

**Projet de connaissance des eaux souterraines
du bassin versant de la rivière Bécancour et
de la MRC de Bécancour**

RAPPORT FINAL

**Marie Larocque
Sylvain Gagné
Lysandre Tremblay
Guillaume Meyzonnat**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère

31 mars 2013

Équipe de réalisation

Hydrogéologie

| | |
|---------------------|--|
| Marie Larocque | Coordonnatrice du projet, hydrogéologue, professeure, UQAM |
| Sylvain Gagné | Agent de recherche, UQAM |
| Lysandre Tremblay | Agent de recherche, UQAM |
| Guillaume Meyzonnat | Agent de recherche, UQAM |

Collaborateurs

| | |
|--------------------|--|
| Michel Lamothe | Géologue quaternariste, professeur, UQAM |
| Olivier Caron | Géologue quaternariste, étudiant PhD, UQAM |
| Stéphanie Pellerin | Botaniste, chercheuse à Institut de recherche en biologie végétale |

Étudiants MSc et postdoctoral

Karine Avar, Pierre-Marc Godbout et Guillaume Meyzonnat, MSc Sciences de la Terre, UQAM
 Imad Lekouch, stagiaire postdoctoral, UQAM

Stagiaires BSc Sciences de la Terre et de l'atmosphère

Diogo Barnetche, El Multapha Choabi, Kevin Chaumont Blonsky, Olivier Ferland, Miryane Ferlatte, Frédérique Lemay-Borduas, Mireille Pelletier, Patrick Turgeon, Syndia Fernandes

Support logistique

| | |
|------------------------|---------------------------|
| Frédéric Toupin | Informaticien, UQAM |
| Michelle Laithier | Dessinatrice, UQAM |
| Marie-Hélène Graveline | Agente de recherche, UQAM |

Partenaires régionaux au projet

Organisme de bassin versant GROBEC
 Agence de géomatique du centre du Québec
 Conférence régionale des élus du Centre-du-Québec
 MRC d'Arthabaska, de Bécancour, de l'Érable et Nicolet-Yamaska
 Cégep de Thetford

Référence à citer

Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L., Meyzonnat, G. 2013. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. 219 p.

AVANT-PROPOS

Ce rapport est le résultat de quatre années de travail de caractérisation des eaux souterraines dans la portion de la Zone de gestion intégrée de l'eau Bécancour incluse dans la région Centre-du-Québec. Ce projet a été financé grâce à un investissement du MDDEFP dans le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, et grâce à des investissements financiers et en nature des partenaires régionaux. Les partenaires régionaux sont l'organisme de bassin versant GROBEC, l'Agence de géomatique du centre du Québec, les MRC d'Arthabaska, de Bécancour, de l'Érable et de Nicolet Yamaska, la CRÉ Centre-du-Québec et le cégep de Thetford. Les auteurs remercient tous les partenaires pour leur implication financière et logistique dans le projet. Les auteurs désirent également remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation du projet, les collaborateurs scientifiques, les étudiants de maîtrise, les stagiaires ainsi que le personnel de soutien de l'UQAM. Les travaux de terrain n'auraient pas pu avoir lieu sans la collaboration des habitants de la région, des MRC, des municipalités et des Ministères. Les résultats présentés dans ce rapport sont également le fruit d'une nouvelle collaboration interuniversitaire entre des équipes de recherche basées dans différentes universités québécoises.

Il est important de souligner que toutes les cartes produites dans ce projet sont représentatives des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional qui en découle pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, ces cartes ne peuvent remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offrent aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée des cartes produites dans ce projet et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par les cartes ou des données y étant rattachées.

RÉSUMÉ

Le *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour* financé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissance des eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) avait pour but d'établir la cartographie hydrogéologique de la portion de la Zone de gestion intégrée de l'eau Bécancour située dans la région du Centre-du-Québec (superficie totale 2924 km²). Ce projet a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal en collaboration avec un ensemble de partenaires régionaux (Conférence régionale des élus du Centre-du-Québec, MRC d'Arthabaska, de Bécancour, de l'Érable et de Nicolet-Yamaska, organisme de bassin versant GROBEC, Agence de Géomatique du Centre-du-Québec et cégep de Thetford).

Les résultats de cette étude montrent que l'aquifère rocheux est dans l'ensemble peu productif. Les formations superficielles granulaires, plus perméables, sont peu épaisses et d'étendue limitée, à l'exception de l'aquifère des sables des Vieilles Forges qui pourrait représenter une source importante d'eau potable. L'eau souterraine s'écoule principalement dans le roc fracturé, du secteur des Appalaches à l'amont vers le fleuve Saint-Laurent en aval. Une partie importante de cet écoulement souterrain est intercepté par les nombreuses rivières présentes dans la région. À l'échelle régionale, la recharge de l'aquifère fracturé est estimée à 159 mm/an. Les volumes d'eau souterraine utilisés par les particuliers, les villes, l'agriculture et l'industrie représentent environ 1% de la recharge de l'aquifère fracturé. Une très faible proportion de la recharge (4%) atteint le fleuve Saint-Laurent en aval de la zone d'étude. L'eau souterraine de la zone d'étude est de bonne qualité et peu de dépassements des normes pour l'eau potable ont été identifiés. Les principaux dépassements, pour le fluor et le baryum, seraient d'origine naturelle. Les problématiques identifiées concernent certains critères esthétiques et notamment les concentrations en manganèse. Les concentrations en nitrates observées ne dépassent pas la norme pour l'eau potable. Elles atteignent toutefois, dans la partie amont de la zone d'étude, des concentrations telles qu'elles peuvent être associées à une source anthropique. Les secteurs où l'aquifère rocheux est le plus vulnérable à une contamination provenant de la surface sont situés entre le piémont des Appalaches et l'autoroute 20, aux endroits où les dépôts sableux sont en contact direct avec le roc et où la recharge est élevée.

Le projet PACES-Bécancour apporte des connaissances très importantes pour la région au sujet des eaux souterraines. Les données acquises, les cartes produites et les analyses qui en découlent seront directement utiles pour la gestion de la ressource en eau à l'échelle de la Zone de gestion intégrée de l'eau Bécancour.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-------------|
| AVANT-PROPOS..... | iv |
| RÉSUMÉ | v |
| TABLE DES MATIÈRES..... | vii |
| LISTE DES FIGURES | x |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xii |
| LISTE DES ANNEXES..... | xiii |
| 1 INTRODUCTION..... | 15 |
| 1.1 Contexte de réalisation du projet PACES-Bécancour et objectifs..... | 15 |
| 1.2 Équipe de réalisation et partenaires | 16 |
| 1.2.1 Équipe de réalisation | 16 |
| 1.2.2 Partenaires | 17 |
| 1.3 Organisation du rapport..... | 18 |
| 2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE | 19 |
| 2.1 Localisation..... | 19 |
| 2.2 Milieu naturel..... | 23 |
| 2.2.1 Topographie et modèle numérique altimétrique | 23 |
| 2.2.2 Pente du sol..... | 23 |
| 2.2.3 Hydrographie et limites des bassins | 31 |
| 2.2.4 Couverture végétale | 37 |
| 2.2.5 Milieux humides | 45 |
| 2.2.6 Pédologie..... | 50 |
| 2.2.7 Réseau de surveillance et programme de suivi..... | 53 |
| 2.3 Population, centres urbains et activités | 59 |
| 2.3.1 Municipalités..... | 59 |
| 2.3.2 Occupation du sol | 61 |
| 2.3.3 Affectation du territoire..... | 65 |
| 3 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION | 69 |
| 3.1 Compilation de l'information existante..... | 69 |
| 3.2 Travaux de caractérisation | 71 |
| 3.2.1 Cartographie géologique | 76 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.2.2 | Géophysique..... | 76 |
| 3.2.3 | Sondages et forages..... | 76 |
| 3.2.4 | Essais hydrauliques sur les puits..... | 79 |
| 3.2.5 | Mesure des niveaux piézométriques | 81 |
| 3.2.6 | Échantillonnage d'eau..... | 81 |
| 3.2.7 | Caractérisation des tourbières | 84 |
| 3.2.8 | Mesure des débits de base en période d'étéage | 84 |
| 3.3 | Saisie, validation et archivage des données | 84 |
| 3.3.1 | Inventaire des données (sources et types) | 85 |
| 3.3.2 | Protocoles de saisie, d'archivage et de validation | 85 |
| 4 | CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONAUX | 87 |
| 4.1 | Géologie du socle rocheux | 87 |
| 4.1.1 | Histoire géologique | 87 |
| 4.1.2 | Stratigraphie et lithologies..... | 87 |
| 4.1.3 | Géologie, structure et fracturation..... | 89 |
| 4.2 | Géologie du Quaternaire | 95 |
| 4.2.1 | Histoire du Quaternaire | 95 |
| 4.2.2 | Stratigraphie des dépôts meubles | 96 |
| 4.2.3 | Couverture de dépôts meubles..... | 96 |
| 4.2.4 | Architecture des sédiments..... | 104 |
| 4.2.5 | Contexte hydrostratigraphique des tourbières | 116 |
| 4.3 | Conditions de confinement..... | 118 |
| 4.4 | Contextes hydrogéologiques..... | 121 |
| 5 | CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES | 125 |
| 5.1 | Propriétés hydrauliques | 125 |
| 5.1.1 | Essais hydrauliques | 125 |
| 5.1.2 | Estimation de la conductivité hydraulique de l'aquifère fracturé à partir de la capacité spécifique..... | 131 |
| 5.1.3 | Propriétés hydrauliques des dépôts meubles mesurés à l'aide du perméamètre de Guelph..... | 133 |
| 5.2 | Piézométrie et écoulement..... | 135 |
| 5.3 | Recharge..... | 139 |
| 5.3.1 | Débits de base mesurés et obtenus par séparation des hydrogrammes..... | 139 |
| 5.3.2 | Recharge par bassin versant simulée avec MOHYSE | 140 |
| 5.3.3 | Recharge spatialisée simulée par bilan hydrique spatialisé | 143 |
| 5.3.4 | Zones de recharge préférentielle et de résurgence | 145 |
| 5.4 | Bilan hydrique régional | 149 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.5 | Vulnérabilité des nappes..... | 151 |
| 5.6 | Géochimie de l'eau souterraine..... | 156 |
| 5.6.1 | Isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O)..... | 161 |
| 5.6.2 | Isotopes stables des nitrates (^{18}O et ^{15}N) | 162 |
| 5.6.3 | ^{222}R adon | 163 |
| 5.6.4 | Contextes hydrogéologiques régionaux | 165 |
| 6 | MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS..... | 171 |
| 6.1 | Objectifs de la modélisation hydrogéologique | 171 |
| 6.2 | Structure du modèle hydrogéologique..... | 171 |
| 6.3 | Calage du modèle | 173 |
| 6.4 | Résultats de la simulation de l'écoulement souterrain..... | 174 |
| 7 | RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE..... | 177 |
| 7.1 | Usage de la ressource..... | 177 |
| 7.2 | Qualité de la ressource | 187 |
| 7.3 | Densité des activités anthropiques..... | 193 |
| 7.4 | Gestion durable de la ressource | 199 |
| 7.4.1 | Principes de gestion durable | 199 |
| 7.4.2 | Indicateurs de quantité | 200 |
| 7.4.3 | Indicateurs de qualité..... | 201 |
| 8 | RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS..... | 203 |
| 8.1 | Recommandations..... | 203 |
| 8.1.1 | Recommandations en lien avec la ressource en eau | 203 |
| 8.1.2 | Recommandations sur la réalisation des travaux PACES..... | 204 |
| 8.2 | Conclusions scientifiques | 205 |
| 8.3 | Conclusion générale..... | 207 |
| | RÉFÉRENCES | 209 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----|
| Figure 1 Routes, limites municipales et toponymie..... | 21 |
| Figure 2 Topographie..... | 25 |
| Figure 3 Modèle numérique altimétrique | 27 |
| Figure 4 Pente du sol..... | 29 |
| Figure 5 Hydrographie | 33 |
| Figure 6 Limites des bassins versants..... | 35 |
| Figure 7 Pourcentage des différents types de peuplements forestiers..... | 37 |
| Figure 8 Couverture végétale - peuplements forestiers..... | 39 |
| Figure 9 Pourcentage des différents types de cultures..... | 41 |
| Figure 10 Couverture végétale – cultures..... | 43 |
| Figure 11 Pourcentage des différents types de milieux humides | 46 |
| Figure 12 Milieux humides | 47 |
| Figure 13 Pédologie..... | 51 |
| Figure 14 Réseau de suivi météorologique, hydrologique et piézométrique | 55 |
| Figure 15 Pourcentage des différents types d'occupation du sol | 61 |
| Figure 16 Occupation du sol..... | 63 |
| Figure 17 Pourcentage des différents types d'affectation du territoire..... | 65 |
| Figure 18 Affectation du territoire..... | 67 |
| Figure 19 Localisation de tous les travaux de caractérisation réalisés dans le projet PACES-Bécancour | 73 |
| Figure 20 Coupe sismique montrant les différentes structures des formations géologiques de la zone d'étude et localisation de la coupe (modifiée de Castonguay et al., 2006)..... | 91 |
| Figure 21 Géologie du roc | 93 |
| Figure 22 Géologie du Quaternaire | 99 |
| Figure 23 Épaisseur des dépôts meubles..... | 107 |
| Figure 24 Topographie du roc..... | 109 |
| Figure 25 Localisation des coupes stratigraphiques..... | 111 |
| Figure 26 Coupe stratigraphique A..... | 113 |
| Figure 27 Coupe stratigraphique B..... | 114 |
| Figure 28 Coupe stratigraphique C..... | 115 |
| Figure 29 Coupe stratigraphique D..... | 115 |
| Figure 30 Indice de confinement..... | 119 |
| Figure 31 Contextes hydrogéologiques | 123 |
| Figure 32 Distribution des conductivités hydrauliques estimées à partir de la capacité spécifique..... | 132 |
| Figure 33 Distribution des conductivités hydrauliques obtenues avec le perméamètre de Guelph. | 133 |
| Figure 34 Séries temporelles des niveaux piézométriques dans trois forages..... | 136 |
| Figure 35 Piézométrie de l'aquifère au roc | 137 |
| Figure 36 Débit en période d'étiage pour différents cours d'eau non instrumentés..... | 139 |
| Figure 37 Flux obtenus avec MOHYSE sur le bassin 024007 entre 1982 et 1992..... | 142 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figure 38 | Détail des flux calculés avec MOHYSE sur le bassin 024007 pour 1985 | 143 |
| Figure 39 | Saisonnalité de la recharge avec MOHYSE et avec le bilan hydrique spatialisé..... | 144 |
| Figure 40 | Zones préférentielles de recharge et de résurgence | 147 |
| Figure 41 | Bilan hydrique de la zone d'étude | 149 |
| Figure 42 | Évolution temporelle des flux moyens du bilan hydrique..... | 150 |
| Figure 43 | Superficie des classes de vulnérabilité DRASTIC au roc..... | 151 |
| Figure 44 | Indice DRASTIC de l'aquifère au roc..... | 153 |
| Figure 45 | Diagramme de Piper pour les groupes d'eau de l'aquifère au roc | 157 |
| Figure 46 | Relation Na^+/Cl^- dans les eaux souterraines au roc | 158 |
| Figure 47 | Types d'eau pour l'aquifère au roc | 159 |
| Figure 48 | Composition isotopique de l'eau dans la zone d'étude | 161 |
| Figure 49 | Isotopes des nitrates sur la zone d'étude | 163 |
| Figure 50 | Activités du ^{222}Rn pour l'aquifère fracturé, les aquifères granulaires et la rivière Bécancour en période d'étiage | 164 |
| Figure 51 | Schémas des contextes hydrogéologiques | 169 |
| Figure 52 | Conditions utilisées dans le modèle hydrogéologique..... | 172 |
| Figure 53 | Charges mesurées et simulées sur la zone d'étude et distribution des erreurs | 175 |
| Figure 54 | Approvisionnements municipaux..... | 181 |
| Figure 55 | Consommation d'eau par type d'utilisation | 183 |
| Figure 56 | Consommation d'eau par type de source | 185 |
| Figure 57 | Critères de qualité de l'eau potable | 189 |
| Figure 58 | Critères esthétiques..... | 191 |
| Figure 59 | Densité des activités anthropiques..... | 195 |
| Figure 60 | Densité des activités agricoles | 197 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 Équipe de réalisation du projet PACES-Bécancour | 16 |
| Tableau 2 Organismes ayant appuyé le projet PACES-Bécancour | 17 |
| Tableau 3 Superficies occupées en 2010 par les tourbières intactes, les tourbières avec perturbation limitée et les tourbières avec perturbation irréversible (Avard et al. 2013) | 50 |
| Tableau 4 Informations sur les stations hydrométriques | 53 |
| Tableau 5 Informations sur les stations météorologiques | 57 |
| Tableau 6 Informations sur les stations piézométriques | 58 |
| Tableau 7 Populations et superficies par municipalités et par MRC | 59 |
| Tableau 8 Source d'information disponible pour la réalisation du projet | 70 |
| Tableau 9 Résumé des travaux de caractérisation | 75 |
| Tableau 10 Détails de construction des forages | 77 |
| Tableau 11 Détails de construction des piézomètres dans les dépôts meubles et des sondages CPT et RPSS | 79 |
| Tableau 12 Paramètres chimiques analysés | 82 |
| Tableau 13 Synthèse des informations intégrées à la base de données | 85 |
| Tableau 14 Stratigraphie des unités géologiques | 89 |
| Tableau 15 Stratigraphie des dépôts meubles | 97 |
| Tableau 16 Épaisseurs, substrats et superficies des tourbières étudiées | 117 |
| Tableau 17 Synthèse des propriétés hydrauliques obtenues par essai de pompage et essais à charge variable | 128 |
| Tableau 18 Conductivités hydrauliques obtenues au moyen des essais avec obturateurs | 131 |
| Tableau 19 Conductivité hydraulique moyenne des groupes géologiques obtenus avec la méthode du débit spécifique | 132 |
| Tableau 20 Conductivité hydraulique moyenne des unités quaternaires | 134 |
| Tableau 21 Statistiques sur les débits de base fournis par le CEHQ | 140 |
| Tableau 23 Bilan hydrique simulé avec le modèle MOHYSE | 141 |
| Tableau 24 Indices DRASTIC de surface pour les piézomètres | 156 |
| Tableau 25 Conductivités hydrauliques calées | 174 |
| Tableau 26 Débits de base disponibles et simulés sur la zone d'étude | 175 |
| Tableau 27 Bilan hydrique régional simulé | 176 |
| Tableau 28 Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine | 178 |
| Tableau 29 Sommaire des dépassements de normes | 187 |
| Tableau 30 Sommaire des dépassements esthétiques | 188 |

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Protocole pour le calcul de la pente
- Annexe 2 : Avaré, K., M. Larocque et S. Pellerin. 2013. « Perturbations des tourbières de la région de Bécancour, Centre-du-Québec, entre 1966 et 2010 »
- Annexe 3 : Protocole pour la préparation du livrable pédologie
- Annexe 4 : Photos terrain
- Annexe 5 : Logs de forage et de piézomètres
- Annexe 6 : Protocole pour le prélèvement d'échantillons d'eau souterraine
- Annexe 7 : Pelletier, M. 2010. « Étude géophysique par résistivité 2D, bassin versant de la rivière Bécancour »
- Annexe 8 : Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles et de la topographie du roc
- Annexe 9 : Walter, J. 2012. « Campagne d'essais en forage d'injection à charge constante avec obturateurs gonflables »
- Annexe 10 : Godbout, P.M. 2012. « Validation empirique des conductivités hydrauliques obtenues à l'aide d'un perméamètre de Guelph sur les bassins versants de la zone Bécancour »
- Annexe 11 : Interpolation de la piézométrie
- Annexe 12 : Séries temporelles de niveaux piézométriques dans les forages instrumentés
- Annexe 13 : Détermination de la recharge distribuée par bilan hydrique
- Annexe 14 : Meyzonnat, G. et M. Larocque. 2011. « Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec) »
- Annexe 15 : Application de la méthode DRASTIC sur la zone Bécancour
- Annexe 16 : Ferlatte, M. 2011. « Quantification des flux d'eau souterraine dans la rivière Bécancour à partir des concentrations en ^{222}Rn , à l'aide du modèle Radin 14 »
- Annexe 17 : Protocole pour la préparation du livrable utilisation de l'eau
- Annexe 18 : Protocole pour la production des livrables qualité de l'eau et objectifs esthétiques
- Annexe 19 : Protocole pour le calcul pour l'indice de densité des activités anthropiques

* Les annexes sont présentées dans des documents distincts.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de réalisation du projet PACES-Bécancour et objectifs

Le *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour* financé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines (PACES) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) avait pour but d'établir la cartographie hydrogéologique de la portion de la Zone de gestion intégrée de l'eau Bécancour située dans la région du Centre-du-Québec. Ce projet a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal (UQAM), qui en a été le maître d'œuvre, et par un ensemble de partenaires régionaux. Le projet PACES-Bécancour a été réalisé au sein du Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES).

