère. La compréhension du contexte et de l'écoulement constitueront des outils de base pour l'évaluation du risque environnemental des activités pétrolières sur les eaux souterraines.

3 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La piézométrie du secteur Haldimand a été définie à partir des mesures de niveaux d'eau relevées dans 14 puits d'observation, 92 mesures tirées du Système d'information hydrogéologique (SIH) (MDDEFP, 2013) et un puits de la municipalité de Gaspé (figure 6). À cela s'ajoute l'élévation du niveau de l'eau des cours d'eau et de la mer. Toutes les valeurs ont été ajustées à partir du modèle numérique de terrain (MNT). Compte tenu de la forte corrélation de la charge hydraulique et du MNT ($r=0.99$), la piézométrie a été réalisée par krigeage avec dérive externe sur la topographie avec le logiciel SGeMS (Boucher, 2013). Une contrainte a été ajoutée au système de krigeage par analogie avec le haut topographique afin de limiter les effets dans ce haut dans le centre de la péninsule où il n'y a pas de données.

La figure 6 présente la carte piézométrique. La charge hydraulique est élevée au centre de la péninsule (zone de recharge) et elle diminue radialement vers la mer (zone d'urgence). La piézométrie montre également que les rivières influencent l'écoulement en agissant comme des drains. 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 diagraphies (section 6).

Une coupe sud-nord est illustrée à la figure 7. Cette coupe a été élaborée à partir du MNT, de la carte piézométrique et de la topographie du roc. Les formations meubles, essentiellement constituées de till, sont considérées peu perméables. La surface piézométrique (ligne bleue) indique que le haut topographique agit comme zone de recharge et que les rivières drainent l'eau souterraine. Les endroits où la surface piézométrique se retrouve au-dessus du socle rocheux correspondent à des zones de confinement plus importantes.

Des sondes de niveau d'eau ont été placées dans cinq puits d'observation le long de la coupe C-D pendant une période de 4 mois (février à juin 2012) (localisation aux figures 6 et 7). La figure 8 présente les hydrogrammes de puits. Les enregistrements montrent la variation, des niveaux d'eau souterraine, mesurée dans les puits (trait

plein) en fonction du temps. Le trait pointillé indique l'élévation du sol au droit de chaque puits de la même couleur. Les courbes de températures moyennes de l'air et des précipitations totales sont tracées au haut de la figure 8.

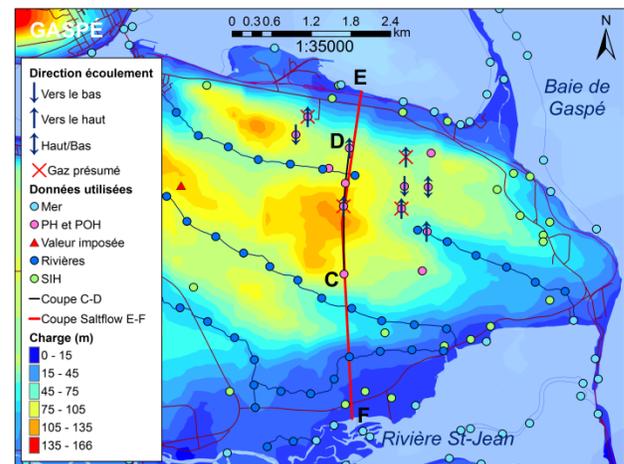


Figure 6. Carte piézométrique

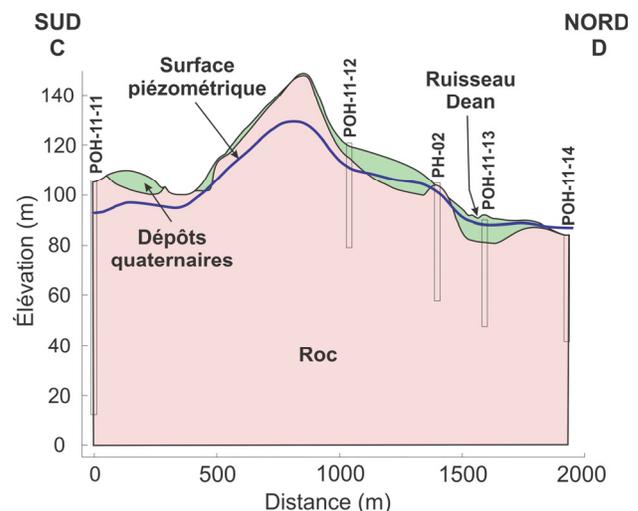


Figure 7. Coupe sud-nord le long de la ligne C-D (figure 6)

Les niveaux d'eau enregistrés au printemps sont très près du terrain naturel, soit quelques centimètres sous le sol et donc sous l'influence de la recharge. Les hydrogrammes indiquent une grande variation des niveaux d'eau, notamment les puits qui se situent à plus haute altitude, soit près des zones de recharge. Une variation du niveau d'eau de plus de 20 m a été enregistrée dans le puits POH-11-11, ce qui indique que ce puits est très sensible à la recharge. On remarque également une diminution de l'amplitude des variations avec une diminution de l'altitude du 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.

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. 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. On remarque également qu'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.

L'hydrogramme du puits POH-11-14 n'enregistre pas de variation aussi marquée de la nappe à la suite de précipitation comme les autres puits de la coupe, ce qui pourrait indiquer l'absence de lien hydraulique direct avec la surface dans le secteur de ce forage. La coupe illustre d'ailleurs que ce puits d'observation se trouve en zone de confinement plus élevé.

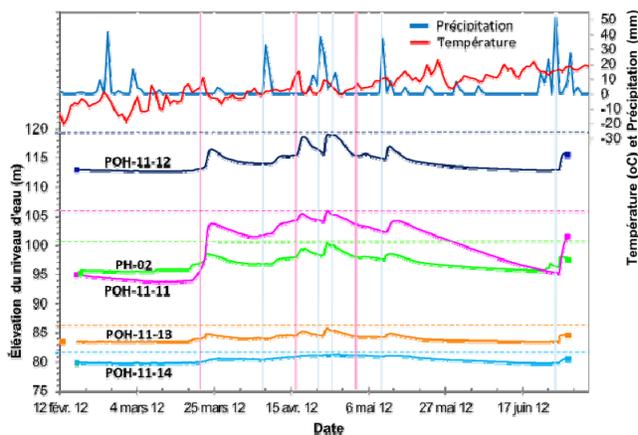


Figure 8. Hydrogrammes des puits d'observation du 16 février au 29 juin 2012 pour les puits d'observation situés le long de la coupe C-D (Figures 6 et 7)

4 DIAGRAPHIES GÉOPHYSIQUES

L'analyse des données de diagraphie vise à développer une série quantitative de propriétés lithologiques et hydrogéologiques pour les trois principales unités stratigraphiques identifiées sur le site, fournissant ainsi les conditions typiques du socle rocheux pour le modèle numérique d'écoulement.

Les diagraphies géophysiques ont été réalisées dans 11 puits ouverts au roc afin d'étudier les variations des propriétés physiques du socle rocheux et les propriétés d'écoulement des fluides dans les forages. Les mesures de température et de conductivité des fluides ont permis d'identifier les profondeurs d'écoulement de l'eau souterraine à travers les fractures (vers l'intérieur ou l'extérieur du puits). Les données d'imagerie acoustique ont servi à interpréter la profondeur, l'ouverture de la paroi du forage et l'orientation des fractures ouvertes ou partiellement ouvertes. Par endroits, des vidéos ont été

enregistrées pour observer le mouvement des fluides dans le puits (incluant du gaz présumé, à confirmer par des analyses de gaz dissous). Ces levés ont été suivis par des tests statiques de débitmètre à impulsion thermique pour identifier la direction et le débit de l'écoulement vertical de l'eau souterraine dans les puits. Des enregistrements de gamma naturel, de résistivité totale et de susceptibilité magnétique ont également été utilisés pour identifier les changements lithologiques et de granulométrie.

Les résultats préliminaires indiquent que trois unités stratigraphiques de base peuvent être corrélées avec les propriétés physiques mesurées. Ces unités sont plus évidentes sur les mesures de résistivité et de gamma naturel. Les enregistrements d'imagerie indiquent que le haut du socle rocheux (10 à 40 m) présente des fractures ouvertes et partiellement ouvertes, et les enregistrements de fluides indiquent que la plupart des fractures transmettent des fluides. Les enregistrements de débitmètre indiquent que tous les forages (sauf un) sont coulant naturellement et que l'écoulement se dirige vers le haut ou vers le bas, ce qui indique la présence de zones de recharge et d'émergence à travers la zone d'étude (voir Figure 6). Les enregistrements vidéo montrent des bulles de gaz (présumées et non caractérisées) s'échappant des fractures dans quatre des puits exploités. Les enregistrements de température montrent que les fluides plus chauds entrent dans les forages à travers les fractures, indiquant probablement une recharge rapide dans l'aquifère rocheux par les eaux de surface. Les enregistrements de conductivité des fluides montrent une augmentation de la conductivité mesurée dans certains puits présentant un écoulement vers le haut. Cette augmentation s'avère être un indicateur de mélange avec des eaux en profondeur qui sont plus âgées et plus salées (voir section 6, figure 10).

5 QUALITÉ D'EAU

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée en été 2012 (TechnoRem, 2013). L'analyse de la qualité de l'eau souterraine a pour objectif de déterminer le portrait initial de la qualité de l'eau, soit avant une éventuelle exploitation pétrolière.