Ce rapport final résume les activités réalisées au cours des trois phases de réalisation du projet qui se sont déroulées du 1er avril 2009 au 31 mars 2013 : Phase I - Collecte des données existantes, Phase II - Travaux de terrain et Phase III - Synthèse et transfert.

Les objectifs généraux du projet étaient les suivants :

1. dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines sur la partie basse du bassin versant de la rivière Bécancour et de huit bassins versants connexes situés près du fleuve Saint-Laurent;
2. favoriser une saine gestion de la ressource en développant des partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire dans l'acquisition des connaissances sur la ressource en eaux souterraines.

Plus spécifiquement, le projet visait à :

1. comprendre la nature des formations aquifères;
2. connaître l'origine et les directions d'écoulement de l'eau souterraine;
3. décrire la qualité de l'eau souterraine;
4. quantifier le bilan hydrique de l'aquifère et les volumes d'eau exploitables de façon durable;
5. déterminer la vulnérabilité de l'eau souterraine aux activités humaines.

1.2 Équipe de réalisation et partenaires

1.2.1 *Équipe de réalisation*

Le **tableau 1** présente l'équipe de réalisation du projet PACES-Bécancour. Le projet a été coordonné par Marie Larocque, hydrogéologue et professeure au département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM. L'équipe de réalisation de l'UQAM était composée des agents de recherche Sylvain Gagné et Lysandre Tremblay, d'un étudiant de doctorat impliqué à temps partiel (Olivier Caron) et de trois étudiants de maîtrise. Ces derniers ont travaillé directement sur le projet alors qu'ils étaient inscrits à la maîtrise en sciences de la Terre de l'UQAM : Pierre-Marc Godbout (hydrostratigraphie), Guillaume Meyzonnat (vulnérabilité) et Karine Avard (milieux humides). Cinq étudiants de premier cycle se sont joints à l'équipe au cours des étés 2009, 2010 et 2011 (Diogo Barnetche, Kevin Chaumont Blonsky, El Moustapha Choabi, Olivier Ferland, Miryane Ferlatte, Frédérique Lemay-Borduas et Mireille Pelletier du B.Sc. en sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM, Patrick Turgeon du D.E.C. en Géologie appliquée du cégep de Thetford et Syndia Fernandes stagiaire française de l'Université Paris IX). Des étudiants de maîtrise ont également réalisé des mini-projets de recherche sur des questions spécifiques liées au projet (Miryane Ferlatte et Pierre-Marc Godbout). Des chercheurs de l'UQAM ont également été impliqués dans le projet en tant que collaborateurs (Michel Lamothe, Daniele Pinti et Michelle Garneau). Le projet a bénéficié de la mise en commun des expertises, des ressources techniques et des protocoles des membres du GRIES.

Tableau 1 Équipe de réalisation du projet PACES-Bécancour

| Noms | Rôle |
|--|--|
| Marie Larocque | Coordonnatrice du projet; professeure UQAM |
| Michel Lamothe | Responsable du volet Géologie; professeur UQAM |
| Stéphanie Pellerin | Collaboratrice milieux humides; chercheuse IRBV |
| Lysandre Tremblay | Volet Hydrogéologie; agent de recherche UQAM |
| Sylvain Gagné | Volet Hydrogéologie; agent de recherche UQAM |
| Olivier Caron | Cartographie des dépôts meubles; étudiant PhD UQAM |
| Pierre-Marc Godbout Karine Avard Guillaume Meyzonnat | Cartographie des dépôts meubles (PMG), rôle des milieux humides (KA) et vulnérabilité des eaux souterraines (GM); étudiants à la maîtrise en sciences de la Terre de l'UQAM |
| Diogo Barnetche, El Mustapha Choabi, Kevin Chaumont Blonsky, Olivier Ferland, Miryane Ferlatte, Pierre-Marc Godbout, Frédérique Lemay-Borduas, Mireille Pelletier, Patrick Turgeon et Syndia Fernandes | Support aux activités de terrain et d'analyse des résultats, étudiants de BSc en Géologie (UQAM), au DEC en Géologie appliquée (cégep Thetford), au Master (Université Paris XI) et à la MSc en sciences de la Terre de l'UQAM |

1.2.2 Partenaires

Les partenaires du projet PACES-Bécancour sont l'organisme de bassin versant (OBV) GROBEC, l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec (AGTCQ), le cégep de Thetford, la Conférence régionale des élus (CRÉ) du Centre-du-Québec (qui couvre presque tout le territoire étudié) ainsi que les Municipalités régionales de comté (MRC) d'Arthabaska, de Bécancour, de l'Érable et de Nicolet-Yamaska. Une partie de la MRC de Lotbinière est incluse dans le territoire visé, mais sa participation financière n'a pas été sollicitée en raison de la petite superficie intégrée dans le territoire à l'étude. Les partenaires ont contribué en argent et/ou en nature à la réalisation du projet (**Tableau 2**). Le comité de suivi du projet, formé d'un représentant de chaque partenaire, avait pour mandat d'assurer le lien entre la région et l'équipe de réalisation du projet. Le comité de suivi s'est rencontré à neuf reprises entre le 1er avril 2009 et le 31 mars 2013 (22 avril 2009, 1er juin 2009, 10 novembre 2009, 19 février 2010, 10 novembre 2010, 6 avril 2011 et le 22 novembre 2011, 24 février 2012, 29 janvier 2013).

Deux journées d'atelier de formation sur les notions de base sur les eaux souterraines et les livrables du PACES-Bécancour ont été organisées les 12 et 13 juin 2012 au Manoir du Lac William. Vingt-neuf personnes provenant du MDDEFP, des MRC, des municipalités, des OBV et du cégep de Thetford ont participé à ces ateliers.

Une journée de transfert de connaissances aura lieu le 14 mai 2013 au Manoir du Lac William dans le but de présenter l'ensemble des résultats à tous les partenaires. Des rencontres de transfert sont également prévues à la CRÉ Centre-du-Québec, à l'OBV GROBEC et dans différentes MRC au cours des prochains mois.

Tableau 2 Organismes ayant appuyé le projet PACES-Bécancour

| Organisme | Participant au comité de suivi | Contribution |
|------------------------|--|-----------------------------------|
| CRÉ Centre-du-Québec | Michel Côté (anciennement Carl Lacharité) | Argent et nature (temps-personne) |
| MRC d'Arthabaska | Pascale Désilet | Argent et nature (temps-personne) |
| MRC de Bécancour | Stéphane Laroche | Argent et nature (temps-personne) |
| MRC de l'Érable | Carl Plante | Argent et nature (temps-personne) |
| MRC de Nicolet-Yamaska | Jean-François Albert | Argent et nature (temps-personne) |
| GROBEC | Simon Lemieux, dir. général | Nature (temps-personne) |
| AGTCQ | Olga Dupont, coordonnatrice | Nature (temps-personne) |
| Cégep Thetford | Elise Moreau | Nature (prêt d'équipement) |

1.3 Organisation du rapport

Ce rapport présente tous les résultats obtenus au cours du projet PACES-Bécancour. Afin de décrire chacune des phases du projet et tous les résultats obtenus, le rapport est divisé en huit chapitres. Le chapitre 2 décrit la zone d'étude et le milieu naturel. Le chapitre 3 résume l'acquisition des données et les travaux de caractérisation. Les contextes géologiques et hydrogéologiques régionaux font l'objet du chapitre 4. Le chapitre 5 s'attarde aux conditions hydrogéologiques sur la zone d'étude. Le chapitre 6 décrit les travaux de modélisation des écoulements souterrains réalisés sur la zone d'étude. L'état de la ressource en eau souterraine dans la région est présenté au chapitre 7. Les conclusions et recommandations pouvant être apportées à la lumière des travaux effectués au courant des quatre dernières années font l'objet du chapitre 8.

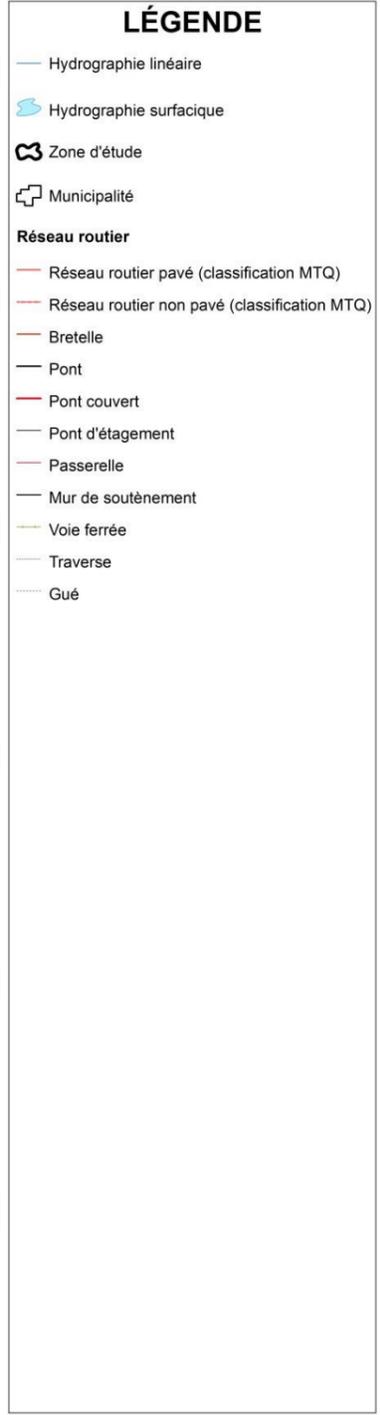
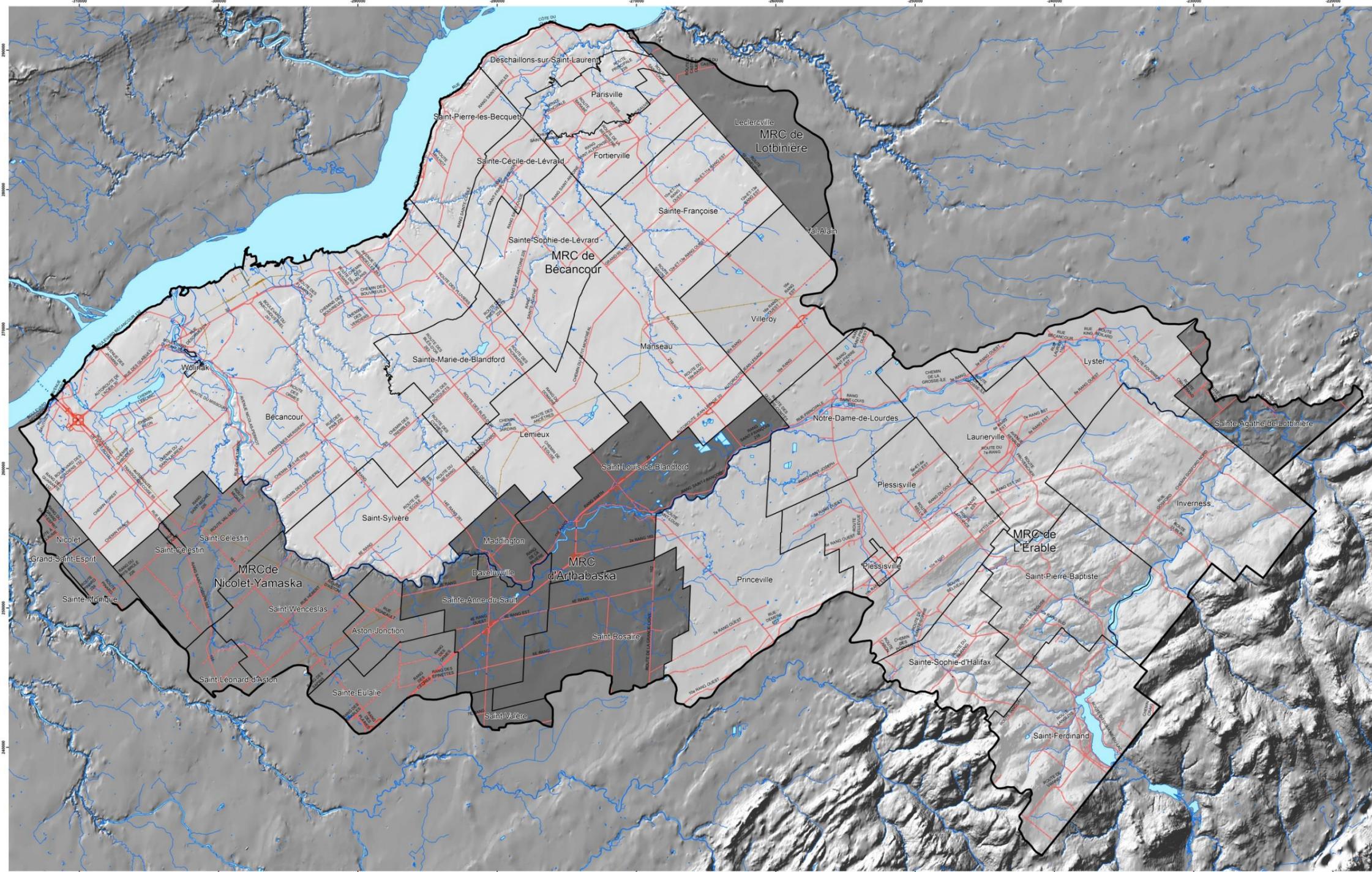
2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

2.1 Localisation

Le territoire visé couvre la partie basse du bassin versant de la rivière Bécancour (partie située dans la région Centre-du-Québec) ainsi que huit bassins versants connexes situés près du fleuve Saint-Laurent, i.e. ceux des rivières Marguerite, Godefroy, Gentilly, de la Ferme, du Moulin, aux Glaises, des Orignaux ainsi que le bassin de la Petite rivière du Chêne. L'inclusion de ces bassins versants connexes est naturelle puisqu'elle assure la continuité hydraulique des écoulements souterrains de l'amont vers l'aval. Ce territoire correspond à la partie basse de la Zone de gestion intégrée de l'eau du bassin de la rivière Bécancour. Le territoire visé couvre une superficie de 2859 km² (**Figure 1**) et se situe au sud du fleuve Saint-Laurent.

Ce vaste bassin, à vocation principalement agricole et forestière, touche le territoire des MRC d'Arthabaska, de Bécancour, de l'Érable, de Nicolet-Yamaska et de Lotbinière. Les quatre premières MRC font partie de la région administrative Centre-du-Québec. La population du secteur d'étude est estimée à environ 50 000 habitants. La MRC de Lotbinière ne contribue pas financièrement au projet en raison de la petite superficie qu'elle touche dans le territoire visé (parties nord et nord-est du bassin versant de la rivière Bécancour et du bassin versant de la Petite rivière du Chêne) et de la très petite population qui habite dans ces zones (400 habitants). Le territoire correspondant à la MRC de l'Amiante (CRÉ Chaudière-Appalaches), situé dans la partie haute du bassin versant de la rivière Bécancour, n'est pas inclus dans le territoire visé, cette MRC ayant choisi de ne pas s'impliquer dans le projet.

La zone d'étude est répartie sur les feuillets cartographiques 21L12, 21L06, 21L05, 21L04, 21L03, 31I09, 31I08, 31I07, 31I02 et 31I01. Elle est parcourue par les autoroutes Jean-Lesage (20), de l'Acier (30) et de l'Énergie (55) et par plusieurs routes nationales (116, 132, 155, 161, 162 et 165) et régionales (226, 261 et 265) (**Figure 1**). La section de l'autoroute 55 rejoignant l'autoroute 20 en traversant Saint-Célestin, Saint-Wenceslas et Sainte-Eulalie a été parachevée à l'été 2006. Le territoire d'étude touche en totalité ou en partie à 41 municipalités : six dans la MRC d'Arthabaska, 12 dans la MRC de Bécancour, 11 dans la MRC de l'Érable, huit dans la MRC de Nicolet-Yamaska, trois dans la MRC de Lotbinière et une réserve indienne hors MRC. Les principales villes sont Bécancour, Plessisville et Princeville.



MÉTADONNÉES
Section 2.1 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 1 Routes, limites municipales et toponymie

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BDAT 100K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Limites municipales: MAMROT
Réseau routier: BNDT 250K (hors zone d'étude)

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que obtenues à l'aide des données disponibles. Le portail régional en données géométriques ne s'engage pas à garantir l'exactitude de la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut être utilisée pour des fins de planification ou de prise de décision sans consultation préalable. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Mézonnat, G. 2013, *Projet de réaménagement des eaux souterraines de Bécancour* venant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

2.2 Milieu naturel

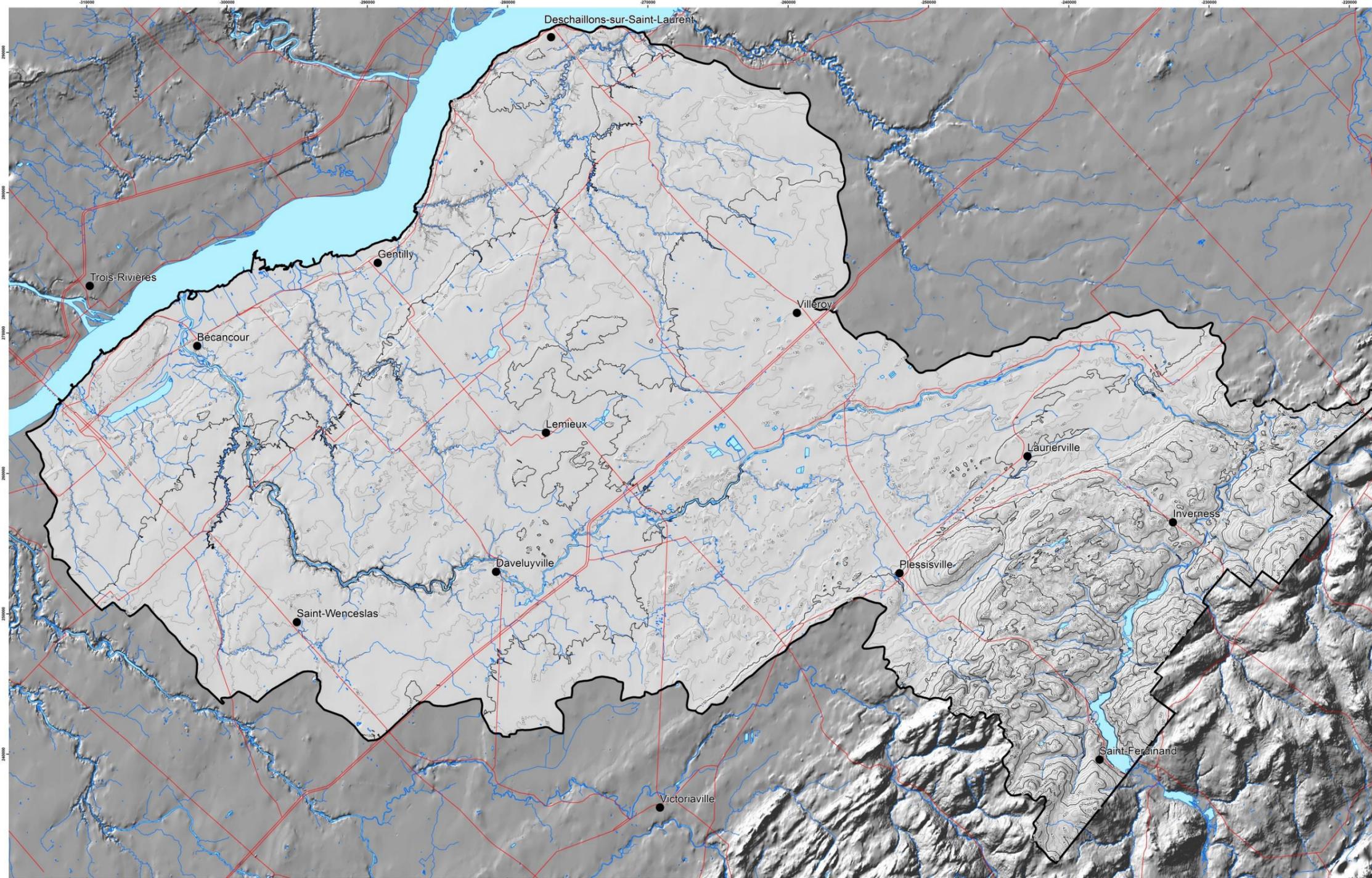
2.2.1 *Topographie et modèle numérique altimétrique*

La représentation de la topographie a été rendue possible avec le modèle numérique altimétrique (MNA) fourni par la Division du patrimoine écologique et des parcs (DPEP) (**Figure 2 et 3**). Le modèle fournit une valeur d'élévation avec une précision au 5 m près pour chaque maille de 10 m x 10 m. Un modèle numérique de surface (MNS) a été fourni par l'AGTCQ. Ce modèle a été construit par photogrammétrie à partir d'orthophotos aériennes provenant d'un survol réalisé en 2007. Les mailles du MNS sont de 1 m x 1 m et la précision verticale du modèle est inférieure à 1 m. Une nouvelle série d'orthophotos aériennes a été produite au cours de l'été 2010 afin de compléter le modèle et d'en améliorer la précision verticale. Ces données ont été utilisées de manière ponctuelle dans le projet, afin de préciser les altitudes dans des régions précises (e.g. tourbières).

L'altitude varie de quelques mètres au fleuve Saint-Laurent à environ 150 m au piémont des Appalaches (Plessisville, Laurierville, Sainte-Agathe-de-Lotbinière). Dans la portion de la zone d'étude située dans les Appalaches, l'altitude varie d'environ 150 m à plus de 500 m à l'extrémité sud-est du territoire.

2.2.2 *Pente du sol*

La pente du sol a été calculée à l'aide du protocole présenté à l'**Annexe 1**. Sur la zone d'étude, la pente varie de 0 à 63° et est en moyenne de 1° (**Figure 4**). La pente est faible dans toute la portion aval de la zone d'étude. Dans ce, les pentes sont plus élevées aux endroits où la rivière Bécancour est encaissée dans les dépôts meubles et atteignent la valeur maximale de 63°. Les pentes sont également élevées aux abords de la rivière Bécancour, entre les villes de Daveluyville et de Bécancour. Mis à part ces secteurs, les pentes dans la portion aval de la zone d'étude se situent entre 0° et 2°. La portion amont présente une plus grande diversité de pentes, représentant un relief plus accidenté.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ☒ Zone d'étude

Courbes de niveau [équidistance 20 m]

- Courbe de niveau intermédiaire
- Courbe de niveau maîtresse



MÉTADONNÉES
Section 2.2.1 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

**Figure 2 Topographie
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC**

Échelle 1/100 000
0 2 4 6 8 Kilomètres
Projeté cartographique conforme au Lambert de Québec
Déterminé par SRTM
Système de référence géographique NAD 83

SOURCES / RÉALISATION

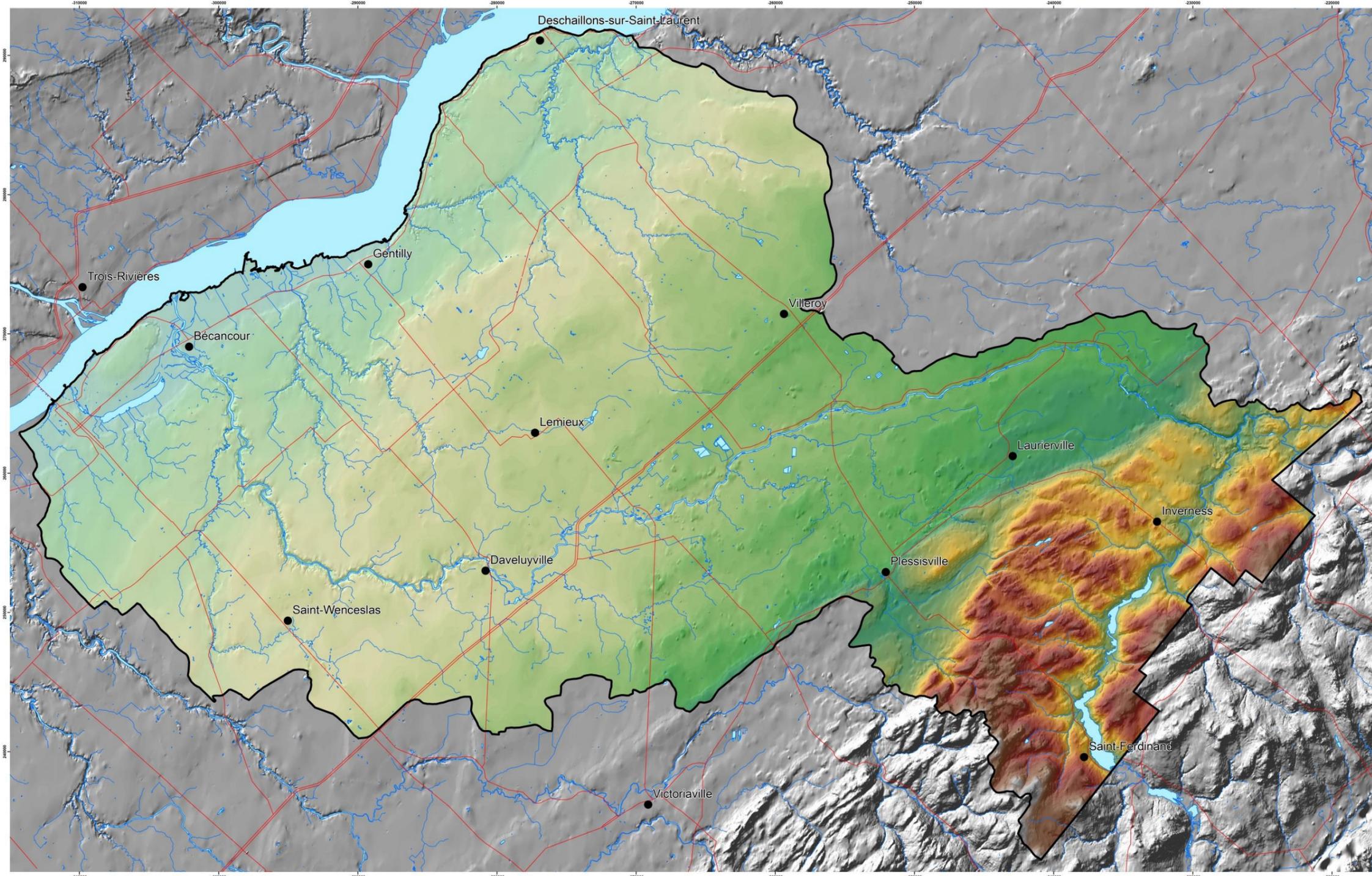
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Courbes niveaux: MRN 20K

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portail régional en descendant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et offrir aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assume aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Mézourim, G. 2013.
Projet de réaménagement des eaux souterraines de la zone
venant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Élévation (m)

Maximum : 591

Minimum : 7



MÉTADONNÉES

Section 2.2.1 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 3 Modèle numérique altimétrique
ZONE BÉCANCOUR



SOURCES / RÉALISATION

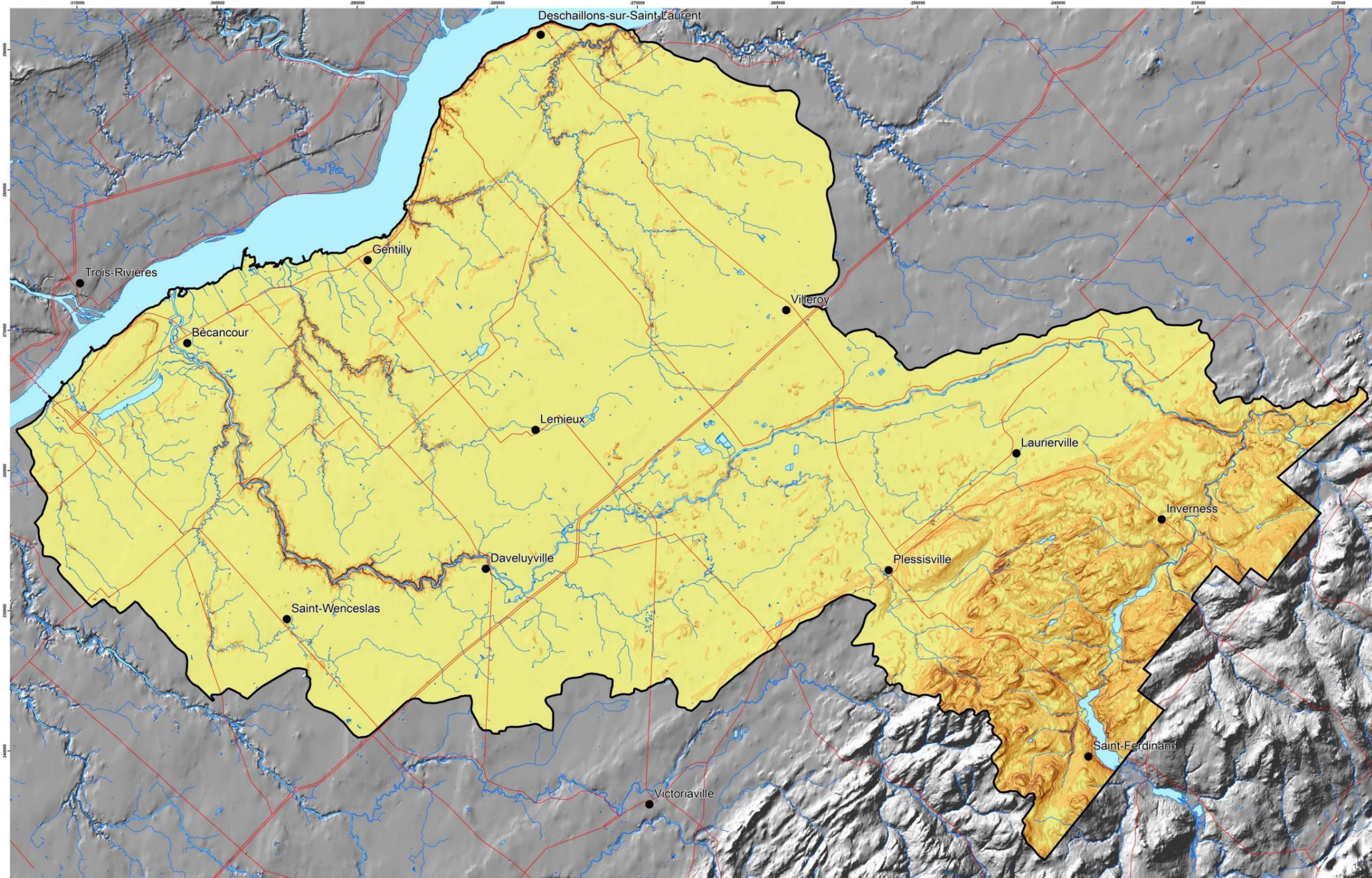
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Modèle numérique de terrain: MRN 20K

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'état des données disponibles. Le portail régional ne garantit pas la précision des données ni leur exactitude. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Mézeau, G. 2013.
Projet de cartographie des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude

Pente du sol (°)

- 0 - 2
- 3 - 5
- 6 - 11
- 12 - 20
- 21 - 63

**Figure 4 Pente du sol
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC**



MÉTADONNÉES
Protocole livrable 4
Section 2.2.2 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Réalisation:
Université du Québec à Montréal

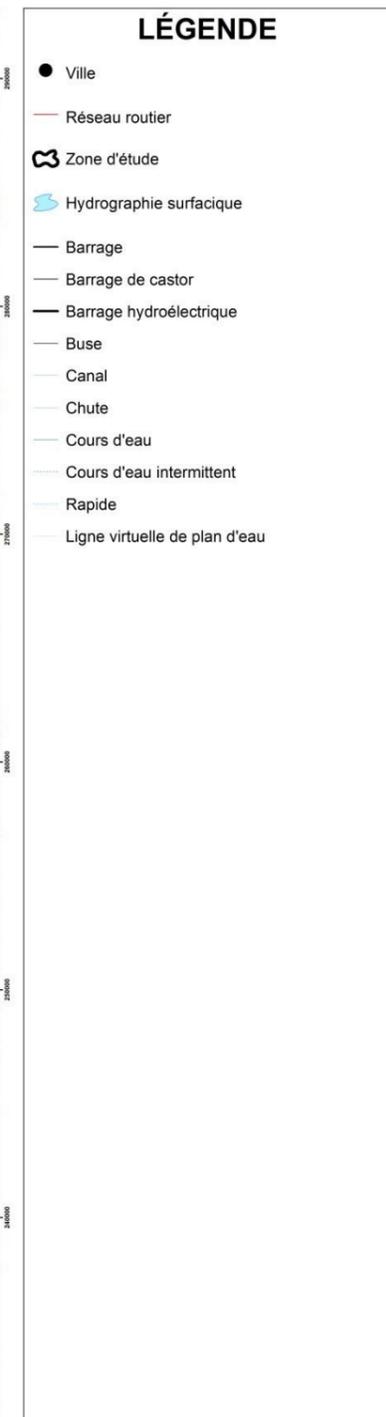
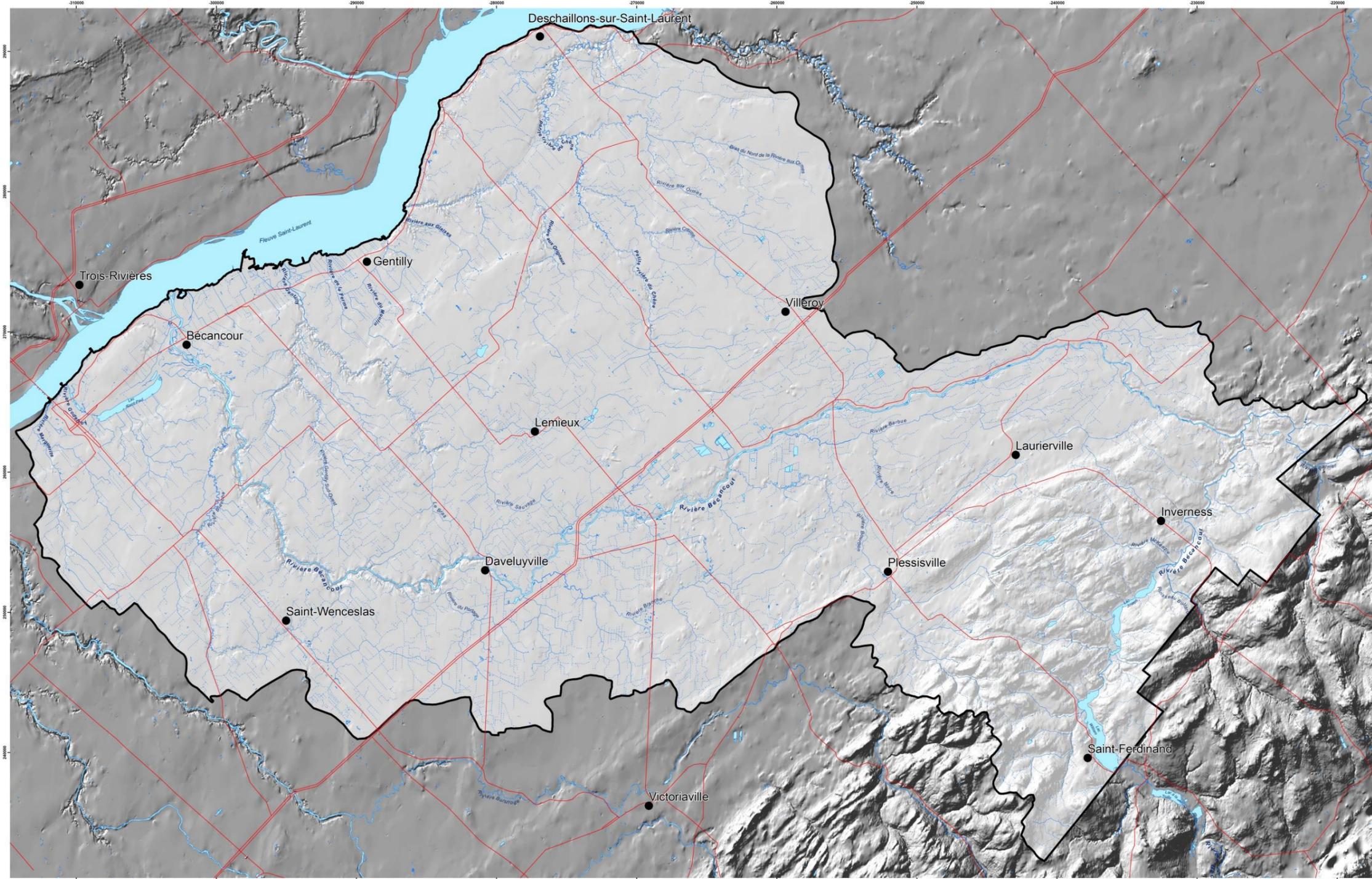


Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions locales et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'origine ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adéquation à une fin particulière, de toute donnée extraite de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Mérouzet, G. 2013, Projet de cartographie des zones hydrologiques de base versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

2.2.3 Hydrographie et limites des bassins

Le bassin versant de la rivière Bécancour occupe toute la partie sud et est de la zone d'étude (1607 km²). Il s'étend au-delà de la zone d'étude, dans la MRC de l'Amiante où la rivière Bécancour prend sa source. Les principaux affluents de la rivière Bécancour dans la zone d'étude sont les deux rivières Blanche (145 et 182 km²), la Bourbon (148 km²) et la Noire (197 km²). Le ruisseau Bullard et la rivière Palmer sont partiellement inclus dans la zone d'étude tandis que le bassin versant de la rivière au Pin est complètement en amont et extérieur à la zone d'étude. La partie ouest de la zone d'étude est caractérisée par la présence de plusieurs petits bassins adjacents au fleuve Saint-Laurent et de superficies variables. Les plus importants, du nord au sud, sont les bassins des rivières Petite du Chêne (458 km²), aux Orignaux (141 km²), aux Glaises (23 km²), du Moulin (38 km²), de la Ferme (16 km²), Gentilly (319 km²), Godefroy (78 km²) et Marguerite (75 km²). Tous ces cours d'eau sont des affluents du fleuve Saint-Laurent. Plus de 56% de la zone d'étude est occupée par le bassin versant de la rivière Bécancour. Les autres bassins d'importance sont dans l'ordre ceux des rivières Petite du Chêne (16%), Gentilly (11%) et aux Orignaux (5%) (**Figures 5 et 6**).

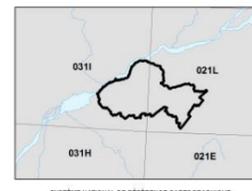
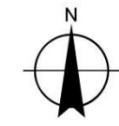


MÉTADONNÉES
Section 2.2.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 5 Hydrographie
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC

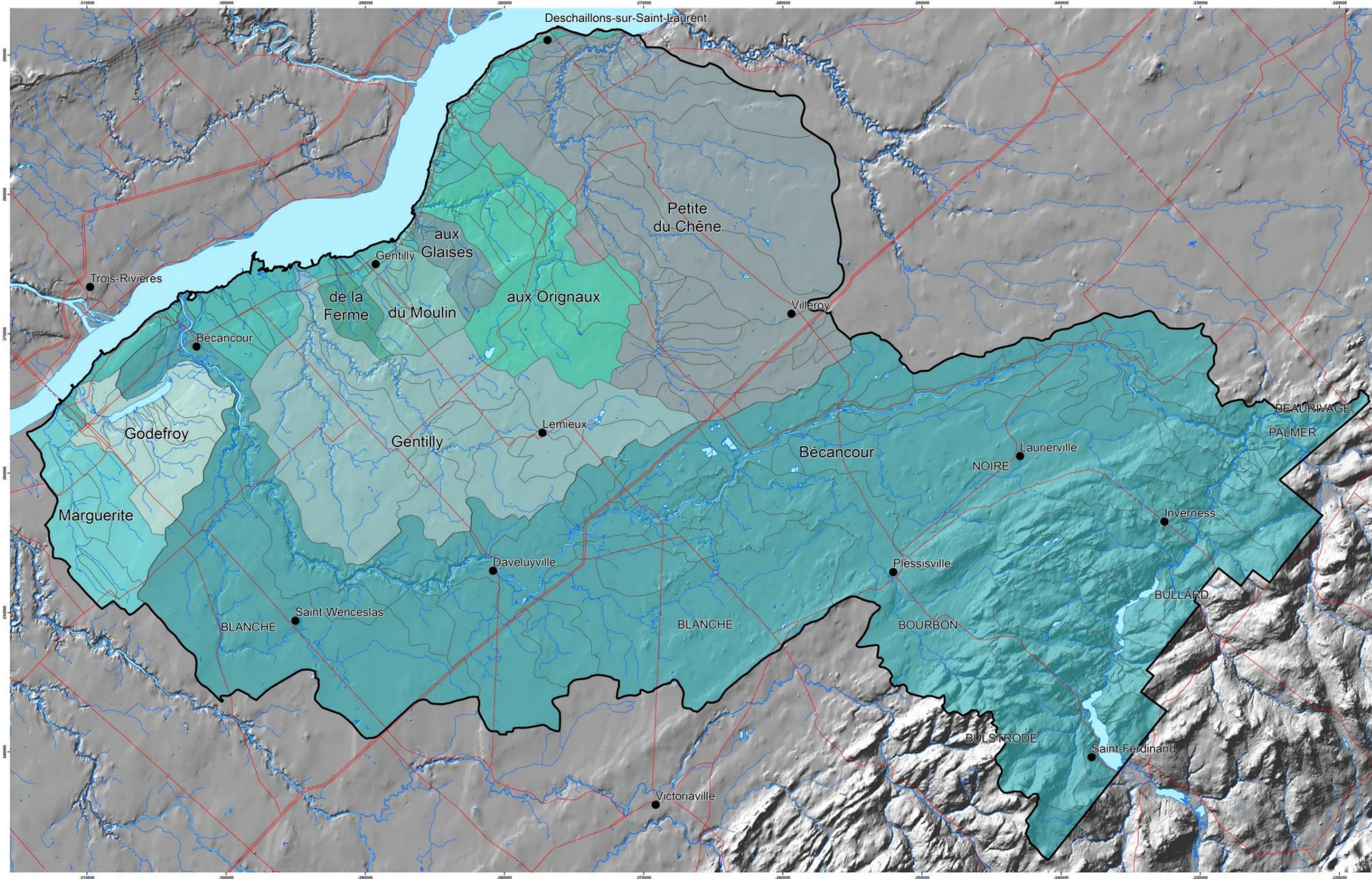


SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MNE 20K
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliés ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'exactitude à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Métronnet, G. 2013, *Projet de cartographie des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final*, Rapport présenté au MDDEFP.



LÉGENDE

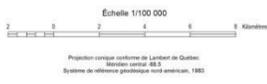
- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude
- Limite des bassins versants de niveau 1
- Limite des bassins versants de niveau 2



MÉTADONNÉES
Section 2.2.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 6 Limites des bassins versants

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Bassins versants: DPEP 20K
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que dérivées à l'aide des données disponibles. Le portail régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliation ne donnent aucune garantie quant à la validité, ou quant à l'adéquation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et s'assurent aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Mégonnet, G. 2013, Projet de cartographie des bassins versants du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

2.2.4 Couverture végétale

Deux sources d'informations complémentaires ont été utilisées pour décrire la couverture végétale sur la zone d'étude, soit la couverture forestière et les types de cultures. La carte de couverture forestière (**Figure 8**) a été créée à partir des cartes du 4^e programme d'inventaire du Système d'information écoforestière (SIEF) du Ministère des Ressources naturelles (MRN). Ces données ont été fournies par l'AGTCQ et par la MRC de Lotbinière. Selon les données du SIEF, la forêt couvre une superficie de 1807,9 km² ce qui représente 63,2% de la zone d'étude. Les zones forestières couvrent toute la zone d'étude, mais sont en plus faible concentration dans la partie longeant le fleuve complètement en aval de la zone d'étude et dans le sud-ouest de la zone d'étude autour de Saint-Wenceslas. Le territoire forestier est composé principalement de forêt mélangée (62,1%). Les peuplements de résineux et les feuillus occupent respectivement 16,8 et 21,1% de la zone d'étude (**Figure 7**). Les trois types de peuplement sont distribués à peu près également sur l'ensemble de la zone d'étude.

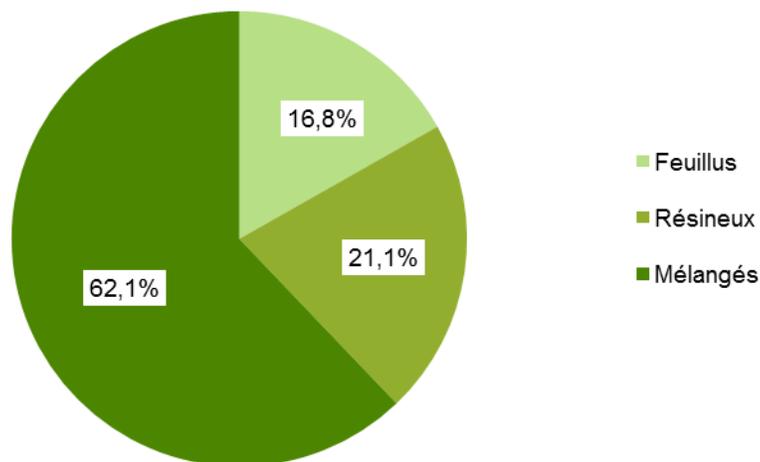
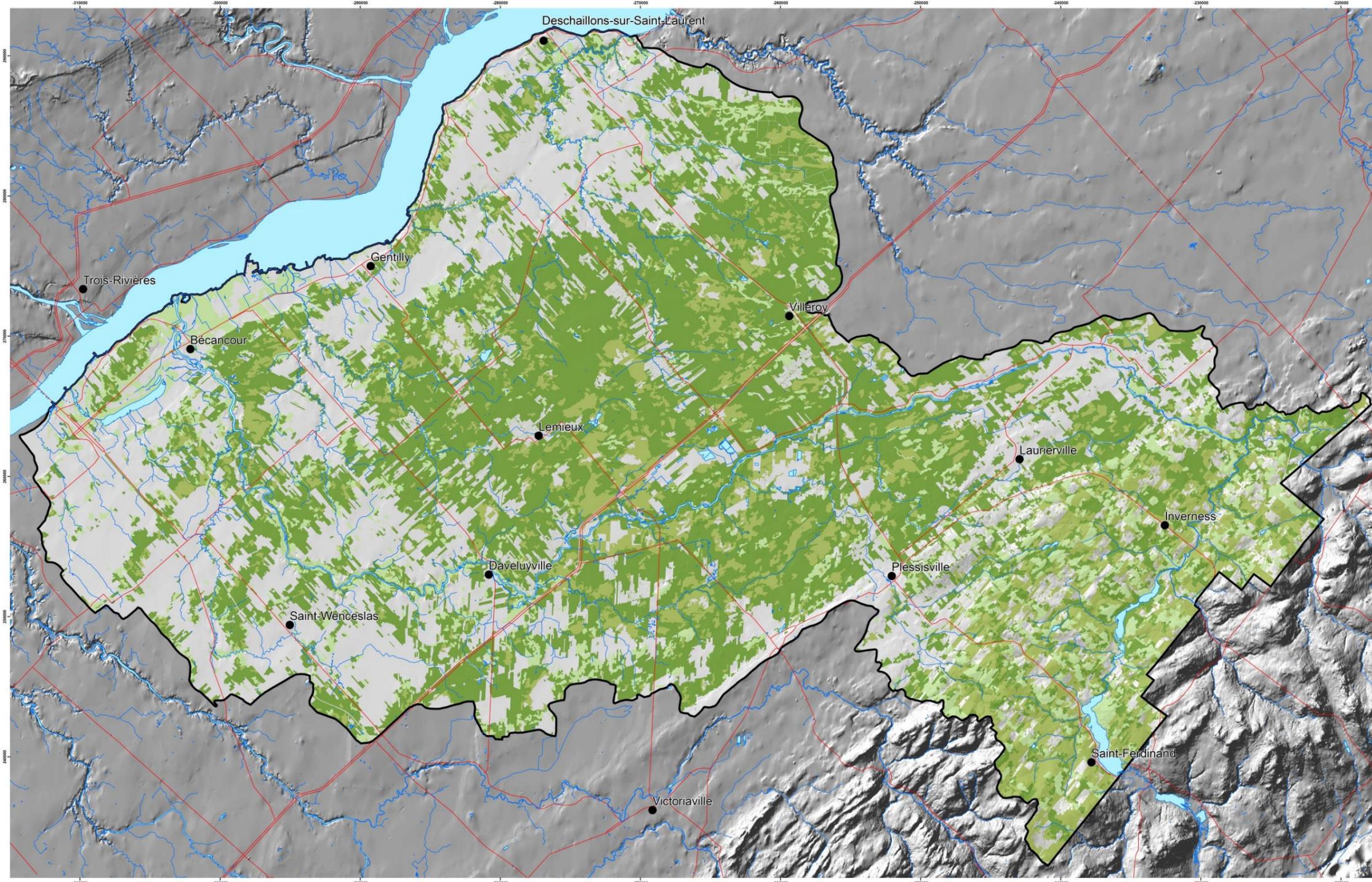


Figure 7 Pourcentage des différents types de peuplements forestiers



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrologie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Type de peuplement

- Feuillus (plus de 75% de la surface)
- Résineux (plus de 75% de la surface)
- Mélangés (de 26% à 75% de résineux)



MÉTADONNÉES
Section 2.2.4 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 8 Couverture végétale - peuplements forestiers

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: ombre MRN 20K
Couverture végétale: SIEF

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'actualité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliation ne donnent aucune garantie, à l'écrit ou à l'oral, quant à l'exactitude ou à l'actualité de toute donnée dérivée de cette carte, ni assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Mégonnet, G. 2013. Projet de cartographie des zones forestières du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

La carte des types de cultures (**Figure 10**) a été générée à partir de données de la Banque de données des cultures généralisée (BDCG, 2009). Cette base de données ne comprend pas d'information sur la culture de la canneberge. Une analyse par photo-interprétation à partir de photos aériennes à haute résolution a été réalisée par l'UQAM en 2013 afin de localiser et de quantifier la superficie du territoire couverte par la culture de la canneberge puisque celle-ci est importante pour la région.

L'agriculture couvre une superficie de 809,1 km² ce qui représente 28,3% de la zone d'étude. Les types de cultures rencontrées sont les céréales (48,4%), le foin (31,9%) et la canneberge (3,8%). Les cultures mixtes (0,6%), les cultures maraîchères (0,5%) et les cultures de petits fruits (0,03%) occupent une petite portion des zones cultivées (**Figure 9**). Les terres cultivées sont principalement localisées dans les parties aval de la zone d'étude là où les dépôts argileux sont les plus importants en surface. La culture de la canneberge se retrouve principalement dans la partie centrale de la zone d'étude sur les sédiments d'origine éolienne et les alluvions de la rivière Bécancour. La partie amont est principalement dédiée à la culture fourragère, mais la culture céréalière y est aussi présente.