Dans le cadre de cette campagne, un total de 89 sites a été échantillonné, soit 17 puits d'observation, 6 échantillons d'eau de surface et 66 puits résidentiels. Quatorze (14) duplicatas ont également été prélevés. Les échantillons d'eau ont été analysés pour les ions majeurs, les métaux, les composés inorganiques, les hydrocarbures pétroliers (C₁₀-C₅₀), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les composés organiques volatils (COV).

La comparaison des résultats analytiques avec les normes pour l'eau potable indique que l'eau souterraine est généralement de bonne qualité. À l'exception d'un résultat pour le fluorure, l'eau souterraine respecte tous les critères de la norme du Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP, 2013). Toutefois, les concentrations de quelques paramètres excèdent, à différentes proportions, les critères d'ordre esthétique de Santé

Canada (2013), sur 83 échantillons d'eau souterraine : sulfures (11), manganèse (9), dureté totale (8), chlorures (5), sodium (5), solides totaux dissous (5) et fer (1).

La qualité des eaux de surface respecte les critères du MDDEFP pour la prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques) à l'exception d'un composé inorganique. L'aluminium dépasse le critère à deux points d'échantillonnage, soit en aval du ruisseau Dean et en amont du ruisseau Kavanagh.

6 TYPES D'EAU

L'analyse géochimique des ions majeurs de l'eau souterraine a permis de déterminer les types d'eau. Le diagramme de Piper de la figure 9 a été produit à l'aide du logiciel GW_Chart (Winston, 2000). Ce diagramme présente les types d'eau déterminés pour les 89 sites échantillonnés. La forme du symbole utilisée (carré, triangle, cercle) représente le cation et la couleur (bleu, rose, rouge, violet) l'anion. Les symboles au centre blanc correspondent aux types d'eau des eaux de surface.

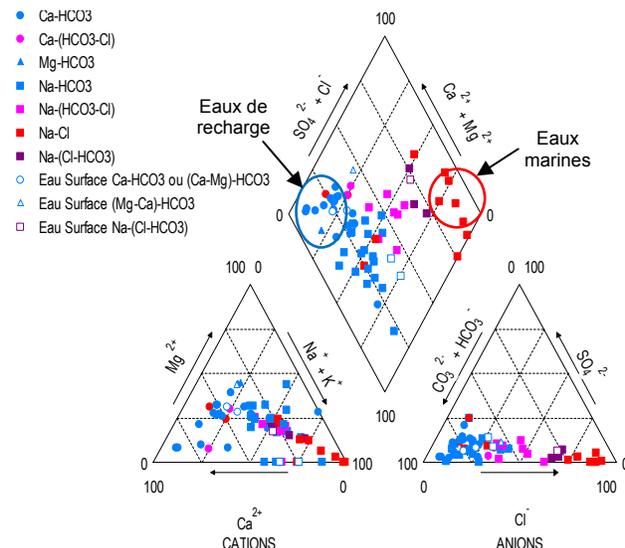


Figure 9. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper permet de déceler plusieurs processus géochimiques. On observe le pôle géochimique correspondant au type Ca-HCO₃ associé à des eaux de recharge et le pôle de type Na-Cl correspondant à des eaux marines. En termes d'évolution géochimique, on peut identifier les principaux processus suivants :

- 1) La dissolution des carbonates : tendance linéaire sur le graphique Ca vs HCO₃;
- 2) L'échange ionique Ca vers Na : points en dehors des tendances linéaires à faibles concentrations sur les graphiques de Cl vs Na et Ca vs HCO₃, ainsi que les tendances vers l'augmentation du Na par rapport au Ca sur le diagramme Piper et sur le graphique des proportions d'ions majeurs;
- 3) Le mélange d'eau marine: tendance linéaire à fortes concentrations sur le graphique Cl vs Na, tendance

vers le pôle de l'eau de mer sur le diagramme Piper et les graphiques des ions majeurs.

La figure 10 présente la distribution spatiale du niveau d'évolution géochimique de l'eau souterraine en fonction des types d'eau. Les types d'eau ont été classés en trois catégories par rapport à leur niveau d'évolution. Les points bleus représentent les eaux peu évoluées dominées par les combinaisons Ca/Mg et HCO₃, les points verts sont des eaux intermédiaires dominées par Na et HCO₃ et les points rouges dominés par Na et Cl.

Les eaux peu évoluées sont surtout associées à des eaux de recharge. En vert les eaux intermédiaires dominées par le type Na-HCO₃ sont des eaux qui ont eu un temps de résidence plus long ou avec un apport moindre d'eau fraîche. Les eaux très évoluées dominées par l'anion Cl indiquent un temps de résidence beaucoup plus long avec très peu d'apport d'eau fraîche. Ces eaux peuvent contenir un apport d'eau de formation profonde important. Sur la figure 10, on remarque que les eaux très évoluées se retrouvent plus souvent dans les bas topographiques en bordure de la péninsule.

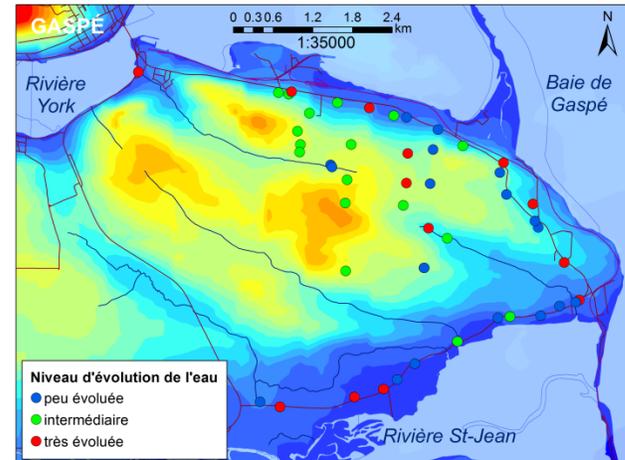


Figure 10. Distribution des types d'eau

6.1 Radioisotopes

L'analyse des isotopes radioactifs de tritium et du carbone 14 (¹⁴C) a été réalisée pour 18 échantillons dont 14 prélèvements dans les puits d'observation et 4 dans les ruisseaux. L'analyse des isotopes radioactifs a pour but de déterminer l'âge, ou temps de résidence, relatif de l'eau souterraine.

Il y a du tritium dans tous les échantillons, sauf à POH-11-10 où l'écoulement est vers le haut associé avec du gaz présumé. Il s'agit fort probablement d'eau d'origine plus profonde, avec une composante d'eau de formation. L'omniprésence de tritium indique un mélange d'eaux jeunes presque partout avec par endroit de l'eau plus ancienne. On aurait donc un système d'écoulement actif avec un renouvellement assez rapide de l'eau souterraine. La relation du tritium vs l'alcalinité indique qu'il y a aussi une relation entre le niveau d'évolution de l'eau souterraine et le tritium. La relation linéaire tritium vs ¹⁴C (figure 11) serait reliée au temps de résidence (ou l'apport d'eau ancienne) de l'eau souterraine.

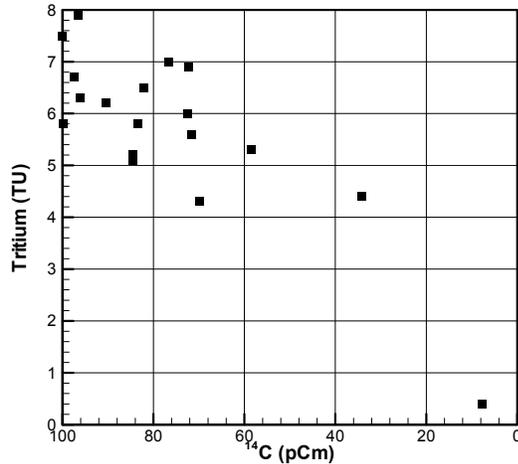


Figure 11. Tritium vs % de carbone moderne du ^{14}C

7 MODÉLISATION NUMÉRIQUE 2D

Une modélisation de l'écoulement à densité variable à l'aide du logiciel SALTFLOW (Molson et Frind, 2009) est présentement en développement. Cette modélisation permettra de préciser le modèle conceptuel, de déterminer les interfaces de différentes salinités et d'établir les paramètres initiaux du modèle numérique 3D.

Les conditions limites et initiales préliminaires qui ont servies à la construction du modèle d'écoulement et de transport sont présentées à la figure 12. La conductivité hydraulique horizontale (K_h) du socle rocheux varie avec la profondeur. Elle est de 3×10^{-6} m/s à la surface du modèle et elle diminue progressivement pour atteindre 5×10^{-10} m/s à la base du modèle. La conductivité hydraulique verticale (K_v) correspond à $K_v = K_h/100$. La porosité imposée est de 5% jusqu'à environ 600 m de profondeur et de 3% jusqu'à la base du modèle. Le coefficient d'emmagasinement est de 1×10^{-5} .

La figure 13 présente un résultat en régime quasi-permanent obtenu avec le simulateur numérique pour la coupe E-F (figure 6). Ce résultat est préliminaire puisque

le calage du modèle est actuellement en voie de réalisation. La figure 13a montre la distribution des charges équivalentes d'eau douce ainsi que le niveau de la nappe. Selon ce résultat, le haut topographique constitue une zone de recharge, les rivières agissent comme des drains et la mer correspond à la zone d'émergence du système. La plupart du système d'écoulement dynamique se trouve dans les premiers 250 m de profondeur et environ 50 m dans la partie sud. Dans le reste du système plus profond, l'eau circule beaucoup plus lentement. La figure 13b permet d'observer la position approximative de l'interface eau douce – eau de mer ainsi que l'interface eau de mer – eau de formation.