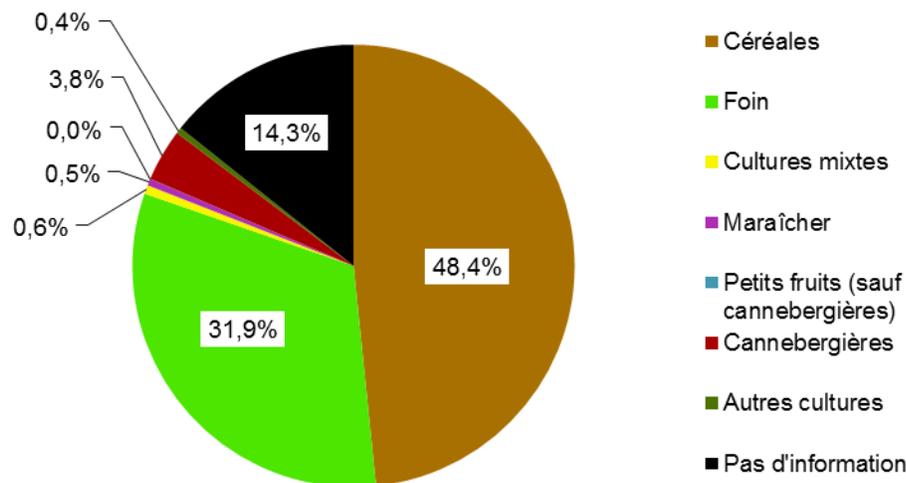
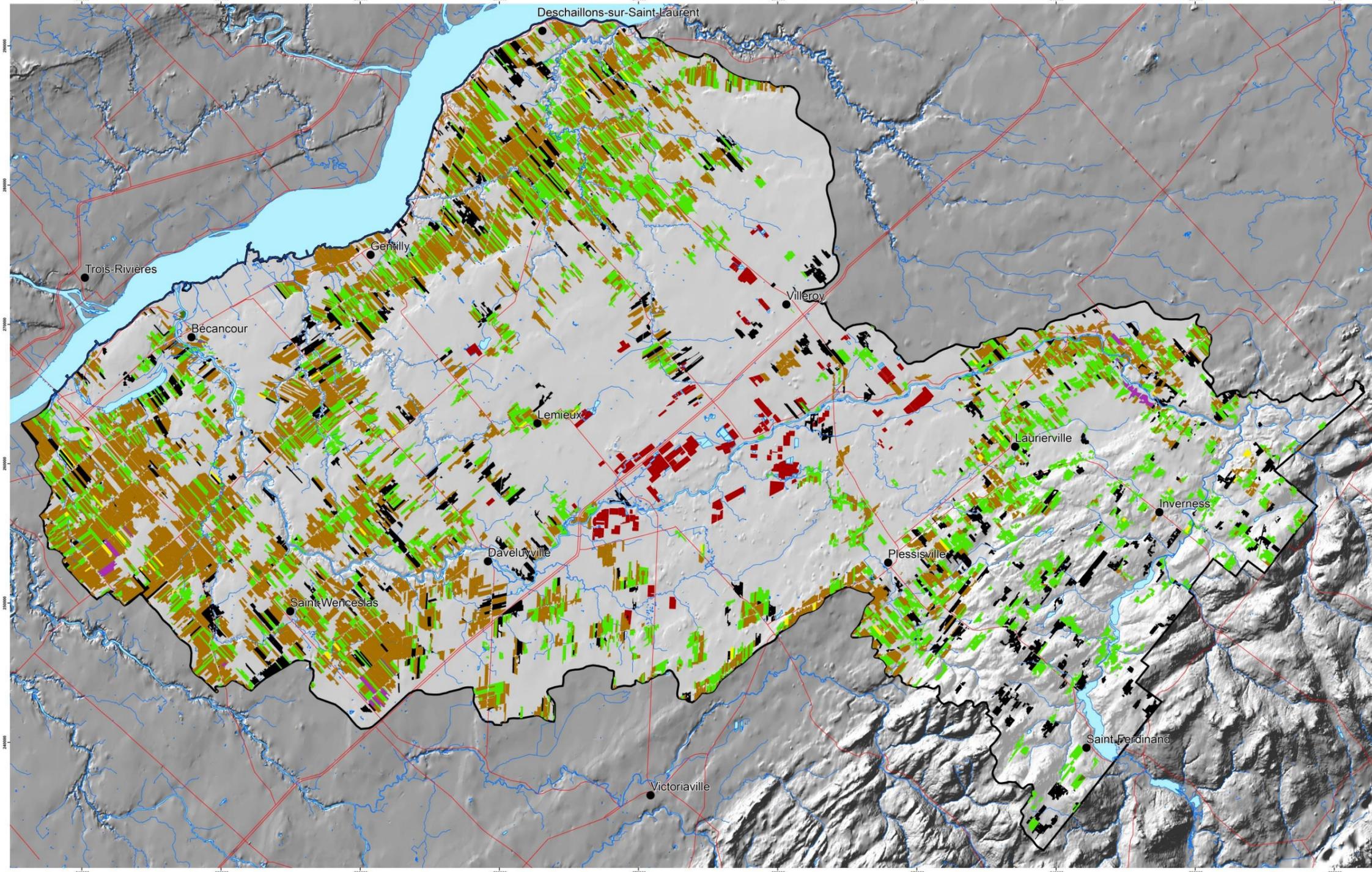


Figure 9 Pourcentage des différents types de cultures



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude

Type de culture

- Céréales
- Foin
- Cultures mixtes
- Maraîcher
- Petits fruits
- Cannebergières
- Autres cultures
- Pas d'information

Figure 10 Couverture végétale - cultures

ZONE BÉCANCOUR

QUÉBEC



MÉTADONNÉES
Section 2.2.4 du Rapport d'Étape Phase 3
(Larocque et al., 2013)

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Type de culture: BDCG, Financière agricole
Cannebergières: UQAM

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portail régional en découvrant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les données requises pour définir les conditions locales à l'échelle locale et à l'échelle de planification des données de base. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des données présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Meyroun, G. 2013, *Projet de cartographie des zones pastorales de base* venant de la région Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

2.2.5 Milieux humides

Types de milieux humides

L'inventaire le plus récent des milieux humides est le fruit d'un travail conjoint entre Canards Illimités Canada (CIC) et le MDDEFP qui a été complété au printemps 2012 (**Figure 12**). Cet inventaire a été réalisé à partir d'un travail de photo-interprétation d'imagerie aérienne numérique (2006 et 2010) et d'une campagne de validation de terrain (printemps 2010). Selon ces données, les milieux humides occupent une superficie de 486,0 km², soit l'équivalent de 17,0% de la superficie totale de la zone d'étude. Il est important de noter ici que la somme des surfaces occupées par la forêt, l'agriculture et les milieux humides excède la superficie totale de la zone d'étude (2859 km²). Ceci s'explique par les différentes sources d'information utilisées. Par exemple, il est possible que certaines surfaces boisées soient comptabilisées à la fois dans les surfaces forestières et dans celles occupées par les milieux humides.

L'inventaire catégorise les milieux humides en cinq grandes classes conformément au système de classification des terres humides du Canada (GTNTH, 1997) : eaux peu profondes, marais, marécages, tourbières ombrotrophes ou bogs et tourbières minérotrophes ou fens (**Figure 11**). Puisqu'elles étaient suffisamment distinctes pour être identifiées par photo-interprétation, deux sous-classes, les prairies humides (sous-classe de marais) et les tourbières boisées (sous-classe des tourbières minérotrophes), ont été ajoutées à l'inventaire (Beaulieu et al., 2012).

Les marécages, qui composent 35,6% des milieux humides sur la zone d'étude, se retrouvent du bord du fleuve Saint-Laurent jusqu'au piémont appalachien. Les plus grandes zones continues de marécages se retrouvent sur le long de la Bécancour, autour du lac Saint-Paul et au pourtour des tourbières de Mer Bleue et de Francoeur à Villeroy. Les tourbières boisées représentent en superficie près de la moitié (49,4%) des milieux humides de la zone d'étude. Elles sont concentrées sur une zone qui s'étend des Basses-Terres du Saint-Laurent près de la municipalité de Sainte-Marie-de-Blandford, jusqu'au piémont appalachien. La plus grande tourbière boisée, le Plé-de-Plessis, située juste au nord de Plessisville s'étend sur 9,1 km². Les tourbières ombrotrophes représentent 9,5% de l'ensemble des milieux humides. La répartition des tourbières ombrotrophes sur la zone d'étude est similaire à celle des tourbières arborées soit du piémont appalachien jusqu'à la municipalité Sainte-Marie-de-Blandford. Les tourbières ombrotrophes les plus importantes en superficie sur la zone d'étude sont celles du Lac Rose, de Defoy, de Saint-Louis-de-Blandford, de Sainte-Anastasie et de Villeroy. Les tourbières minérotrophes couvrent 3,1% de l'ensemble des milieux humides de la zone d'étude. Ces tourbières se retrouvent souvent en périphérie des tourbières ombrotrophes (par exemple au Lac Rose ou au Plé-de-Plessis), ou en périphérie du lac Saint-Paul sur la réserve écologique Léon-Provancher.

Sur la zone d'étude, les milieux humides caractérisés comme "eau peu profonde" occupent 0,8% du territoire. Ces milieux humides sont répartis partout sur la zone d'étude, des rives du lac Saint-Joseph à l'embouchure de la rivière Bécancour et ont généralement de petites superficies de quelques hectares seulement. Les marais sont distribués également sur toute la zone d'étude et représentent 0,6% des milieux humides. Le marais le plus important ceinture le lac Saint-Paul. Les prairies humides sont également distribuées partout sur la zone d'étude et représentent 1,1% des milieux humides. Quoiqu'elles occupent souvent moins de 1 ha, des prairies humides de plus grande superficie sont répertoriées à Bécancour près de la route 132 (17 ha) et à Princeville (12 ha).

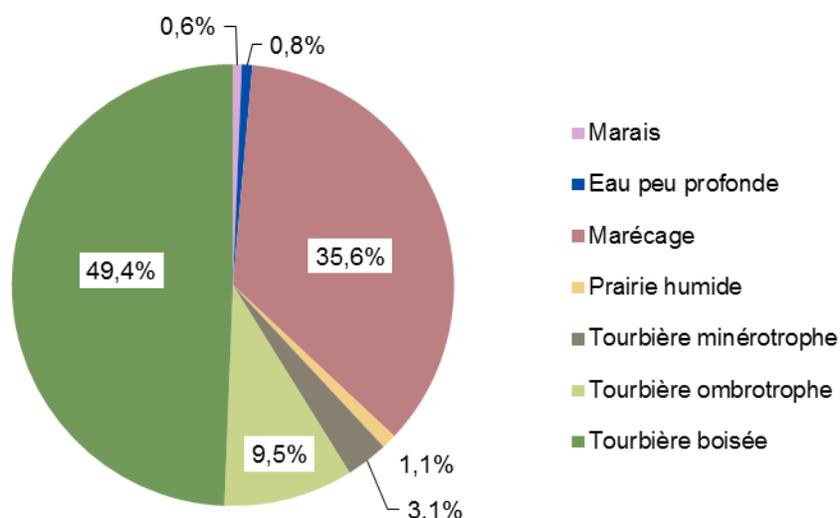
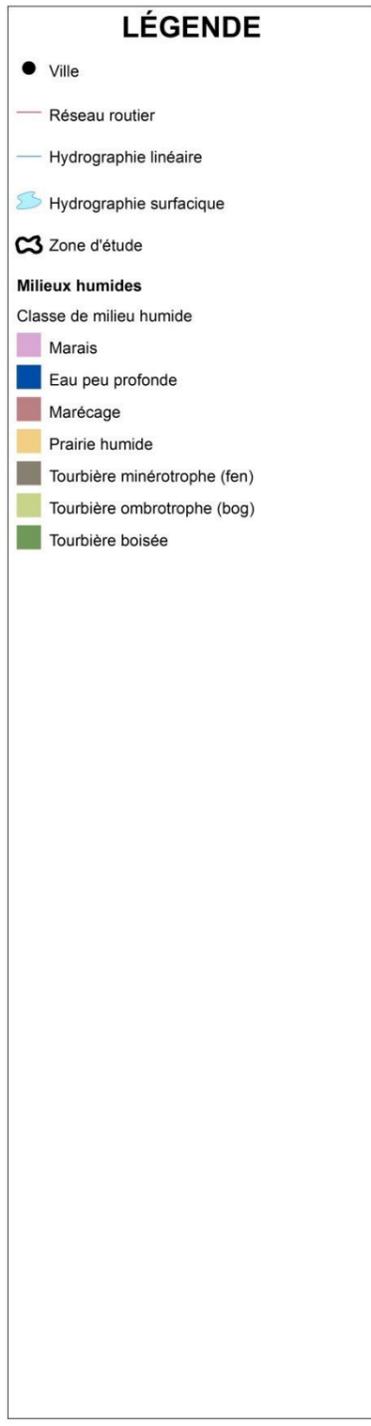
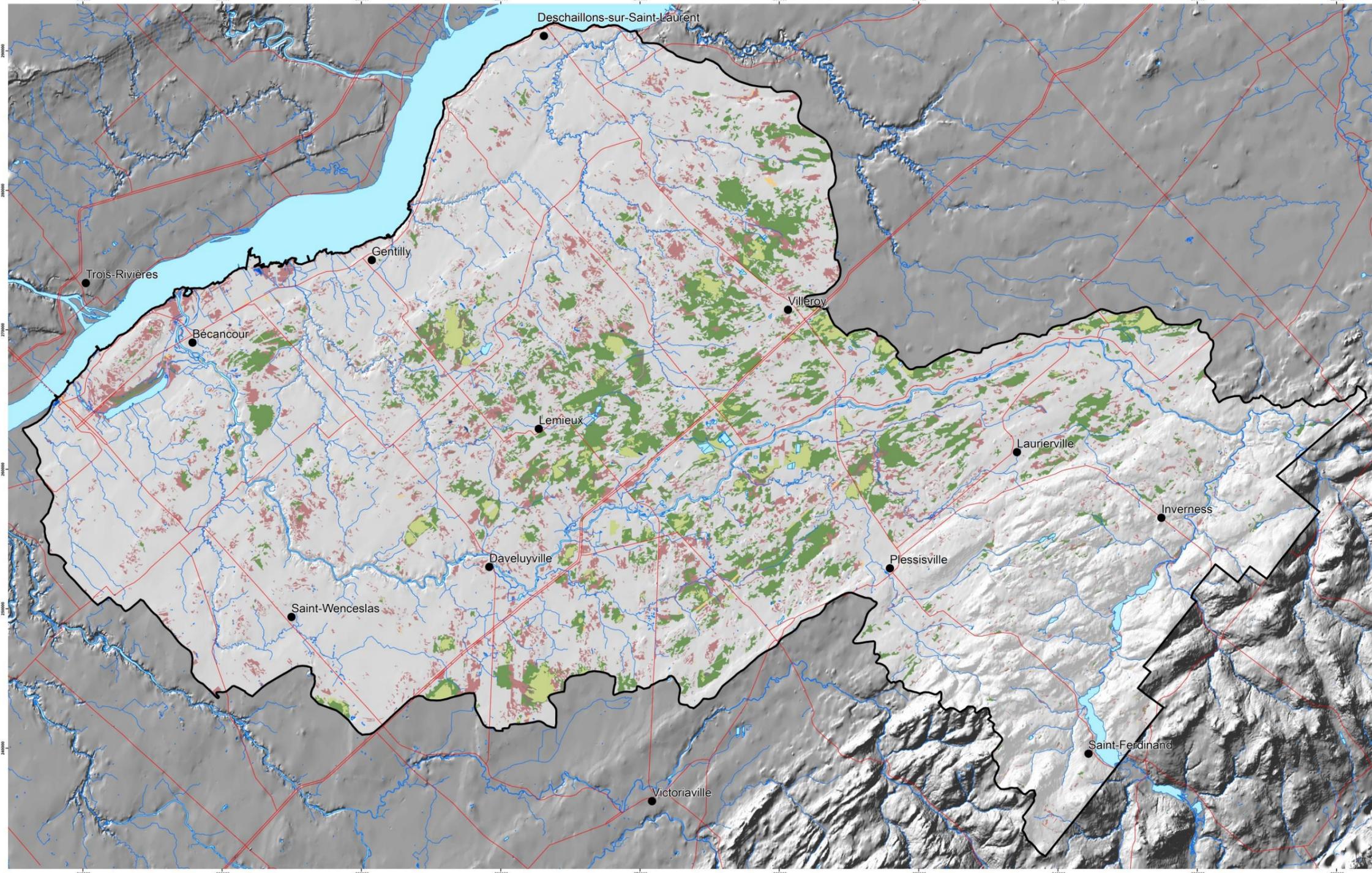


Figure 11 Pourcentage des différents types de milieux humides



MÉTADONNÉES
Protocole 3.9
Section 2.2.5 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 12 Milieux humides
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC

Échelle 1/100 000



Projection cartographique conforme au Lambert de Québec
Métres vertical 85
Système de référence géodésique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Milieux humide: CIC, 2012
Fond de carte: Ombre MRN 20K

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions locales et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'origine ne donnent aucune garantie, expresse ou implicite, quant à l'exactitude ou à l'intégrité de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, ses conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myrland, G. 2013. Projet de cartographie des milieux humides du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

Pertes de milieux humides et perturbations

Vu l'importante superficie couverte par les milieux humides dans la zone d'étude, et l'importance des tourbières parmi ceux-ci, le rôle hydrogéologique des tourbières à l'échelle de la zone d'étude a été étudié dans le cadre d'un projet de maîtrise en sciences de la Terre à l'UQAM (Avard, 2013). Les résultats de ces travaux ont été présentés lors de conférences (Larocque et al., 2012; Avard et Larocque, 2011). Une partie du projet de maîtrise avait pour objectif de déterminer comment les superficies occupées par les tourbières ont évolué entre 1966 et 2010 sur la zone d'étude. Ces résultats sont résumés ici et présentés en détail dans l'**Annexe 2** (Avard et al., 2013).

L'identification des secteurs perturbés a été faite en comparant des mosaïques de photos aériennes de 1966 (Ministère des forêts, 1966) et de 2010 (fournie par l'AGTCQ) pour toute la zone d'étude. Des cartes de milieux humides ont été créées pour les deux années. Les superficies identifiées ont été validées sur le terrain sur neuf tourbières caractérisées plus précisément (voir **section 3.2.7**). Les superficies tourbeuses disparues entre 1966 et 2010 ont été délimitées par la comparaison des cartes des deux années. Une analyse détaillée de la carte de 2010 a été réalisée pour identifier les perturbations présentes.

En 1966, la zone d'étude comptait 22 933 ha de tourbières (8% du territoire) considérées alors comme intactes. En 2010, la superficie couverte par les tourbières était de 17 500 ha (6,1% du territoire). En 2010, 474 tourbières intactes ou avec perturbations limitées étaient présentes. Leur superficie variait entre 0,001 et 1 197 ha pour une moyenne de 39 ha (médiane 12 ha). Les petites tourbières sont nombreuses et les très grandes tourbières sont relativement rares.

Vingt-quatre pourcents (5433 ha) des tourbières observées en 1966 avaient subi des perturbations irréversibles en 2010 (**Tableau 3**). La disparition de 4033 ha de tourbière est reliée à la production de canneberges directement sur les dépôts tourbeux. Ce mode de production de la canneberge était courant il y a quelques années. Aujourd'hui, on ne le retrouve que marginalement dans les secteurs où les dépôts organiques sont relativement minces (< 1 m) en bordure des tourbières. Les cultures récentes se trouvent surtout sur les dépôts sableux en périphérie des tourbières. Les conséquences de la production de la canneberge sur la dynamique hydrologique et écologique des tourbières voisines ne sont cependant pas bien connues (Caron, 2009). Les autres activités ayant entraîné la perte de superficies tourbeuses sont l'agriculture céréalière et maraîchère (630 ha), la construction de routes pavées et de bâtiments (223 ha) et diverses causes indéterminées (556 ha; catégorie "autres"). Toutes ces perturbations sont considérées majeures, car elles peuvent entraver de manière importante le fonctionnement hydrologique et la dynamique écosystémique des tourbières. Même si ces perturbations cessent, il est peu probable que l'accumulation de tourbe reprenne à court ou moyen terme sans intervention majeure. En 2010, 7015 ha (30 %) étaient touchés par des perturbations limitées (**Tableau 3**). Les canaux de drainage (4558 ha) et les chemins forestiers (1905 ha) sont

les principales perturbations limitées identifiées. La coupe forestière (407 ha) et les lignes à haute tension (145 ha) sont des types de perturbations limitées plus marginales dans la région.