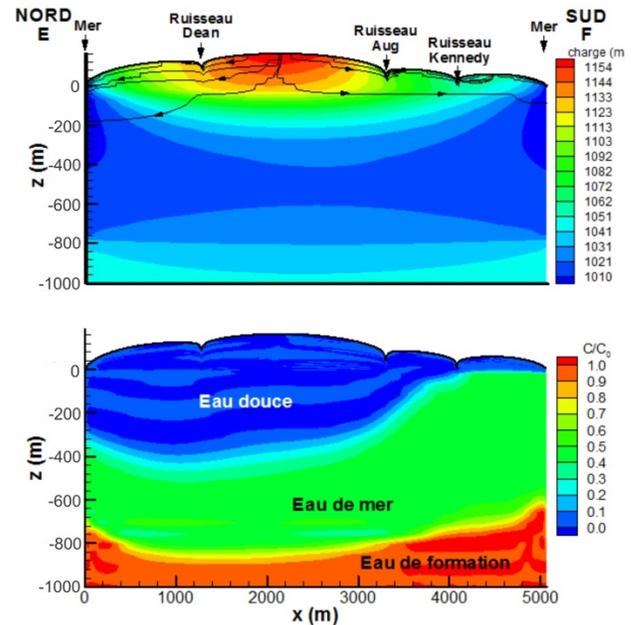


Figure 13. Modèle 2D vertical de l'écoulement à densité variable et du transport de masse (coupe E-F; figure 6): a) charges hydrauliques et b) concentration relative en sel ($C_{\max} = 70000$ ppm, soit salinité des eaux de formation). (Exagération verticale = 2,5 x)

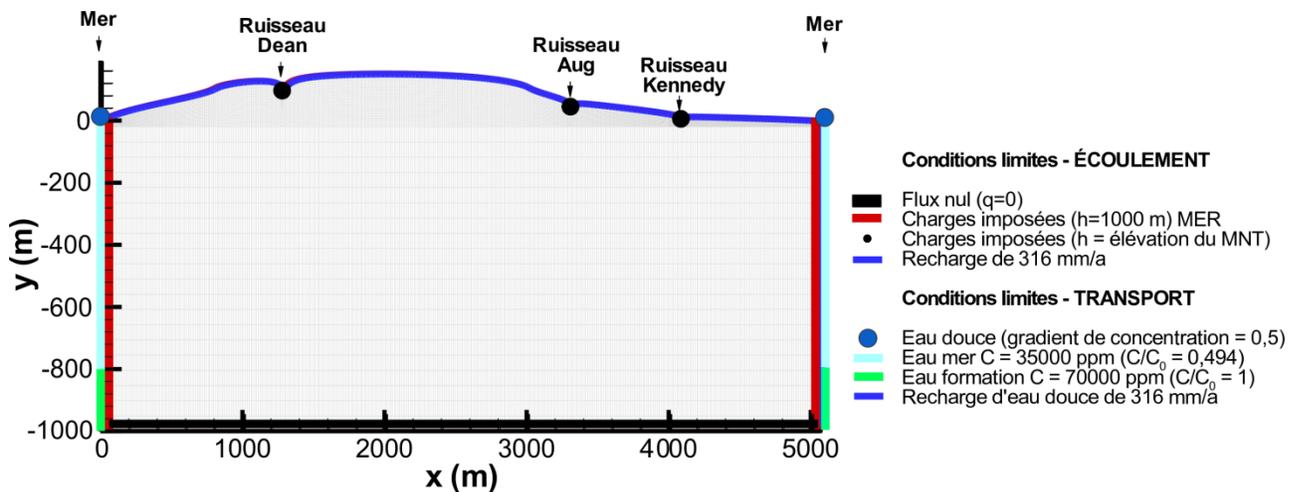


Figure 12. Conditions limites du modèle d'écoulement et de transport

8 CONCLUSION

L'interprétation initiale des données existantes et nouvelles acquises dans le cadre de la caractérisation du secteur Haldimand a permis de définir les conditions hydrogéologiques et hydrogéochimiques pour servir à l'élaboration d'un modèle conceptuel ainsi que d'un modèle numérique à densité variable (préliminaire) le long d'une ligne d'écoulement. L'écoulement du modèle 2D est en accord avec la piézométrie (drainage rivière et écoulement radiale).

Plusieurs travaux doivent cependant être réalisés pour compléter cette étude. D'abord, des analyses des hydrocarbures pétroliers et d'isotopes stables sont en cours et permettront de mieux définir le contexte hydrogéochimique. La compréhension du contexte et de l'écoulement permettra d'évaluer le risque environnemental que pourrait poser les activités pétrolières pour la qualité de l'eau souterraine.

La suite des travaux permettra de préciser le modèle conceptuel et de compléter le modèle numérique d'écoulement 2D. Une fois que le modèle conceptuel sera bien établi et validé par le modèle numérique 2D, une modélisation numérique 3D sera réalisée. La compréhension du contexte et de l'écoulement permettront d'évaluer le risque environnemental que pourraient poser les activités pétrolières pour la qualité de l'eau souterraine.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Pétrolia pour avoir donné accès à des données, le MDDEFP pour le support financier, l'échantillonnage et les analyses réalisées ainsi que la population locale qui a contribué aux travaux par l'accès à leur terrain ou à leurs puits. Les auteurs veulent aussi souligner et remercier le CRSNG pour les Subventions à la découverte des professeurs René Lefebvre et Erwan Gloaguen qui ont aussi supporté ces travaux.

RÉFÉRENCES

Appelo, C.A.J., Postma, D., 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, A.A. Balkema, Rotterdam.

Boucher, A. 2013. SGeMS 3.0 source code beta. Geostatistical Libraries and Software. url : <https://github.com/ar2tech/ar2tech-SGeMS-public>

Brisebois, D., G. Lachambre et G. Piché. 1991. Carte géologique Péninsule de la Gaspésie (22A, 22B, 22G, 22H et 21O). Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, carte 2146-DV 91-21, échelle 1/250 000.

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.

MDDEFP, 2013. Projet de règlement – Avis dans la Gazette officielle du 29 mai 2013. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs.

MDDEFP, 2012. Système d'information hydrogéologique (SIH). Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. Site Internet consulté en septembre 2012 : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih>.

Molson, J.W. & E.O.Frind, 2009. SALTFLOW User Guide, Density-dependent flow and mass transport model in three dimensions, Université Laval, 75 p.

Pétrolia, 2012. Site consulté en mai 2013. http://www.petroliagaz.com/en/exploration/region_detail.php?car_id=2

Pinet, N; Lavoie, D; Brouillette, P; Dion, D J; Keating, P; Brisebois, D; Malo, M; Castonguay, S, 2005 : Gravity and aeromagnetic atlas of the Gaspé Peninsula, Commission géologique du Canada, Dossier public 5020.

Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Séjourné, S., Lamontagne, C., Johnson, E.G., Duchesne, M.J., submitted. An overview of Canadian shale gas production and environmental concerns. Submitted to the *International Journal of Coal Geology (IJCG)*.

RQEP, 2013. Règlement sur la qualité de l'eau potable, Loi sur la qualité de l'environnement, Ministère du Développement Durable, Environnement, Faune et Parcs. Site consulté en mai 2013 : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2R40.htm

Santé Canada, 2013. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau 2 : Paramètres chimiques et physiques. Santé Canada. Site consulté en mai 2013 : http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-smmt/pubs/water-eau/2012-sum_guide-res_recom/index-fra.php

TechnoRem inc., 2013. Caractérisation hydrogéologique des secteurs Haldimand et Tar Point, Gaspé, Québec, Phase I, Rapport préliminaire, Réf. : PR11-92, juin 2013, 121 p. plus annexes.

Veillette, J.J. et Cloutier, M. 1993. Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec; Commission géologique du Canada, Carte 1804A, échelle 1/250 000.

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. http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/GW_Chart/GW_Chart.html.

Annexe 2 – Programme analytique Haldimand

Tableau A2.1 Programme analytique de base et comparaison des analyses réalisées par TechnoRem (2013) et le MDDELCC 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 |
|--|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Physico-chimie in situ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 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) Beryllium (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) Etain (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 in situ. | 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 pas prévu dans l'annexe II du projet de règlement

Tableau A2.2 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 | MDDELCC (Ete2013) | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|---|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|---------------------|-------------|---|----------------------|---------------------|
| | | | | 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 | | | | | | | | | X | X | |
| 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 No.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 3 – Résultats de mesures ou d'analyses

Résultats des analyses de carottes

Résultats d'interprétation d'essais de pompage

(TechnoRem, 2013)

Données de suivi de nappe (sur CD)

Résultats analytiques de l'eau de formation

Tableau A3.1 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 | 2510 | 2720. | ss vf f |
| POH-11-03-2 | 34.45 | 10.50 | 0.081 | 0.010 | 9.87E-15 | 2520 | 2740. | ss vf f |
| POH-11-03-3 | 52.5 | 16.00 | 0.093 | 0.030 | 2.96E-14 | 2440 | 2690. | ss vf f |
| POH-11-03-4 | 68.9 | 21.00 | 0.047 | 0.012 | 1.18E-14 | 2580 | 2710. | ss vf |
| POH-11-03-5 | 114.8 | 34.99 | 0.038 | 0.008 | 7.90E-15 | 2630 | 2740. | ss vf slty |
| POH-11-03-6 | 141.4 | 43.10 | 0.057 | 0.009 | 8.88E-15 | 2550 | 2710. | 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 | 2390 | 2690. | ss vf f |
| POH-11-10-2 | 26.4 | 8.05 | 0.102 | 0.070 | 6.91E-14 | 2420 | 2690. | ss vf f |
| POH-11-10-3 | 37.4 | 11.40 | 0.096 | 0.110 | 1.09E-13 | 2420 | 2680. | ss vf f |
| POH-11-10-4 | 37.1 | 11.31 | 0.051 | 0.011 | 1.09E-14 | 2580 | 2720. | ss vf slty |
| POH-11-10-5 | 90 | 27.43 | 0.062 | 0.009 | 8.88E-15 | 2550 | 2720. | ss vf slty |
| POH-11-10-6 | 131.2 | 39.99 | 0.070 | 0.010 | 9.87E-15 | 2530 | 2720. | ss vf slty |
| POH-11-10-7 | 154.2 | 47.00 | 0.053 | 0.011 | 1.09E-14 | 2570 | 2710. | ss vf slty |

Tableau A3.2 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) | sdv | = Sandy | vug | = Vuggy (vuggular) |
| fri | = Friable | SEM | = Scanning electron microscope analysis | ws | = Water sand |
| glauc | = Glauconite (glaucanitic) | 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) | | | | |

TABLEAU 4-2
PARAMÈTRES UTILISÉS ET RÉSULTATS DE L'INTERPRÉTATION DES ESSAIS HYDRAULIQUES

| Puits | Méthode d'interprétation | | Niveau* statique initial avant les tests (m) | Niveau* maximal au début de l'essai (m) | Paramètres (mètres) | | | | Conductivité hydrauliques (m/s) | Transmissivité (m ² /s) | | Conductivité hydrauliques (m/s) | | t/t' | Temps critique | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--|---|---|---|--------|------------------|-------|---------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------|----------|----------|----------------|----------|---|--|--|
| | Essai de perméabilité | Essai courte durée | | | r | R | L ⁽¹⁾ | b | Essai perméabilité | Pompage | Remontée | Pompage | Remontée | | (min) | Respecté | | | |
| POH-11-02 | - | | 14,71 | 23,48 | 0,0762 | 0,0762 | 27,35 | 27,35 | - | 7,33E-06 | 1,24E-05 | 2,68E-07 | 4,53E-07 | 1,3 | >60 | non | | | |
| POH-11-03 | - | En pompage: Cooper Jacob En Remontée: Theis & Jacob | 0,54 | 5,89 | 0,0381 | 0,0381 | 46,38 | 46,38 | - | 2,66E-04 | 1,68E-04 | 5,74E-06 | 3,62E-06 | 1,3 | 1,3 | oui | | | |
| POH-11-04 | Bouwer & Rice | | 5,56 | 17,28 | 0,0762 | 0,0762 | 35,89 | 35,89 | 4,60E-07 | 9,45E-06 | 1,02E-05 | 2,63E-07 | 2,84E-07 | 1,0 | >60 | non | | | |
| POH-11-05 | Bouwer & Rice | | 13,00 | 19,31 | 0,0762 | 0,0762 | 29,67 | 29,67 | 5,84E-07 | 1,02E-05 | 3,93E-06 | 3,44E-07 | 1,32E-07 | 2,5 | >60 | non | | | |
| POH-11-06 ⁽¹⁾ | - | | En pompage : Jacob-Lohman En remontée : Cooper-Jacob | 1,82 | 3,515 | 0,0762 | 0,0762 | 31,96 | 31,96 | - | 7,06E-04 | 1,37E-04 | 2,21E-05 | 4,28E-06 | - | - | - | | |
| POH-11-07 | - | En pompage: Cooper Jacob En Remontée: Theis & Jacob | 17,59 | 29,1 | 0,0762 | 0,0762 | 35,14 | 35,14 | - | 1,59E-06 | - | 4,52E-08 | - | - | >37 | non | | | |
| POH-11-08 | - | | 20,63 | 22,67 | 0,0762 | 0,0762 | 15,33 | 15,33 | - | 5,46E-05 | 8,60E-05 | 3,56E-06 | 5,61E-06 | 1,3 | 14,5 | oui | | | |
| POH-11-09 | - | | 5,93 | 9,98 | 0,0762 | 0,0762 | 40,23 | 40,23 | - | 1,51E-04 | 1,79E-04 | 3,75E-06 | 4,45E-06 | 0,6 | 10,0 | oui | | | |
| POH-11-10 | Bouwer & Rice | - | 1,71 | 18,30 | 0,0381 | 0,0381 | 46,33 | 46,33 | 3,53E-07 | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| POH-11-11 | - | En pompage: Cooper Jacob En Remontée: Theis & Jacob | 8,17 | 11,21 | 0,0762 | 0,0762 | 83,27 | 83,27 | - | 1,42E-04 | 1,23E-04 | 1,71E-06 | 1,48E-06 | 1,3 | 5,0 | oui | | | |
| POH-11-12 | - | | 6,35 | 12,83 | 0,0762 | 0,0762 | 34,13 | 34,13 | - | 5,56E-05 | 5,24E-05 | 1,63E-06 | 1,54E-06 | 1,1 | 21,7 | oui | | | |
| POH-11-13 | - | | 3,39 | 15,67 | 0,0762 | 0,0762 | 37,76 | 37,76 | - | 6,40E-06 | 1,94E-05 | 1,69E-07 | 5,14E-07 | 1,1 | >60 | non | | | |
| POH-11-14 | - | | 2,92 | 8,61 | 0,0762 | 0,0762 | 33,60 | 33,60 | - | 4,95E-05 | 3,82E-05 | 1,47E-06 | 1,14E-06 | 1,1 | 34,5 | oui | | | |
| POH-11-15 | Bouwer & Rice | | 6,28 | 16,9 | 0,0762 | 0,0762 | 13,52 | 13,52 | 1,26E-06 | 5,81E-06 | 3,40E-06 | 4,30E-07 | 2,51E-07 | 2,7 | >60 | non | | | |
| PH-01 | - | | 8,18 | 12,4 | 0,0762 | 0,0762 | 33,82 | 33,82 | - | 1,26E-04 | 2,67E-04 | 3,73E-06 | 7,89E-06 | 0,7 | - | - | | | |
| PH-02 | - | | 5,14 | 9,15 | 0,0762 | 0,0762 | 39,86 | 39,86 | - | 1,61E-04 | 2,05E-04 | 4,04E-06 | 5,14E-06 | 1,0 | - | - | | | |
| PH-04 | - | | 2,05 | 15,97 | 0,0762 | 0,0762 | 37,57 | 37,57 | - | 1,52E-05 | 1,07E-04 | 4,05E-07 | 2,85E-06 | 0,8 | 26,7 | oui | | | |
| POT-11-01 | Bouwer & Rice | - | 2,96 | 12,60 | 0,0762 | 0,0762 | 36,57 | 36,57 | 7,54E-07 | - | - | - | - | - | - | | | | |
| POT-11-02 ⁽¹⁾ | - | En pompage: Cooper Jacob En Remontée: Theis & Jacob | 0,00 | 9,98 | 0,0762 | 0,0762 | 36,57 | 36,57 | - | 5,53E-05 | 6,16E-05 | 1,51E-06 | 1,68E-06 | 1,6 | 29,5 | oui | | | |
| POT-11-03 | - | | 2,14 | 3,15 | 0,0762 | 0,0762 | 39,93 | 39,93 | - | 7,12E-04 | 7,37E-04 | 1,78E-05 | 1,85E-05 | 0,9 | 0,3 | oui | | | |
| Site Haldimand | | | | | Moyenne géométrique | | | | 5,88E-07 | 3,44E-05 | | 1,03E-06 | | | | | | | |
| | | | | | Moyenne géométrique t _c respecté | | | | | | | | 9,01E-05 | | 2,41E-06 | | | | |
| | | | | | Moyenne géométrique t _c non respecté | | | | | | | | 5,50E-06 | | 2,05E-07 | | | | |
| Site Tar Point | | | | | Moyenne géométrique | | | | - | 2,06E-04 | | 5,39E-06 | | | | | | | |

Légende :

R: rayon du casing
b: Epaisseur de l'aquifère
N/A : Non applicable

Note :

⁽¹⁾: Puits jaillissant

CERTIFICAT D'ANALYSES OFFICIEL

Junex inc.
 Monsieur Jean-Sébastien Marcl
 3075, Quatre-Bourgeois, Suite 103
 Ste-Foy, Québec
 G1W 4Y5

Certificat: 210544
 Certificat de prél. : 23915
 Date du rapport: 2006-04-27
 Client: D29100407
 Site: Junex inc.
 Projet: D29100407-2
 Nom du Projet: Suivi Saumure
 Commande: NA

Tél.: (418) 654-9661
 Fax: (418) 654-9662

Données sur le prélèvement

Échantillon: 977043
 Votre référence: NA
 Nature de l'échantillon: Saumure - eau
 Point d'échantillonnage: Voir commentaires
 Prélevé par: Luc Massé

Matrice: Eau
 État de l'échantillon: Conforme
 Date de prélèvement: 2006-03-20
 Date de réception: 2006-04-12