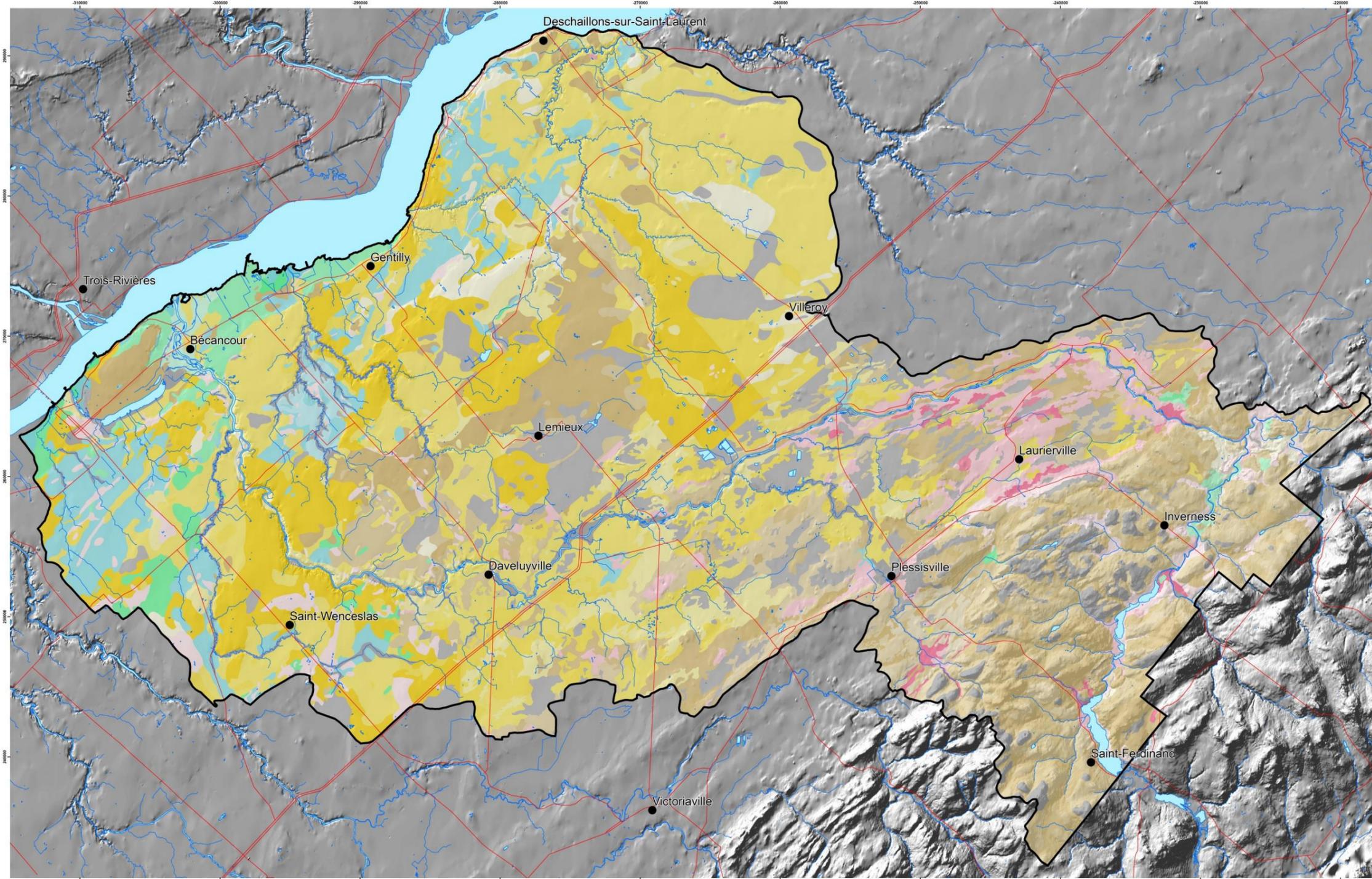
Tableau 3 Superficies occupées en 2010 par les tourbières intactes, les tourbières avec perturbation limitée et les tourbières avec perturbation irréversible (Avard et al. 2013)

| | Superficie (ha) |
|--|------------------------|
| Tourbières intactes | 10 485 |
| Tourbières avec perturbation limitée | |
| Canaux de drainage | 4558 |
| Chemins forestiers | 1905 |
| Coupe forestière | 407 |
| Ligne haute tension | 145 |
| Tourbières avec perturbation irréversible | |
| Culture de canneberges | 4033 |
| Agriculture céréalière ou maraîchère | 630 |
| Routes pavées et bâtiments | 223 |
| Autres | 547 |
| TOTAL | 22 933 |

2.2.6 Pédologie

Les données à référence spatiale utilisées pour préparer ce livrable sont issues de l'assemblage de plusieurs cartes pédologiques sous forme numérique réalisées par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA). La représentation choisie tient compte de deux informations issues des données de l'IRDA : la texture du sol dominant (argileux, loameux, sableux, graveleux, issus de dépôts de till, organiques et divers) et son drainage (très rapidement drainé à très mal drainé). L'équivalence des classes de drainage de l'IRDA et du SIEF est présentée à l'**Annexe 3**.

Le sable est l'unité pédologique principale d'une portion substantielle de la partie basse de la zone d'étude (**Figure 13**). Les classes de drainage les plus rencontrées pour les sols sableux sont *imparfaitement drainé* distribués surtout dans la portion aval, *bien drainé* et *mal drainé* surtout observés dans la portion centrale de la zone Bécancour. Hormis les zones sableuses, on retrouve une région de till mal drainé couvrant une partie des municipalités de Saint-Sylvère, Lemieux et Manseau, des bandes argileuses le long du Saint-Laurent et des zones graveleuses qui s'étendent de Notre-Dame-de-Lourdes à Lyster, au sud de la rivière Bécancour. La portion appalachienne est dominée par le till comme unité pédologique principale avec la présence de surfaces sableuses et loameuses au pourtour de la rivière Bécancour et des lacs William et Saint-Joseph.



MÉTADONNÉES

Protocole livrable 11
Section 2.2.6 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 13 Pédologie

ZONE BÉCANCOUR

QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Pédologie: DPEP et IRDA

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en échantillon permet toutefois d'avoir une représentation localement corrigée dans la mesure de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliation ne donnent aucune garantie, expresse ou implicite, quant à l'exactitude ou à l'intégrité de toute donnée dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013.
Projet de consultation des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

2.2.7 Réseau de surveillance et programme de suivi

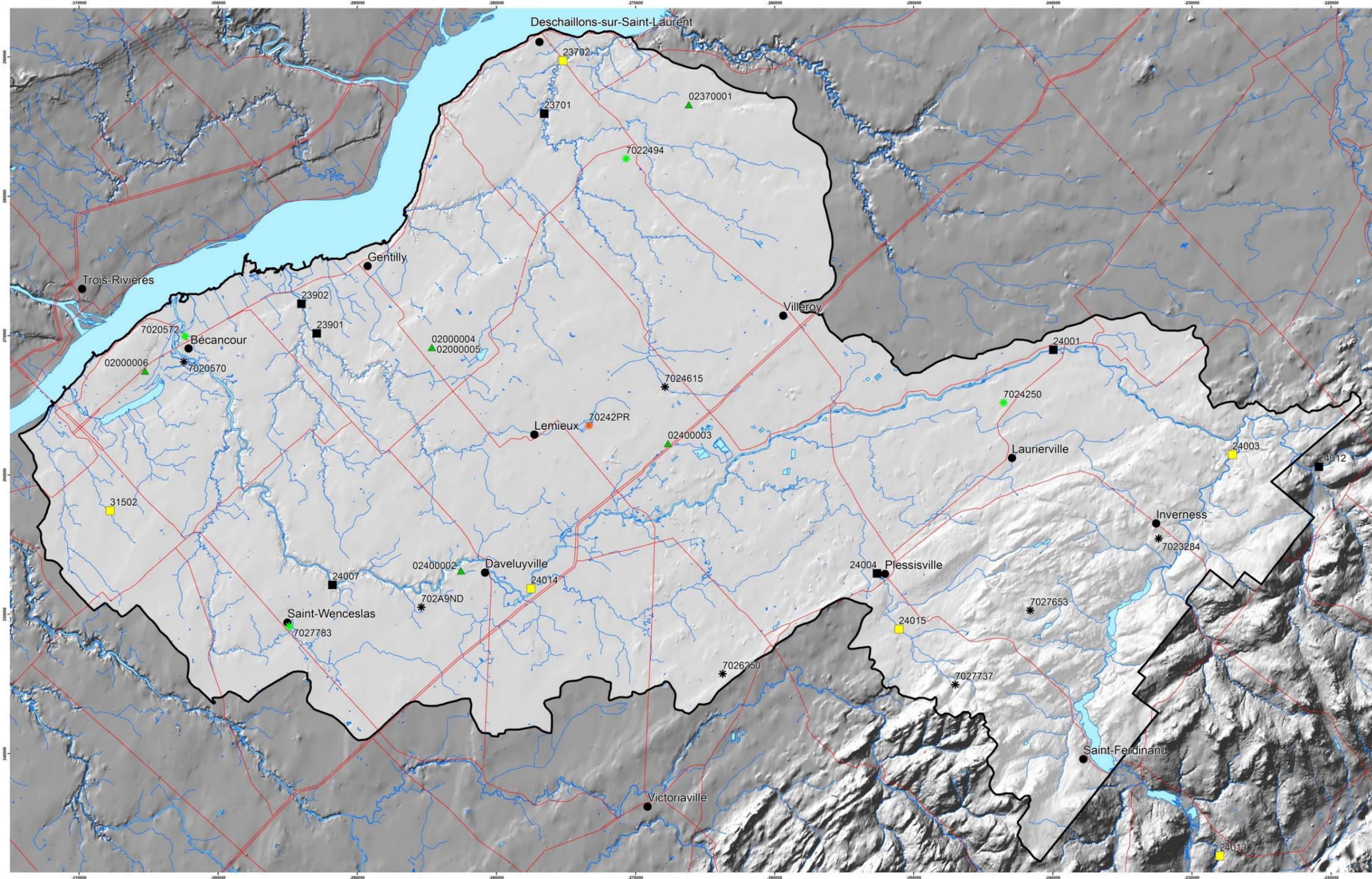
La zone d'étude possède plusieurs stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques, ces dernières ayant été mises en place au cours du projet (**Figure 14**). L'ensemble de ces stations procure des données très importantes pour la gestion du territoire. La plupart de ces données ont été utilisées dans ce projet.

Les données hydrométriques ont été fournies par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Sur les 13 stations illustrées, seulement six sont encore actives, les sept autres ont été abandonnées à différentes dates (**Tableau 4**). Le débit total le plus important enregistré sur la zone d'étude (850 m³/s) a été mesuré à la station 024007, située vis-à-vis le pont de Saint-Sylvère sur la rivière Bécancour. Cette station est la plus en aval sur la rivière Bécancour. Étant des rivières d'importance, toutes les rivières instrumentées ont un écoulement en période d'étiage. Entre 2010 et 2012, des ruisseaux et rivières de plus faibles débits se sont asséchés pendant la période estivale.

Tableau 4 Informations sur les stations hydrométriques

| Cours d'eau | Numéro de la station | Étendue série de données | Superficie (km ²) | Débit moyen (m ³ /s) | Débit maximum (m ³ /s) | Débit minimum (m ³ /s) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Bécancour | 024013 | 1980-2013 | 227 | 5,6 | 242,6 | 0,46 |
| Bécancour | 024003 | 1967-2013 | 919 | 22,1 | 368,0 | 0,65 |
| Bécancour | 024001 | 1921-1969 | 1410 | 30,7 | 654,0 | 0,57 |
| Bécancour | 024014 | 2000-2013 | 2171 | 48,1 | 500,5 | 1,01 |
| Bécancour | 024007 | 1970-2002 | 2330 | 53,0 | 850,0 | 1,63 |
| Petite du Chêne | 023701 | 1972-2007 | 356 | 7,2 | 212,0 | 0,11 |
| Petite du Chêne | 023702 | 2007-2013 | 382 | 9,6 | 115,8 | 0,96 |
| Gentilly | 023902 | 1973-1976* | 304 | 3,6 | 91,2 | 0,25 |
| Palmer | 024012 | 1973-1979* | 216 | 6,6 | 146,0 | 0,07 |
| Bourbon | 024015 | 2006-2013 | 49,9 | 1,7 | 30,7 | 0,07 |
| Bourbon | 024004 | 1966-1972 | 97,6 | 1,9 | 30,3 | 0,04 |
| Marguerite | 031502 | 2006-2013 | 12,2 | 0,5 | 10,1 | 0,00 |

* Période estivale



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ☒ Zone d'étude
- Station piézométrique**
- ▲ MDDEFP
- Station hydrométrique**
- Source - État
- CEHQ - Active
- CEHQ - Abandonnée
- Station météorologique**
- Source - État
- ★ Environnement Canada - Active
- ★ MDDEFP - Active
- ★ MDDEFP - Abandonnée

Figure 14 Réseaux de suivi météorologique, hydrologique et piézométrique

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Stations météorologiques: MDDEFP DSEE
Stations hydrométriques: CEHQ
Stations piézométriques: MDDEFP

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES

Section 2.2.7 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional est décliné pour refléter les conditions locales et ne saurait être considéré comme une représentation officielle. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et à l'usage de données et de conditions précises. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant reliées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

Les données météorologiques ont été obtenues auprès de Climat Québec. Ces données sont disponibles à 12 stations météorologiques sur la zone d'étude. Parmi celles-ci, cinq sont actives et les sept autres stations ont été abandonnées à différentes dates (**Tableau 5**). Quatre stations font partie du réseau provincial et une fait partie du réseau d'Environnement Canada. La température moyenne sur la zone d'étude va de 3,8°C (Manseau) à 6,2°C (Bécancour-aréna, la station située le plus en aval). Dans la partie aval de la zone d'étude, les précipitations annuelles moyennes totalisent près de 1000 mm et vers l'amont, près de 1200 mm. Une augmentation des précipitations est observée avec l'altitude des stations, ce qui s'explique par les phénomènes orographiques qui favorisent les précipitations. Le CEHQ a fourni les apports verticaux journaliers (précipitations plus fonte de la neige) de 1900 à 2010 pour un maillage de 0,1° (Poirier et al., 2012). Les températures minimales et maximales journalières interpolées sur ce maillage pour la même période sont fournies par la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSEE).

Tableau 5 Informations sur les stations météorologiques

| Nom de la station | Numéro de la station | Altitude (m) | Étendue série de données | Température moyenne annuelle (°C) | Précipitation moyenne (mm/an) |
|-----------------------|----------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Bécancour Aréna | 7020572 | 18 | 1995-2013 | 6,2 | 958 |
| Fortierville | 7022494 | 65 | 1972-2013 | 4,7 | 1135 |
| Laurierville | 7024250 | 152 | 1937-2013 | 5,3 | 1204 |
| Lemieux | 70242PR | 97 | 1999-2013 | 4,0 | 1127 |
| Saint-Wenceslas | 7027783 | 78 | 1979-2013 | 5,0 | 991 |
| Bécancour | 7020570 | 15 | 1966-1994 | 4,6 | 1029 |
| Inverness | 7023284 | 236 | 1963-1982 | 4,1 | 1183 |
| Manseau | 7024615 | 96 | 1978-1994 | 3,8 | 1046 |
| Princeville | 7026250 | 160 | 1973-1994 | 4,1 | 1053 |
| Saint-Pierre-Baptiste | 7027653 | 290 | 1963-1982 | n.d. | 1185 |
| Sainte-Sophie | 7027737 | 312 | 1963-1985 | n.d. | 1215 |
| Daveluyville | 702A9ND | 84 | 1966-1994 | 4,2 | 1020 |

Six stations piézométriques mises en place dans ce projet font maintenant partie du Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec opéré par le MDDEFP (**Tableau 6**). Une description détaillée des forages (logs de forages et propriétés hydrogéologiques) est présentée aux **chapitres 3 et 5**. Les stations piézométriques sont réparties sur toute la zone d'étude. Trois forages captent l'aquifère de roc fracturé captif, deux stations captent l'aquifère de roc fracturé libre et un forage est situé dans un aquifère granulaire à nappe libre. Les données de la station de Leclercville (2370001) ne sont pas encore disponibles sur le site du MDDEFP. Mis à part la station piézométrique de Bécancour (02000006) où le forage capte l'aquifère rocheux captif et artésien, la profondeur moyenne du niveau piézométrique par rapport à l'élévation du sol ne dépasse pas quelques mètres. La température moyenne de l'eau varie très peu d'une station à l'autre.

Tableau 6 Informations sur les stations piézométriques

| Localisation du forage | Forage PACES | Numéro de la station | Aquifère | Altitude (m) | Étendue série de données | Température moyenne* (°C) | Niveau d'eau moyen* (m) |
|---------------------------|--------------|----------------------|------------------------|--------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Bécancour | F9 | 02000006 | Fracturé (libre) | 8 | 2010-2013 | 7,5 | 8,05 |
| Sainte-Marie-de-Blandford | P3 | 02000004 | Granulaire (libre) | 84 | 2010-2013 | 7,8 | 82,1 |
| Sainte-Marie-de-Blandford | F3 | 02000005 | Fracturé (captif) | 84 | 2010-2013 | 7,4 | 80,6 |
| Manseau | F8 | 02400003 | Fracturé (semi-captif) | 114 | 2010-2013 | 7,4 | 112,2 |
| Sainte-Anne-du-Sault | F6 | 02400002 | Fracturé (libre) | 90 | 2010-2013 | 7,8 | 86,9 |
| Leclercville | F7 | 02370001 | Fracturé (captif) | 69 | 2010-2012 | n.d. | n.d. |

* Statistiques calculées avec les données de décembre 2010 à décembre 2011.

2.3 Population, centres urbains et activités

2.3.1 *Municipalités*

La population totale sur la zone d'étude est d'environ 50 000 habitants. La ville principale est celle de Bécancour (12 196 habitants). Les autres villes importantes sont Plessisville (6 652 habitants dans la ville et 2 607 habitants dans la paroisse) et Princeville (5 150 habitants sur la zone d'étude) et Saint-Ferdinand (1 542 habitants). Les informations sur les municipalités présentes sur le territoire et la superficie couverte sur la zone d'étude sont dans le **tableau 7**.