Résultats obtenus

| Paramètres | Description | Méthodes | Résultats | Unités | Date d'analyse * |
|------------|-----------------------------------|----------|-----------|--------|------------------|
| ACCCL-01 | Chlorures (automatisée) | AC267 | 160000 | mg/L | |
| | Résultat | | | | |
| ACCDENS01 | Densité | | 1.1141 | g/mL | |
| | Résultat | | | | |
| ACCSD-01 | Solides dissous | AC235 | 149400 | mg/L | |
| | Résultat | | | | |
| DBCBAIC02 | Baryum EU par ICP-AES | DB213 | 390 | mg/L | |
| | Résultat baryum EU par ICP-AES | | | | |
| DBCCAIC01 | Calcium EU par ICP-AES | DB213 | 18000 | mg/L | |
| | Résultat calcium EU par ICP-AES | | | | |
| DBCKICP01 | Potassium EU par ICP-AES | DB213 | 560 | mg/L | |
| | Résultat potassium EU par ICP-AES | | | | |
| DBCMGIC01 | Magnésium EU par ICP-AES | DB213 | 3300 | mg/L | |
| | Résultat magnésium EU par ICP-AES | | | | |
| DBCNAIC01 | Sodium EU par ICP-AES | DB213 | 64000 | mg/L | |
| | Résultat sodium EU par ICP-AES | | | | |
| DBCSTRIC01 | Strontium EU par ICP-AES | DB213 | 1100 | mg/L | |
| | Résultat strontium EU par ICP-AES | | | | |

ST: Sous-traitance N/D: Non détecté TNI: Colonies trop nombreuses pour être identifiées INT: Interférences
 La première lettre de la méthode indique le nom de la division où les analyses ont été effectuées : A - Thetford Mines, B - Jonquières, C - Joliette, D - Cap-de-la-Madeleine
 À moins d'une demande explicite du client, les échantillons d'analyses chimiques seront entreposés au maximum 21 jours après l'émission du rapport pour les paramètres dont le délai analytique le permet.
 Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite du laboratoire.
 Résultats applicables qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

CONFIDENTIEL

Page 3 de 6

F-13-03 / 2005-02-15
 Les laboratoires à la mesure
 de votre environnement

Cap-de-la-Madeleine • Saguenay • Joliette • Thetford Mines

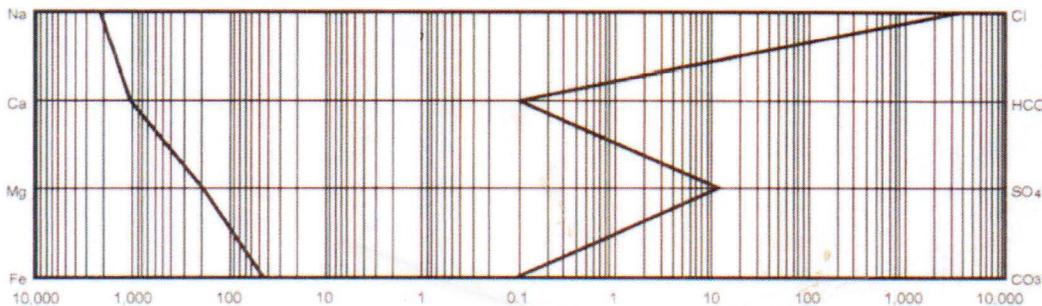


WATER ANALYSIS

B0001050 - 2 CONTAINER IDENTITY METER ID: _____ WELL LICENSE NUMBER: _____
 JUNEX Inc. OPERATOR PAGE: _____
 LOCATION (UWI): _____ WELL NAME: **Haldimand o1** KB ELEV (m): _____ GR ELEV (m): _____
 FIELD OR AREA: _____ POOL OR ZONE: _____ Junex Inc. SAMPLER: _____
 TEST TYPE AND NO: _____ TEST RECOVERY: _____
SPMC @ 1044.8 mcf
 POINT OF SAMPLE: _____ SAMPLE POINT ID: _____
 PUMPING _____ FLOWING _____ GAS LIFT _____ SWAB _____
 WATER _____ m³/d OIL _____ m³/d GAS _____ m³/d
 TEST INTERVAL or PERFS (meters): _____
 SEPARATOR _____ RESERVOIR _____ OTHER _____
 CONTAINER WHEN SAMPLED @ _____ °C CONTAINER WHEN RECEIVED @ _____ °C
 SEPARATOR _____ OTHER _____
16:40 Hrs Pressures, kPa (gauge) Temperatures, °C
 2008 10 29 2008 11 10 2008 11 21 K/S/D
 DATE SAMPLED (Y/M/D) DATE RECEIVED (Y/M/D) DATE ANALYZED (Y/M/D) ANALYST
 AMT. AND TYPE CUSHION MUD RESISTIVITY

| CATIONS | | | | ANIONS | | | | Total Dissolved Solids (mg/L) | |
|---------|--------|-------------|---------|------------------|---------|-------------|---------|-------------------------------|--------------------------|
| ION | mg/L | mg Fraction | meq/L | ION | mg/L | mg Fraction | meq/L | | |
| Na | 49,180 | 0.2413 | 2,139.2 | Cl | 129,490 | 0.6354 | 3,652.4 | Not Requested | Not Requested |
| K | 381 | 0.0019 | 9.7 | Br | | | | By Evaporation @ 110 °C | By Evaporation @ 180 °C |
| Ca | 20,090 | 0.0986 | 1,002.5 | I | | | | | 203802 |
| Mg | 2,190 | 0.0107 | 180.2 | HCO ₃ | 0.00 | 0.0000 | 0.0 | | Calculated |
| Ba | 3.0 | 0.0000 | 0.0 | SO ₄ | 555 | 0.0027 | 11.6 | 1.1514 @ 15.6 °C | 1.3681 @ 21 °C |
| Sr | 603 | 0.0030 | 13.8 | CO ₃ | 0.00 | 0.0000 | 0.0 | Specific Gravity | Refractive Index |
| Fe | 1,250 | 0.0061 | 44.8 | OH | 0.00 | 0.0000 | 0.0 | | |
| Mn | 60 | 0.0003 | 2.2 | H ₂ S | N.D. | | | 5.7 @ 25.0 °C | 0.074 @ 25 °C |
| | | | | | | | | pH | Resistivity (Ohm-Meters) |

LOGARITHMIC PATTERNS OF DISSOLVED IONS meq/L



REMARKS: N.D. - Not Detected.



**LABORATOIRE
BIOLOGIE AMÉNAGEMENT B.S.L. INC.**

56, Montée Industrielle-et-Commerciale, Rimouski (Québec) G5M 1B1
www.labobsl.com • Tél. : 418 723-8660 Fax : 418 723-8988



RAPPORT D'ANALYSES

| | | |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| No. accréditation 294 | Date de réception 2010-03-05 | No. laboratoire 20735 |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|

Date du prélèvement: 2010-03-04
Heure du prélèvement: 11:00h

PAGE- 1 de 1

Nature de l'échantillon: Eau usée

Endroit du prélèvement: Effluent instantané
Event du coffrage de surface
Pétrolia Haldimand no1

Prélevé par: Pierre Houle

Adresse: Pétrolia inc.
212, avenue de la Cathédrale
Rimouski (Québec)

Informations suppl.:

Procédure échantillonnage:

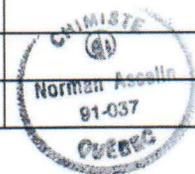
Description de l'échantillon:

État de l'échantillon à la réception:

Modifications apportées aux méthodes analytiques ou conditions particulières d'analyses (s'il y a lieu)

A pour ACCRÉDITÉ N pour NON-ACCRÉDITÉ S pour SOUS-TRAITANCE

| Paramètre | Résultat | Unité | Méthode Utilisée | Date d'analyse |
|---------------------|----------|----------------|--------------------|----------------|
| N Alcalinité totale | 534 | mg/litre CaCO3 | LBA Eaux-Alcal.1.1 | 2010-03-05 |
| N Bicarbonates | 534 | mg/litre CaCO3 | LBA Eaux-Alcal.1.1 | 2010-03-05 |
| N Calcium | 20640 | mg/litre Ca | LBA Eaux-Ca/Mg1.v2 | 2010-03-05 |
| A Chlorures | 97516 | mg/litre Cl- | LBA Eaux-Ions1.v3 | 2010-03-08 |
| A Fer total | 54 | mg/litre Fe | LBA EU/PP-Mét1.v4 | 2010-03-05 |
| N Magnésium | 1021 | mg/litre Mg | LBA Eaux-Ca/Mg1.v2 | 2010-03-05 |
| N Potassium | 483 | mg/litre K | LBA EU/PP-Mét1.v3 | 2010-03-05 |
| A Sodium | 37750 | mg/litre Na | LBA EU/PP-Mét1.v4 | 2010-03-05 |
| N Sulfates | <25 | mg/litre SO4 | LBA Eaux-Ions1.v3 | 2010-03-08 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |



Remarques: Ces résultats ne se rapportent qu'aux échantillons soumis à l'analyse.

Rapport émis le: 2010-03-08 Je déclare avoir constaté ces faits,

Norman Asselin, chimiste

Ce certificat ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation du laboratoire.

48°48'18.88792" N, 64°25'22.97516" W

Geographic coordinates

Pétrolia Haldimand N°1

Well Name

Haldimand

Field

February 28, 2010

Date Sampled

"surface"

Sample Point

York River

Formation or Zone

March 29, 2010

Date Received

no information

Client Sample No.

Petrolia

Company

1089.5-1134.5

Depth from KB or Interval (m)

June 2, 2010

Date Reported

IB-10-533

Isobrine Sample No.

Gaspe - Quebec

Field or Area

19.7

Temperature (C°)

0.031

Resistivity (Rw)

5.6

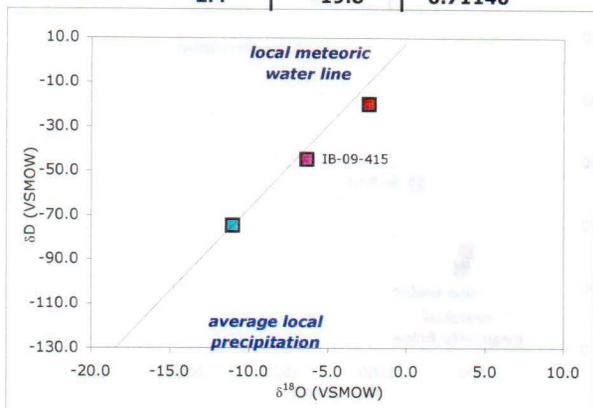
pH

n.m.

Density

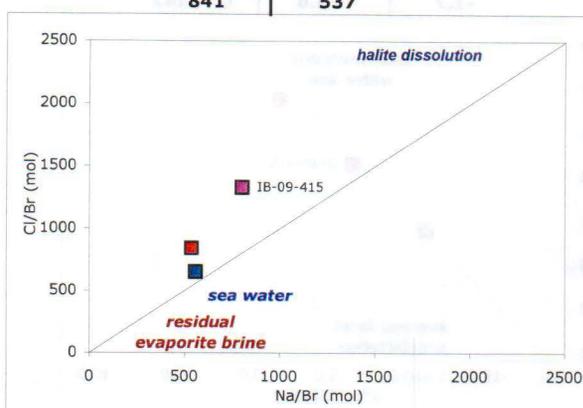
ISOTOPE COMPOSITION

| $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | δD (‰) | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |
|---------------------------|----------------------|---------------------------------|
| -2.4 | -19.8 | 0.71140 |



HALOGEN ELEMENT RATIOS

| Cl/Br (mol) | Na/Br (mol) |
|-------------|-------------|
| 841 | 537 |



MAJOR ION COMPOSITIONS

| CATION | mg/l | meq/l | ANION | mg/l | meq/l |
|--------|--------|-------|------------------|---------|-------|
| Na | 63,400 | 2758 | Cl | 153,000 | 4,316 |
| K | 400 | 10 | SO ₄ | <60 | n.a. |
| Ca | 19,500 | 973 | HCO ₃ | 25 | 0.41 |
| Mg | 3,000 | 247 | CO ₃ | <6 | n.a. |
| Fe | 2.10 | 0.11 | OH | <5 | n.a. |
| Ba | 651 | 9.5 | Br | 410 | 5.1 |
| B | 0.80 | 0.2 | I | n.m. | n.a. |
| Li | 8.6 | 1.2 | P-Alkalinity | <5 | |
| Sr | 1490 | 34 | T-Alkalinity | 20 | |



| | | | | |
|--------------|--------|--------|-------------------------|----------------|
| TOTAL | 4032.8 | 4321.1 | 241,897 | -3.5% |
| | | | TDS - calculated (mg/L) | Charge Balance |

TRACE ELEMENT COMPOSITIONS

| mg/l | | mg/l | | mg/l | | mg/l | | mg/l | |
|------|--------|------|--------|------|------|------|--------|------|-------|
| Ag | <0.002 | Bi | <0.1 | Cu | 0.30 | Pb | 1.50 | Sn | <0.2 |
| Al | <0.4 | Cd | <0.002 | Mn | 4.50 | Sb | <0.04 | Ti | <0.1 |
| As | 0.49 | Co | <0.02 | Mo | <0.2 | Se | <0.040 | Tl | <0.01 |
| Be | <0.02 | Cr | <0.1 | Ni | <0.1 | Si | <10 | U | <0.1 |
| | | | | | | | | V | <0.02 |
| | | | | | | | | Zn | 2.90 |

DATA INTERPRETATION

This sample appears to contain significantly larger quantities of local formation-brine of Paleozoic (Lower Devonian?) origin than sample IB-09-415 collected from the same well in June 2009 (sample plotted for comparison). The $^{87}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of this sample is significantly higher than that of Devonian/Paleozoic sea water and suggests interaction with lithologies of high $^{87}/^{86}\text{Sr}$ isotope composition.

NOTES

Stable isotope compositions determined by TC/EA-C-CF-IRMS. Cl and Br determined by IC. Other major and/or trace dissolved species and alkalinity determined by ICP-MS, ICP-AES and titration, respectively. $^{87}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio determined on TIMS.

48°48'18.88792" N, 64°25'22.97516" W
 Geographic coordinates
Pétrolia Haldimand N°1
 Well Name
Haldimand
 Field
February 24, 2010
 Date Sampled

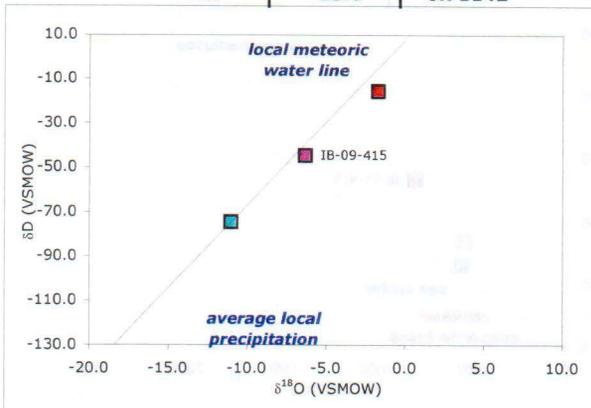
"surface"
 Sample Point
York River
 Formation or Zone
March 29, 2010
 Date Received

no information
 Client Sample No.
Petrolia
 Company
1142.5-1174.5
 Depth from KB or Interval (m)
June 2, 2010
 Date Reported

IB-10-532
 Isobrine Sample No.
Gaspe - Quebec
 Field or Area
20.5 **5.8**
 Temperature (C°) pH
0.031 **n.m.**
 Resistivity (Rw) Density

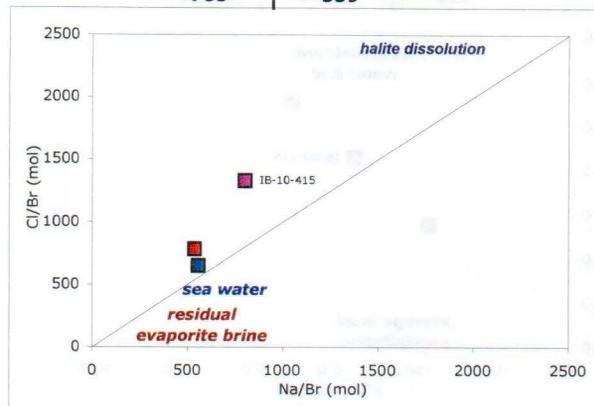
ISOTOPE COMPOSITION

| $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | δD (‰) | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |
|---------------------------|----------------------|---------------------------------|
| -1.7 | -15.6 | 0.71142 |



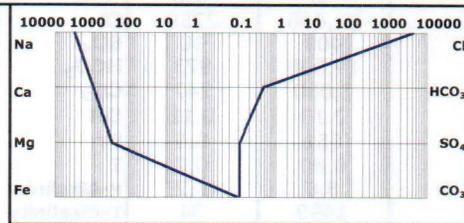
HALOGEN ELEMENT RATIOS

| Cl/Br (mol) | Na/Br (mol) |
|-------------|-------------|
| 783 | 539 |



MAJOR ION COMPOSITIONS

| CATION | mg/l | meq/l | ANION | mg/l | meq/l |
|--------|--------|-------|------------------|---------|-------|
| Na | 68,700 | 2,988 | Cl | 154,000 | 4,344 |
| K | 370 | 9.3 | SO ₄ | <30 | n.a. |
| Ca | 19,000 | 948 | HCO ₃ | 28 | 0.46 |
| Mg | 3,540 | 291 | CO ₃ | <6 | n.a. |
| Fe | <1 | n.a. | OH | <5 | n.a. |
| Ba | 721 | 11 | Br | 443 | 5.5 |
| B | 1.0 | 0.28 | I | n.m. | n.a. |
| Li | 9.5 | 1.4 | P-Alkalinity | <5 | |
| Sr | 1,570 | 36 | T-Alkalinity | 23 | |



| | | | |
|--------------|--------|--------|---|
| TOTAL | 4285.0 | 4349.8 | 248,389 |
| | | | -0.75% |
| | | | <small>TDS - calculated (mg/L) Charge Balance</small> |

TRACE ELEMENT COMPOSITIONS

| mg/l | | mg/l | | mg/l | | mg/l | | mg/l | | | |
|------|--------|------|--------|------|------|------|--------|------|-------|----|-------|
| Ag | <0.002 | Bi | <0.1 | Cu | 0.20 | Pb | 0.09 | Sn | <0.2 | V | <0.02 |
| Al | <0.4 | Cd | <0.002 | Mn | 4.4 | Sb | <0.04 | Ti | <0.1 | Zn | 1.00 |
| As | 0.52 | Co | <0.02 | Mo | <0.2 | Se | <0.040 | Tl | <0.01 | | |
| Be | <0.02 | Cr | <0.1 | Ni | <0.1 | Si | <5 | U | <0.1 | | |

DATA INTERPRETATION

This sample appears to contain significantly larger quantities of local formation-brine of Paleozoic (Lower Devonian?) origin than sample IB-09-415 collected from the same well in June 2009 (sample plotted for comparison). The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio of this sample is significantly higher than that of Devonian/Paleozoic sea water and suggests interaction with lithologies of high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope composition.