Tableau 7 Populations et superficies par municipalités et par MRC

| MRC | Municipalité | Population zone d'étude | Superficie totale (km ²) | Superficie région d'étude (km ²) |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| Arthabaska | Daveluyville | 1 006 | 2,4 | 2,4 |
| | Maddington | 415 | 24,3 | 24,3 |
| | Sainte-Anne-du-Sault | 1 323 | 60,2 | 60,4 |
| | Saint-Louis-de-Blandford | 1 013 | 107,1 | 107,2 |
| | Saint-Rosaire | 848 | 109,8 | 88,2 |
| | Saint-Valère | 118 | 108,8 | 9,6 |
| Bécancour | Bécancour | 12 196 | 441,0 | 441,0 |
| | Deschaillons-sur-Saint-Laurent | 965 | 36,9 | 36,9 |
| | Fortierville | 710 | 44,4 | 44,4 |
| | Lemieux | 326 | 74,2 | 74,2 |
| | Manseau | 853 | 107,3 | 107,3 |
| | Parisville | 491 | 35,9 | 35,9 |
| | Saint-Pierre-les-Becquets | 1 176 | 65,1 | 65,1 |
| | Saint-Sylvère | 838 | 87,0 | 87,0 |
| | Sainte-Cécile-de-Lévrard | 403 | 32,2 | 32,2 |
| | Sainte-Françoise | 454 | 87,3 | 87,3 |
| | Sainte-Marie-de-Blandford | 495 | 69,5 | 69,5 |
| Sainte-Sophie-de-Lévrard | 760 | 82,1 | 82,1 | |

* Le tableau se poursuit à la page suivante

| MRC | Municipalité | Population zone d'étude | Superficie totale (km ²) | Superficie région d'étude (km ²) |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| de l'Érable | Inverness | 823 | 178,2 | 178,2 |
| | Laurierville | 1 365 | 108,8 | 102,5 |
| | Lyster | 783 | 167,8 | 79,4 |
| | Notre-Dame-de- Lourdes | 708 | 83,5 | 80,3 |
| | Plessisville (Paroisse) | 2 607 | 141,3 | 135,3 |
| | Plessisville (Ville) | 6 652 | 4,4 | 4,4 |
| | Princeville | 5 150 | 196,7 | 132,1 |
| | Saint-Ferdinand | 1 542 | 142,7 | 108,2 |
| | Saint-Pierre-Baptiste | 428 | 83,5 | 83,5 |
| | Sainte-Sophie-d'Halifax | 627 | 92,3 | 55,0 |
| | Villeroy | 475 | 101,5 | 90,3 |
| Lotbinière | Leclercville | 100 | 135,5 | 64,0 |
| | Sainte-Agathe-de-Lotbinière | 298 | 166,7 | 42,4 |
| | Val-Alain | 100 | 102,9 | 3,2 |
| Nicolet-Yamaska | Aston-Jonction | 382 | 25,9 | 25,9 |
| | Grand-Saint-Esprit | 458 | 27,2 | 13,7 |
| | Nicolet | 675 | 129,2 | 8,9 |
| | Saint-Célestin (Municipalité) | 648 | 77,7 | 77,7 |
| | Saint-Célestin (Village) | 794 | 1,5 | 1,5 |
| | Saint-Léonard-d'Aston | 420 | 84,8 | 15,5 |
| | Saint-Wenceslas | 1 105 | 79,7 | 74,4 |
| | Sainte-Eulalie | 600 | 86 | 41,2 |
| Hors-MRC | Wôlinak | 174 | 0,8 | 0,8 |
| Total | | 50 298 | | 2873 |

2.3.2 Occupation du sol

L'information relative à l'occupation du sol provient de la DPEP et a été produite à partir d'images Landsat7 de la NASA (**Figure 16**). La couche d'information a été généralisée en limitant à quatre le nombre de classes : zones agricoles, zones forestières, zones humides et zones urbaines. Un traitement de remplissage a aussi été nécessaire pour combler certains trous dans la couverture spatiale, notamment dans le parc industriel de Bécancour et dans un secteur au nord du lac Rose à Sainte-Marie-de-Blandford. Ceci a été réalisé en utilisant des photos aériennes de la zone d'étude datant de 2005 fournies par l'AGTCQ.

À partir de l'imagerie Landsat7, l'occupation du sol à des fins forestières est estimée à 47,9% tandis que l'occupation à des fins agricole est estimée à 40,3% (**Figure 15**). Les secteurs forestiers se retrouvent principalement au centre de la zone d'étude et à la périphérie des zones humides. Les zones agricoles sont concentrées dans la portion aval, en bordure du fleuve et de la rivière Bécancour. Elles sont présentes dans une moindre mesure dans les vallées appalachiennes en amont. La proportion des zones humides est estimée à 8,0% du territoire et celle des zones urbaines à 3,9%. L'utilisation d'une autre source d'information explique que les pourcentages présentés ici varient légèrement de ceux décrits précédemment pour la forêt, l'agriculture et les milieux humides.

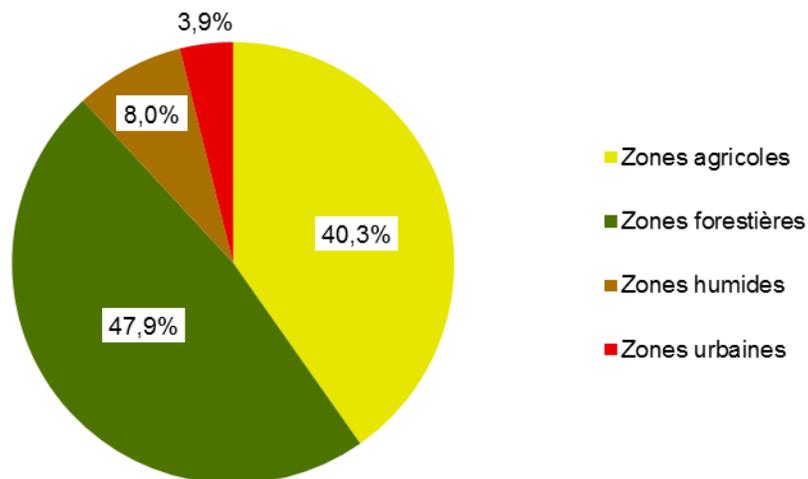
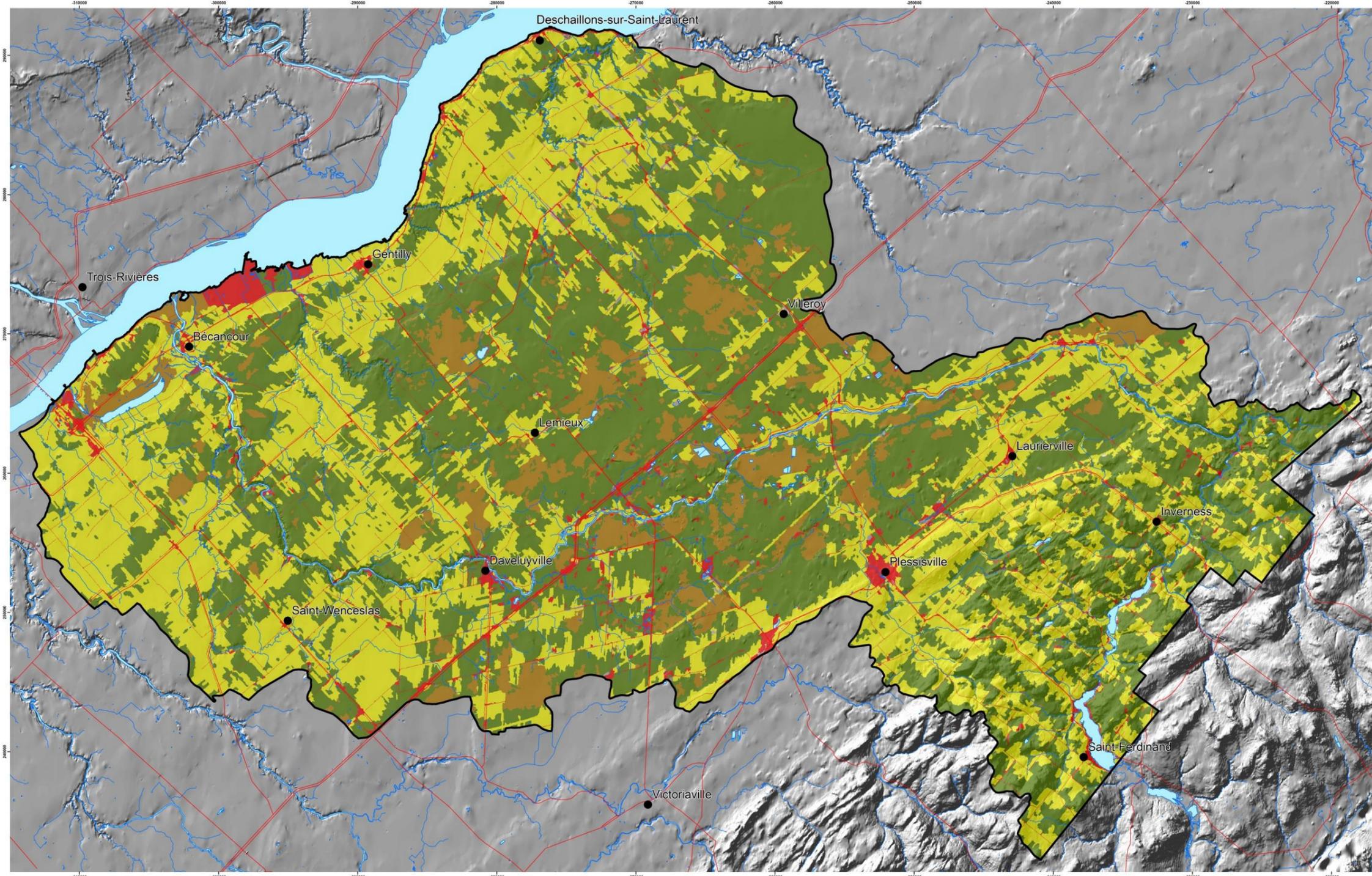


Figure 15 Pourcentage des différents types d'occupation du sol



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude

Occupation du sol

Classes

- Zones agricoles
- Zones forestières
- Zones humides
- Zones urbaines



MÉTADONNÉES
Section 2.3.2 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 16 Occupation du sol
ZONE BÉCANCOUR

QUÉBEC

Échelle 1:100 000

Projection cartographique: coordonnées de Lambert de Québec
WGS84 - UTM 18 S
Système de référence géométrique: NAD 83

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Utilisation du sol: données LANDSAT DPEP

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que dérivées à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et offrir aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentées. Les auteurs se font responsables de l'exactitude de l'information présentée, ainsi qu'à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et s'assurent d'être responsables pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de conservation des zones extérieures du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Présenté au MDDEFP.

2.3.3 Affectation du territoire

La **figure 18** présente la carte de l'affectation du territoire. Les données proviennent du Ministère des Affaires municipales, Régions et Occupation du territoire (MAMROT). Selon cette information, le territoire est affecté en très grande partie à des vocations agricoles (60,2%) et agroforestières (30,2%) (**Figure 17**). La partie aval de la zone d'étude est de façon prédominante vouée à l'agriculture, à l'exception d'une portion à vocation agroforestière autour des municipalités de Lemieux, Sainte-Marie-de-Blandford, Manseau et de Sainte-Sophie-de-Lévrard.

La quasi-totalité des territoires affectés à des fins de conservation (2%) sont des milieux humides d'importance : la tourbière du Lac Rose, la Réserve écologique du Lac-Saint-Paul, le delta de la rivière Bécancour, le Plé de Plessis, la tourbière de Francoeur et la partie sud de la Grande Tourbière de Villeroy. En amont, le pourtour de la rivière Bécancour et des lacs Joseph et William est à vocation récréative (4,5%) (**Figure 17**). Les autres affectations du territoire rencontrées sur la zone d'étude sont urbaines (1,5%), industrielles (1,2%) et agroforestières (0,5%). Ici également, l'utilisation d'une autre source d'information explique que les pourcentages varient légèrement de ceux présentés précédemment pour la forêt, l'agriculture et les zones urbaines.

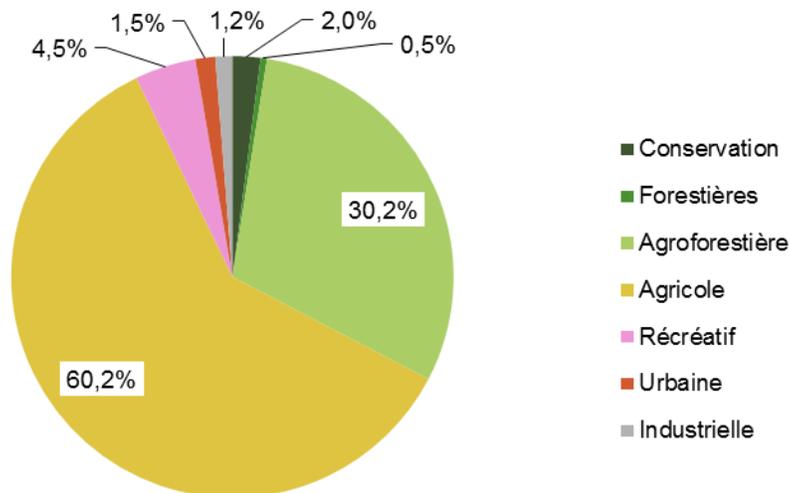
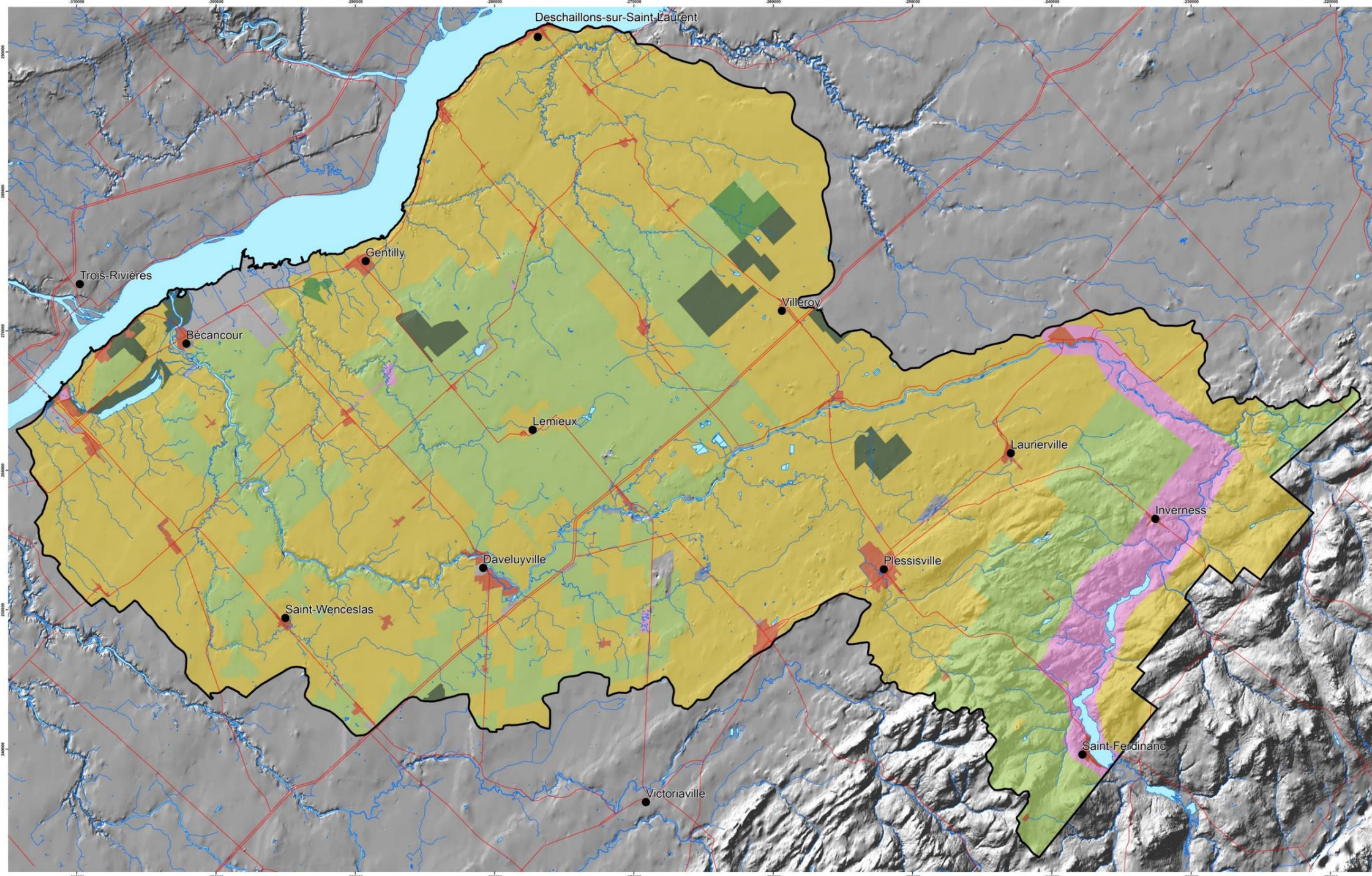


Figure 17 Pourcentage des différents types d'affectation du territoire



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Classes d'affectation du territoire

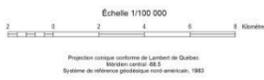
- Conservation
- Forestière
- Agroforestière
- Agricole
- Récréatif
- Urbaine
- Industrielle



MÉTADONNÉES
Section 2.3.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 18 Affectation du territoire

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Affectation du territoire:
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'adéquation de ses données et de ses conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute donnée dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentes sur la carte ou des données y étant reliées.

Relation bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Métronnot, G. 2013.
Projet de conservation des zones extérieures du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

3 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION

3.1 Compilation de l'information existante

Une liste détaillée des sources de données consultées dans ce projet est fournie au **tableau 8** (plusieurs sources font référence à des rapports de consultants qui ne sont pas cités explicitement ici, mais qui sont listés dans la section **Références**). L'acquisition des données disponibles a débuté avec la numérisation de tous les rapports et documents disponibles dans les archives centralisées au MDDEFP à Québec. Les municipalités ont ensuite été contactées afin d'obtenir leur autorisation donnant accès aux rapports plus récents qui sont entreposés au bureau régional du MDDEFP à Victoriaville. La DPEP a été sollicitée pour obtenir les données provenant de plusieurs sources différentes, notamment, les données météorologiques et une partie de l'information sur le territoire (occupation du sol, carte topographique à l'échelle 1 : 20 000, modèle numérique altimétrique, milieux humides et pédologie). Les données géologiques ont été acquises auprès du MRN à partir du système d'information géo-minier (SIGEOM). Le Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEFP, la base de données géochimique du Québec (BADGEQ et MRN), les bases de données de forages du MTQ et le Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) ont également été consultés pour extraire l'information hydrogéologique, stratigraphique et géophysique correspond à la zone d'étude. La Base de données des cultures assurées (BDCA) a été consultée pour obtenir l'information spatiale sur les types de cultures.

Plusieurs partenaires régionaux ont également fourni des données. L'AGTCQ a fourni des informations sur le territoire (piste de VTT, mosaïque de photos aériennes, modèle numérique de surface, localisation des cannebergières, matrices graphiques). L'information sur les carrières, les sites contaminés, les dépotoirs, les problématiques régionales et l'affectation du territoire a été obtenue auprès des MRC partenaires.