NOTES

Stable isotope compositions determined by TC/EA-C-CF-IRMS. Cl and Br determined by IC. Other major and/or trace dissolved species and alkalinity determined by ICP-MS, ICP-AES and titration, respectively. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio determined on TIMS.

Annexe 4 – Informations sur les puits d’observation

Résumé des spécifications des puits d’observation

(TechnoRem, 2013)

Description des forages

(TechnoRem, 2013)

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 : PH-04

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): 84,79

Élévation du tubage protecteur (m): 85,35

Profondeur du niveau d'eau -Tubage (m): 1,65

Coordonnée Est (UTM Nad 83)(m): 393 956,38

Coordonnée Nord (UTM Nad 83)(m): 5 407 759,28

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 |
|---------------|----------------|---|---------|--------|------|---------|----------------|--|-----------------|--|
| 85.79 | -1 | Surface du Sol | | | | | | | | <p>Tubage en acier de 152 mm de diamètre aménagé hors-sol. Élévation du niveau d'eau: 74,06 m (26 octobre 2012).</p> <p>Forage de 254 mm de diamètre. Coulis de ciment-bentonite.</p> <p>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> |
| | 1 | Roc Grès vert à grains très fins, non consolidé. | | 1 | G | - | - | | | |
| 81.74 | 3 | Alternance de lits de grès vert, gris ou rouge à grains fins à moyens et de mudrock grise. Variation du degré de consolidation apparent (faible à moyen). Présences de fractures. | | 2 | G | - | - | | | |
| | 5 | | | 3 | G | - | - | | | |
| | 7 | | | 4 | G | - | - | 5,49 m: 6 L/min | | |
| | 9 | | | 5 | G | - | - | | | |
| | 11 | | | 6 | G | - | - | | | |
| | 13 | | | 7 | G | - | - | 9,91 m | | |
| | 15 | | | 8 | G | - | - | | | |
| | 17 | | | 9 | G | - | - | 12,2 m: 15 L/min | | |
| | 19 | | | 10 | G | - | - | | | |
| | 21 | | | 11 | G | - | - | 14,02 m | | |
| | 23 | | | 12 | G | - | - | | | |
| | 25 | | | 13 | G | - | - | 17,37 m | | |
| | 27 | | | 14 | G | - | - | | | |
| | 29 | | | 15 | G | - | - | | | |
| | 31 | | | 16 | G | - | - | 24,08 m | | |
| | 33 | | | 17 | G | - | - | | | |
| | 35 | | | 18 | G | - | - | | | |
| | 37 | | | 19 | G | - | - | | | |
| | 39 | | | 20 | G | - | - | | | |
| 55.83 | 29 | Présence de lits de mudrock. | | 21 | G | - | - | | | |
| | 31 | | | 22 | G | - | - | | | |
| | 33 | | | 23 | G | - | - | | | |
| | 35 | | | 24 | G | - | - | | | |
| | 37 | | | 25 | G | - | - | | | |
| | 39 | | | 26 | G | - | - | | | |
| 45.17 | | Fin du sondage | | | | | | | | |

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 | | | | | | | | |
| 93.523 | 1 | Dépôts meubles Till à matrice sableuse avec un peu de gravier anguleux. | [Symbol] | 1 | G | - | - | | | 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. |
| | 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. | [Symbol] | 2 | G | - | - | | | |
| | 5 | | [Symbol] | 3 | G | - | - | | | |
| | 7 | | [Symbol] | 4 | G | - | - | | | |
| | 9 | | [Symbol] | 5 | G | - | - | | | |
| | 11 | | [Symbol] | 6 | G | - | - | | | |
| | 13 | | [Symbol] | 7 | G | - | - | | | |
| | 15 | | [Symbol] | 8 | G | - | - | | | |
| | 17 | | [Symbol] | 9 | G | - | - | | | |
| | 19 | | [Symbol] | 10 | G | - | - | | | |
| | 21 | | [Symbol] | 11 | G | - | - | | | |
| | 23 | | [Symbol] | 12 | G | - | - | | | |
| | 25 | | [Symbol] | 13 | G | - | - | | | |
| | 27 | | [Symbol] | 14 | G | - | - | | | |
| | 29 | | [Symbol] | 15 | G | - | - | | | |
| | 31 | Présence de lits de grès conglomératique, apparence consolidée, présence de fractures. | [Symbol] | 16 | G | - | - | | | |
| | 33 | | [Symbol] | 17 | G | - | - | | | |
| | 35 | | [Symbol] | 18 | G | - | - | | | |
| 57.38 | 37 | Alternance de lits de grès vert, gris et rouge à grains fins à très fins. Présence de fractures. | [Symbol] | 19 | G | - | - | | | |
| | 39 | | [Symbol] | 20 | G | - | - | | | |
| | 41 | | [Symbol] | 21 | G | - | - | | | |
| 51.92 | 43 | Fin du sondage | | 22 | G | - | - | | | |
| | | | | 23 | G | - | - | | | |
| | | | | 24 | G | - | - | | | |
| | | | | 25 | G | - | - | | | |
| | | | | 26 | G | - | - | | | |
| | | | | 27 | G | - | - | | | |
| | | | | 28 | G | - | - | | | |

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 | Schéma du puits | Détails de construction du puits |
|---------------|----------------|--|---------|--------|------|---------|----------------|--|-----------------|---|
| 61.36 | -1 | Surface du Sol | | | | | | | | 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. |
| 60.08 | 1 | Dépôts meubles Argile silteuse. | | 1 | | 0 | 100 | | | |
| | 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 | Roc sain à très sain. | | 6 | | 75 | 95 | 10,0 m | | |
| | 11 | | | 7 | | 80 | 90 | | | |
| | 13 | | | 8 | | 83 | 96 | | | |
| | 15 | | | 9 | | 89 | 90 | | | |
| 43.59 | 15 | | | 10 | | 95 | 100 | | | |
| | 17 | 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. | | 11 | | 87 | 100 | 16,5 m | | |
| | 19 | | | 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

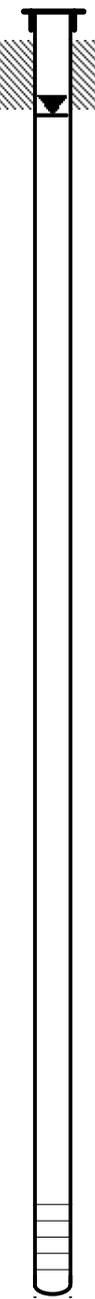
Élévation du tubage protecteur (m): 77,27

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> |
| 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 | - | - | | | |
| | 3 | | | 3 | G | - | - | | | |
| | 5 | | | 4 | G | - | - | | | |
| | 7 | | | 5 | G | - | - | | | |
| | 7 | | | 6 | G | - | - | | | |
| | 9 | | | 7 | G | - | - | | | |
| | 11 | | | 8 | G | - | - | | | |
| | 13 | | | 9 | G | - | - | | | |
| | 15 | | | 10 | G | - | - | | | |
| | 17 | | | 11 | G | - | - | | | |
| | 17 | | | 12 | G | - | - | | | |
| | 19 | | | 13 | G | - | - | | | |
| | 21 | | | 14 | G | - | - | | | |
| | 23 | | | 15 | G | - | - | | | |
| 52.12 | 25 | Grès conglomératique gris à grains fins. Consolidation apparente bonne à moyenne. | | 16 | G | - | - | | | |
| | 27 | | | 17 | G | - | - | | | |
| | 27 | | | 18 | G | - | - | | | |
| | 29 | | | 19 | G | - | - | | | |
| | 29 | | | 20 | G | - | - | | | |
| | 31 | | | 21 | G | - | - | | | |
| | 31 | | | 22 | G | - | - | | | |
| | 33 | | | 23 | G | - | - | | | |
| | 35 | | | 24 | G | - | - | | | |
| 39.92 | 37 | Alternance de lits de grès gris et vert à grains moyens à grossiers. Présence de fractures. | | 25 | G | - | - | | | |
| | 39 | | | 26 | G | - | - | | | |
| | 39 | | | 27 | G | - | - | | | |
| 35.07 | 41 | | | 28 | G | - | - | | | |
| | | Fin du sondage | | | | | | 41,0 m: 2 L/min | <p>Crépine en CPV de 114 mm de diamètre.</p> | |

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 | | | | | | | | <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>Fin du tubage d'acier.</p> <p>Élévation du niveau d'eau: 85,84 m (26 octobre 2012).</p> <p>Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.</p> |
| 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 | - | - | | | |
| | 21 | | | 14 | G | - | - | 20,73 m | | |
| | 23 | | | 15 | G | - | - | | | |
| | 25 | | | 16 | G | - | - | | | |
| | 27 | | | 17 | G | - | - | | | |
| | 27 | | | 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

Projet: Pétrolia / Gaspé

No. de projet: PR11-92

Localisation: Gaspé POH-11-07

Méthode de forage: Rotatif, percussion

Foré par: Forage Lizotte

Date du forage: 3 Décembre 2011

Élévation du sol (m): 98,34

Élévation du tubage protecteur (m): 99,00

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

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 | Shéma du puits | Détails de construction du puits |
|---------------|----------------|--|---------|--------|------|---------|----------------|--|----------------|---|
| 99.34 | -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. Fin du tubage d'acier.</p> <p>Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert.</p> <p>Élévation du niveau d'eau: 82,81 m (26 octobre 2012).</p> |
| 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 | - | - | 29,0 m: 11 L/min | | |
| | 37 | | | 19 | G | - | - | | | |
| | 39 | | | 20 | G | - | - | | | |
| | 41 | | | 21 | G | - | - | | | |
| | 43 | | | 22 | G | - | - | | | |
| | 45 | | | 23 | G | - | - | 32,92 m | | |
| | 47 | | | 24 | G | - | - | | | |
| | 49 | | | 25 | G | - | - | | | |
| | 51 | | | 26 | G | - | - | | | |
| | 53 | | | 27 | G | - | - | | | |
| | | | | 28 | G | - | - | | | |
| | | | | 29 | G | - | - | 42,5 m: 19 L/min | | |
| | | | | 30 | G | - | - | | | |
| | | | | 31 | G | - | - | | | |
| | | | | 32 | G | - | - | | | |
| | | | | 33 | G | - | - | 48,8 m: 16 L/min | | |
| | | | | 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 | Shéma 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: Pétrolia / 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 | - | - | 7,62 m | | | | 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. |
| | 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 | - | - | | | | | |
| | 13 | | | 7 | G | - | - | | | | | |
| | 15 | | | 8 | G | - | - | | | | | |
| | 17 | | | 9 | G | - | - | | | | | |
| | 19 | | | 10 | G | - | - | | | | | |
| | 21 | | | 11 | 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. | | 12 | G | - | - | | | | | |
| | 23 | | | 13 | G | - | - | | | | | |
| | 25 | | | 14 | G | - | - | | | | | |
| | 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 | | Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert. | | |
| | 43 | | | 23 | G | - | - | | | | | |
| | 45 | | | 24 | G | - | - | | | | | |
| | 47 | | | 25 | G | - | - | | | | | |
| 37.64 | 45 | | | 26 | G | - | - | 46,3 m: 78 L/min | | Forage de 152 mm de diamètre en trou ouvert. | | |
| | 47 | Fin du sondage | | 27 | G | - | - | | | | | |

JOURNAL DE SONDAGE

Numéro du puits : POH-11-11

Client: PÉTROLIA / INRS

Projet: Pérolia / 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.</p> <p>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-11-14

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 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 | - | - | | | Coulis de ciment-bentonite. | |
| | 7 | | ●●●● | 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 | Fin du sondage | | 20 | G | - | - | 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

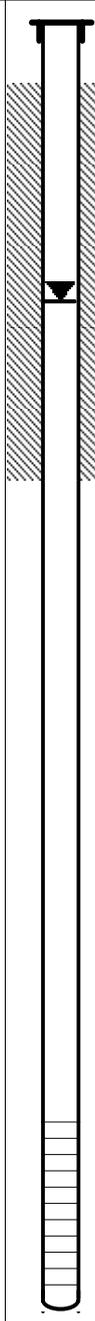
Élévation du tubage protecteur (m): 84,92

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 5 – Fichiers de travail (sur CD)

Bilan hydrologique

Fichiers cartographiques

Fichiers de modélisation numérique

Tableaux et fichiers d'analyse paramétrique du modèle numérique

Tableau A5.1 Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'analyse paramétrique

Conductivité globale

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom du fichier de simulation</i> | <i>Nombre de jours simulés(j)</i> |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| k x 2 | P-k1-1 | 1800000 |
| | P-k1-2 | 600000 |
| | P-k1-3 | 1500000 |
| | P-k1-4 | 1500000 |
| | P-k1-5 | 1800000 |
| | P-k1-6 | 1800000 |
| | P-k1-7 | 1800000 |
| | P-k1-8 | 1800000 |
| | P-k1-9 | 1800000 |
| | P-k1-10 | 1800000 |
| | P-k1-11 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 44384 |
| k/2 | P-k2-1 | 1800000 |
| | P-k2-2 | 600000 |
| | P-k2-3 | 1500000 |
| | P-k2-4 | 1500000 |
| | P-k2-5 | 1800000 |
| | P-k2-6 | 1800000 |
| | P-k2-7 | 1800000 |
| | P-k2-8 | 1800000 |
| | P-k2-9 | 1800000 |
| | P-k2-10 | 1800000 |
| | P-k2-11 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 49315 |

Tableau A5.1 (suite) Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'analyse paramétrique

Conductivité hydraulique en profondeur

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom du fichier de simulation</i> | <i>Nombre de jours simulés(j)</i> |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| k/2 | P-kprof1-1 | 1800000 |
| | P-kprof1-2 | 1500000 |
| | P-kprof1-3 | 1500000 |
| | P-kprof1-4 | 1800000 |
| | P-kprof1-5 | 1800000 |
| | P-kprof1-6 | 1800000 |
| | P-kprof1-7 | 1800000 |
| | P-kprof1-8 | 1800000 |
| | P-kprof1-9 | 1800000 |
| | P-kprof1-10 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 47671 |
| k*2 | P-kprof2-1 | 1800000 |
| | P-kprof2-2 | 1500000 |
| | P-kprof2-3 | 1500000 |
| | P-kprof2-4 | 1800000 |
| | P-kprof2-5 | 1800000 |
| | P-kprof2-6 | 1800000 |
| | P-kprof2-7 | 1800000 |
| | P-kprof2-8 | 1800000 |
| | P-kprof2-9 | 1800000 |
| | P-kprof2-10 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 47671 |

Tableau A5.1 (suite) Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'analyse paramétrique

Anisotropie en profondeur

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom du fichier de simulation</i> | <i>Nombre de jours simulés(j)</i> |
|---|---|-----------------------------------|
| k _x =k _z | P-ani1-1 | 1800000 |
| | P-ani1-2 | 600000 |
| | P-ani1-3 | 1500000 |
| | P-ani1-4 | 1500000 |
| | P-ani1-5 | 1800000 |
| | P-ani1-6 | 1800000 |
| | P-ani1-7 | 1800000 |
| | P-ani1-8 | 1800000 |
| | P-ani1-9 | 1800000 |
| | P-ani1-10 | 1800000 |
| | P-ani1-11 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 49315 |
| inverser k _x et k _z | P-ani2-1 | 1800000 |
| | P-ani2-2 | 1500000 |
| | P-ani2-3 | 1500000 |
| | P-ani2-4 | 1800000 |
| | P-ani2-5 | 1800000 |
| | P-ani2-6 | 1800000 |
| | P-ani2-7 | 1800000 |
| | P-ani2-8 | 1800000 |
| | P-ani2-9 | 1800000 |
| | P-ani2-10 | 1800000 |
| | Nombre d'années simulées au total: | |
| k _x /k _z | P-ani3-1 | 1800000 |
| | P-ani3-2 | 1500000 |
| | P-ani3-3 | 1500000 |
| | P-ani3-4 | 1800000 |
| | P-ani3-5 | 1800000 |
| | P-ani3-6 | 1800000 |
| | P-ani3-7 | 1800000 |
| | P-ani3-8 | 1800000 |
| | P-ani3-9 | 1800000 |
| | P-ani3-10 | 1800000 |
| | Nombre d'années simulées au total: | |

Tableau A5.1 (suite) Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'analyse paramétrique

Porosité

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom du fichier de simulation</i> | <i>Nombre de jours simulés(j)</i> |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| n / 2 | P-n1-1 | 1800000 |
| | P-n1-2 | 1500000 |
| | P-n1-3 | 1500000 |
| | P-n1-4 | 1800000 |
| | P-n1-5 | 1800000 |
| | P-n1-6 | 1800000 |
| | P-n1-7 | 1800000 |
| | P-n1-8 | 1800000 |
| | P-n1-9 | 1800000 |
| | P-n1-10 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 47671 |
| n x 2 | P-n2-1 | 1800000 |
| | P-n2-2 | 1500000 |
| | P-n2-3 | 1500000 |
| | P-n2-4 | 1800000 |
| | P-n2-5 | 1800000 |
| | P-n2-6 | 1800000 |
| | P-n2-7 | 1800000 |
| | P-n2-8 | 1800000 |
| | P-n2-9 | 1800000 |
| | P-n2-10 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 47671 |

Tableau A5.1 (suite) Liste des simulations réalisées dans le cadre de l'analyse paramétrique

Dispersivité

| <i>Paramètre analysé</i> | <i>Nom du fichier de simulation</i> | <i>Nombre de jours simulés(j)</i> |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| $\alpha_{LH} * 2.5$ | P-disp1-1 | 1500000 |
| | P-disp1-2 | 1500000 |
| | P-disp1-3 | 1800000 |
| | P-disp1-4 | 1800000 |
| | P-disp1-5 | 1800000 |
| | P-disp1-6 | 1800000 |
| | P-disp1-7 | 1800000 |
| | P-disp1-8 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 37808 |
| $\alpha_{LH} / 2$ | P-disp2-1 | 1500000 |
| | P-disp2-2 | 1500000 |
| | P-disp2-3 | 1800000 |
| | P-disp2-4 | 1800000 |
| | P-disp2-5 | 1800000 |
| | P-disp2-6 | 1800000 |
| | P-disp2-7 | 1800000 |
| | P-disp2-8 | 1800000 |
| Nombre d'années simulées au total: | | 37808 |