Tableau 8 Source d'information disponible pour la réalisation du projet

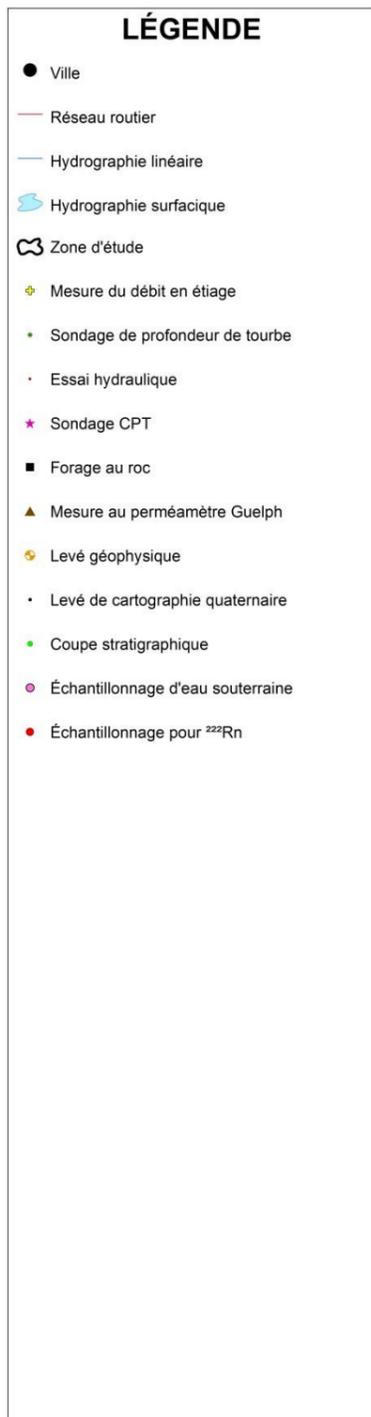
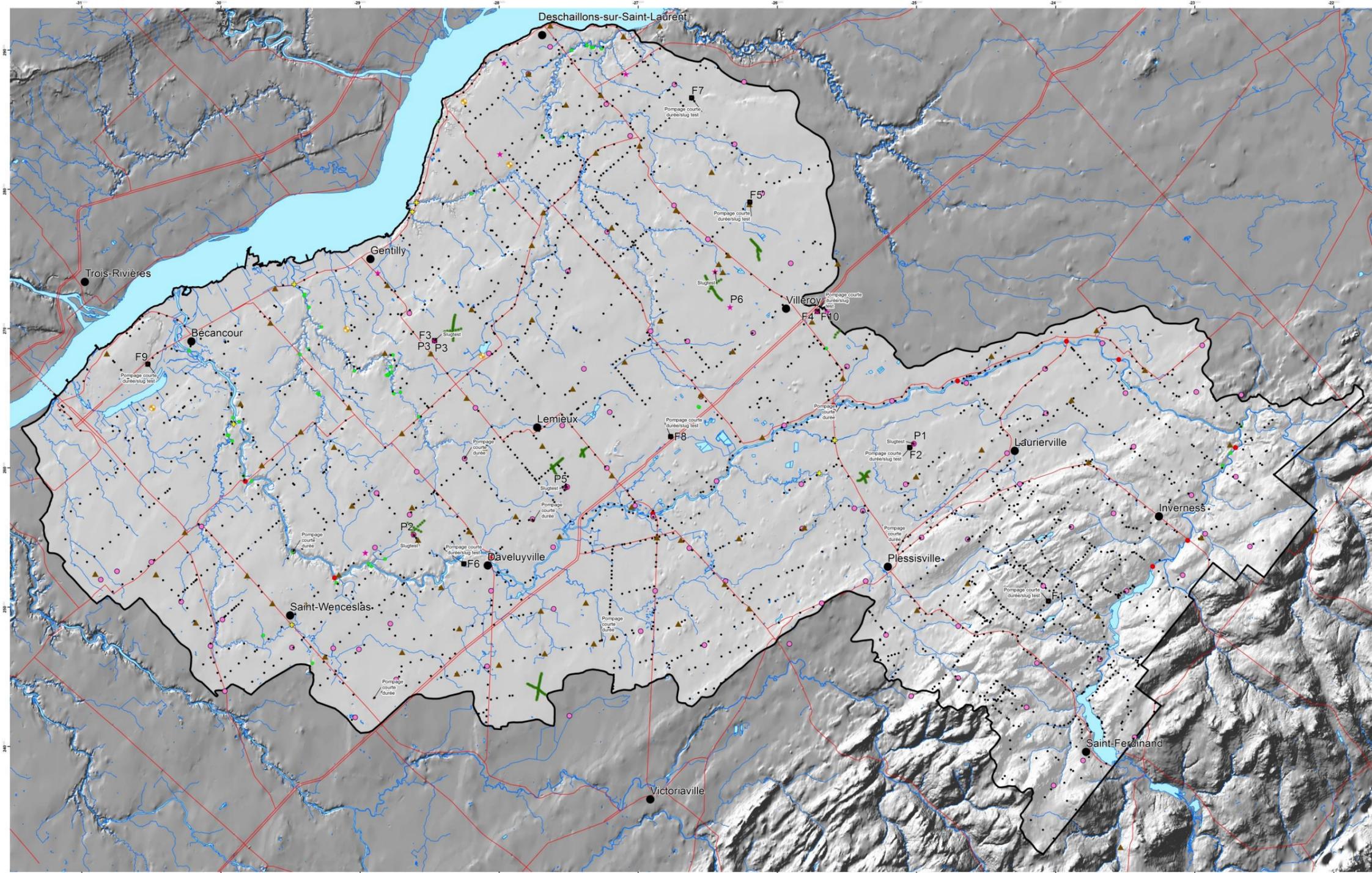
| Thèmes | Description des jeux de données | Source |
|---|---|------------------------------|
| Hydrographie | Base nationale de données topographiques (BNDT) | RnCan-GeoGratis |
| | Base de données topographiques du Québec (BDTQ) | MRN |
| | Réseau hydro national du Canada | RnCan-GeoBase |
| | Localisation des zones humides | DPEP/Canards Illimités/MAPAQ |
| | Localisation des barrages (avec capacité) | MDDEFP-CEHQ |
| Limites de bassins | Carte des régions hydrographiques | MDDEFP-CEHQ |
| | Carte des limites de bassins versants | MDDEFP-CEHQ |
| | Réseau hydro national du Canada | RnCan-GeoBase |
| | Aires de drainage (Données cadres de l'Atlas National) | RnCan-GeoGratis |
| Topographie | Modèle numérique altimétrique (MNA) | MRN |
| | Modèle numérique de surface du Centre-du-Québec (MNS) | AGTCQ |
| Occupation du sol | Base de données des cultures généralisées (BDCG) | FADQ |
| | Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA) | MRN |
| | Occupation du sol | MAPAQ |
| | Compilation nationale de l'occupation du sol au Canada | RnCan-GeoBase |
| | Système d'information écoforestière (SIEF) | MRN |
| | Cartes des zones inondables | MDDEFP-CEHQ |
| Affectation du territoire | Limites des zones agricoles | CPTAQ |
| | Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA) | MRN |
| Routes, limites municipales et toponymie | Base de données topographiques du Québec (BDTQ) | MRN |
| | Base nationale de données topographiques (BNDT) | RnCan-GeoGratis |
| | Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA) | MRN |
| | Réseau routier national du Canada | RnCan-GeoBase |

* Le tableau se poursuit à la page suivante

| Thèmes | Description des jeux de données | Source |
|-------------------------|--|--------------------------|
| Géologie | Compilation de données géologiques | MRN-SIGEOM |
| | Géologie du Quaternaire | UQAM |
| Pédologie | Carte des sols, information pédologique | DPEP/IRDA |
| Hydrogéologie | Localisation des puits du réseau de suivi | MDDEFP |
| | Localisation des puits (SIH) | MDDEFP-SIH |
| | Localisation des forages pétroliers et miniers | MRN/SIGPEG |
| | Localisation des forages géotechniques (MTQ et HQ) | MTQ/HQ |
| | Localisation des captages municipaux | MDDEFP |
| | Rapports hydrogéologiques | MDDEFP/ municipalités |
| Qualité de l'eau | Carte de la qualité de l'eau de surface des tronçons | MDDEFP |
| | Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ) | MRN |
| Hydrométrie | Localisation des stations et données hydrométriques | MDDEFP-CEHQ |
| Climat | Localisation des stations et données météorologiques | MDDEFP-DSEE |

3.2 Travaux de caractérisation

Au cours des années 2010 et 2011, plusieurs travaux de terrain ont été réalisés afin d'obtenir de l'information supplémentaire sur l'hydrogéologie, la géochimie et la stratigraphie de l'aquifère fracturé et de l'aquifère granulaire. Des travaux de cartographie quaternaire ont été réalisés par une équipe de l'UQAM afin d'améliorer et d'uniformiser les connaissances déjà existantes. Des travaux dans les milieux humides ont permis d'obtenir plus d'information sur la stratigraphie, la délimitation spatiale et l'hydrogéologie des tourbières. Le **tableau 9** résume les travaux de caractérisation qui ont été réalisés dans le cadre du projet tandis que la **figure 19** permet de localiser ces travaux. L'**Annexe 4** présente des photos prises lors des travaux de terrain.



MÉTADONNÉES
Section 3.2 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 19 Localisation de tous les travaux de caractérisation réalisés dans le cadre du projet PACES-Bécancour

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources :
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MNE 20K
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliés ne donnent aucune garantie, expresse ou implicite, quant à l'exactitude ou à l'intégrité de toute donnée dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Massonnet, G. 2013. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDEFP.

Tableau 9 Résumé des travaux de caractérisation

| Travaux de caractérisation | Période | Réalisés par |
|--|-------------------------|----------------------------|
| Levés géologiques | juin 2009 à août 2010 | UQAM-Quatenaire |
| Levés géophysiques de résistivité électrique | juin et juil. 2010 | UQAM-Polytechnique |
| Installation de piézomètres dans l'aquifère fracturé (10) | sept. 2010 à mai 2011 | Groupe Puitbec Inc |
| Installation de piézomètres dans les dépôts meubles (6) | oct. 2010 | INRS |
| Sondages CPT et RPSS (15) | oct. 2010 | INRS |
| Essais de pompage (17) | juin 2010 à juin 2011 | UQAM |
| Essais hydrauliques à charge variable (16) | nov. 2010 à août 2011 | UQAM |
| Essais Packers (6) | novembre 2011 | UQAC |
| Essais au perméamètre de Guelph (115), | mai et juin 2010 | UQAM |
| Échantillonnage de sols et analyses granulométriques (115) | mai et juin 2010 | UQAM |
| Levés piézométriques | juil. et août 2010 | UQAM |
| Suivi continu des niveaux piézométriques (16) | oct. 2010 à mai 2011 | UQAM |
| Échantillonnage d'eau souterraine, analyses chimiques et isotopiques (119) | juil. 2010 à mai 2011 | UQAM/MAXXAM/ U.Waterloo |
| Suivi mensuel des précipitations et analyses isotopiques (2 sites) | oct. 2010 à sept. 2012 | UQAM |
| Échantillonnage de l'eau de surface (7 sites) | nov. 2010 à sept. 2011 | UQAM |
| Sondage de profondeur de tourbes (221, répartis sur 9 tourbières), | mai à août 2010 | UQAM |
| Délimitation spatiale de tourbières (9 sites), | mai à sept. 2010-2011 | UQAM |
| Prélèvements de tourbe basale (sur 4 tourbières) | sept. à nov. 2010 | UQAM |
| Mesure des débits de base en période d'étiage (7 sites) | étés 2009, 2010 et 2011 | UQAM |

3.2.1 Cartographie géologique

Des levés géologiques des dépôts de surface ainsi que des coupes stratigraphiques ont été réalisés au cours de l'été 2010. Ces travaux ont été menés par l'équipe de quaternaristes de l'UQAM supervisée par le professeur Michel Lamothe. Entre les mois de mai et septembre 2010, 612 points de contrôles des dépôts de surfaces ont été ajoutés aux 2519 points de contrôle saisis au cours de l'été 2009 (**Figure 19**). Des levés de coupes stratigraphiques ont également été réalisés, principalement dans la partie basse de la zone d'étude.

3.2.2 Géophysique

Les levés géophysiques de résistivité électrique en deux dimensions ont été réalisés de la mi-juin à la mi-juillet 2010 (**Figure 19**). Les mesures ont été faites à l'aide d'un résistivimètre (modèle Terrameter LS) de la compagnie ABEM, prêté par l'équipe du professeur Michel Chouteau de l'École Polytechnique de Montréal. Les levés ont été réalisés sur des profils de longueurs allant de 400 à 1800 m. L'espacement des électrodes était de 5 m pour une profondeur maximale d'investigation de 60 m. Au total, des levés ont été réalisés sur 18 profils pour une longueur totale de 11,6 km de levés, principalement dans la partie aval du bassin où les dépôts meubles sont plus épais. Les interprétations sont données à l'**Annexe 7**.

3.2.3 Sondages et forages

Au cours de l'été 2010 et au printemps 2011, une campagne de forages a permis la mise en place de 10 nouveaux forages au roc (**Figure 19**). Au cours du mois d'octobre 2010, 15 sondages ont été réalisés dans les formations granulaires à 13 sites différents. Parmi ceux-ci, sept ont pu être faits au pénétromètre à cône (CPT) tandis que huit ont été forés en sondage par rotoperçusion (RPSS). Six des forages RPSS ont été transformés en piézomètres.

Forages au roc

Les forages au roc ont été réalisés en partenariat avec la compagnie Puitbec inc. qui a remporté l'appel d'offres ciblé lancé par l'UQAM en juin 2010. Les travaux de forage se sont déroulés de septembre à novembre 2010. La portion du budget allouée aux forages au roc dans le projet prévoyait cinq forages. Une contribution financière additionnelle du MDDEFP, visant à poursuivre le développement du Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec (MDDEFP, 2013a), a permis de mettre en place cinq forages supplémentaires, portant à 10 le nombre de nouveaux forages sur la zone d'étude.

Les sites de forages ont été localisés de manière à combler les zones où les données hydrogéologiques avaient été identifiées comme insuffisantes dans le rapport Phase I (Larocque et al., 2010) (voir **Figure 19**). Les sites choisis ont été identifiés de manière à tracer des profils perpendiculaires et parallèles à l'écoulement régional de l'eau

souterraine. Les terrains publics ont été visés en priorité, de manière à faciliter l'obtention des autorisations d'accès. Les forages F2, F3, F4, F5, F8 et F10 sont situés sur des terrains appartenant aux MRC de l'Érable et de Bécancour. Les forages F1 et F6 sont localisés sur des terrains privés tandis que les forages F7 et F9 sont situés sur les terrains du Ministère des Ressources naturelles (MRN) et du MDDEFP respectivement. Les forages F3, F6, F7, F8 et F9 ont été instrumentés pour la mesure des niveaux par le MDDEFP et ont été intégrés dans le Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec. Les forages F1, F2 et F5 ont été légués aux propriétaires des terrains sur lesquels ils sont situés à la fin du projet.

Les forages au roc ont tous été réalisés avec une foreuse à double rotation d'une capacité de 300 mm. Ils ont tous été construits selon le même modèle : un tubage d'acier ASTM A589-96 grade B de 150 mm a été mis en place sur toute l'épaisseur des dépôts meubles, jusqu'à une profondeur minimale de 1 m dans le roc. Dans le cas où l'épaisseur des dépôts était inférieure à 6 m, le tubage était enfoncé dans le roc sur une profondeur de 6 m et scellé avec une collerette de bentonite d'un diamètre de 200 mm. Plus bas, une cavité de 150 mm de diamètre était alors forée dans le roc sur une profondeur de 30 m.

Le **tableau 10** résume les détails de construction des 10 forages au roc. Les forages ont une profondeur de 30 à 78,3 m. L'épaisseur des dépôts meubles rencontrés varie entre 1 à 49 m. Les schémas de tous les forages sont illustrés à l'**Annexe 5**.

Tableau 10 Détails de construction des forages

| Forage | Municipalité | Profondeur (m) | Profondeur tubage (m) | Nappe libre ou captive | Lithologie du roc |
|--------|---------------------------|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| F1 | Saint-Pierre-Baptiste | 30,0 | 5,3 | libre | Schistes |
| F2 | Plessisville | 42,7 | 12,7 | libre | Shales |
| F3 | Sainte-Marie-de-Blandford | 78,3 | 48,9 | captive | Shales |
| F4 | Villeroy | 36,6 | 8,6 | libre | Shales/grès |
| F5 | Sainte-Françoise | 47,9 | 12,7 | captive | Shales |
| F6 | Sainte-Anne-du-Sault | 42,7 | 11,2 | libre | Shales |
| F7 | Leclercville | 48,8 | 17,3 | captive | Shales |
| F8 | Manseau | 43,5 | 14,5 | Semi-captive | Shales |
| F9 | Bécancour | 37,5 | 5,2 | libre | Shales/calcaires |
| F10 | Villeroy | 46,6 | 9,0 | libre | Shales/grès |

Sondages dans les dépôts meubles

Des sondages par pénétration au cône (CPT) et des forages RPSS (roto-percussion) ont été réalisés pour déterminer la stratigraphie et l'épaisseur des dépôts meubles, de même que pour faire l'installation de piézomètres. Ces travaux ont été réalisés au cours du mois d'octobre 2010 par une équipe de l'INRS-ETE qui a fourni la foreuse et le personnel technique. La localisation des sites a été choisie selon les besoins stratigraphiques et hydrogéologiques. Les piézomètres ont été installés autant que possible à proximité des tourbières et des forages au roc, dans la partie basse de la zone d'étude, où les besoins en données stratigraphiques étaient les plus grands. Les sondages CPT et les forages RPSS ont été réalisés en grande majorité sur les terrains privés tandis que les piézomètres ont été mis en place à proximité de certains forages au roc.

Au total, 15 sondages ont été réalisés (voir **Figure 19**). Parmi ceux-ci, six ont été transformés en piézomètres. Ces derniers sont équipés d'un tube de PVC de 25,4 mm de diamètre et d'une crépine à la base où l'eau circule par des stries horizontales espacées de 2,5 mm ayant une ouverture de 0,15 mm. La profondeur maximale des piézomètres est de 14 m et la longueur des sections crépinées varie de 1,5 à 11 m. Un tubage protecteur en ABS de 100 mm de diamètre enfoncé de 0,5 m dans le sol et muni d'un couvercle protecteur cadenassé a aussi été installé au sommet de chaque piézomètre. Les détails de chaque piézomètre sont donnés au **tableau 11**. Cependant, la majorité des sondages CPT ont une profondeur inférieure à 15 m. Ces faibles profondeurs sont dues au fait que la plupart des sites ne permettaient pas un bon ancrage pour la foreuse (présence d'argile en surface) ou une bonne pénétration de la pointe en raison de la présence de matériaux grossiers (blocs) en surface ou en profondeur. Les schémas des piézomètres et les profils stratigraphiques provenant du système d'acquisition de données de la foreuse de l'INRS-ETE sont illustrés à l'**Annexe 5**. Les données recueillies par le système d'acquisition de la foreuse lors des sondages destructifs (RPSS) sont également présentées à l'**Annexe 5**. Le piézomètre P3 a été intégré dans le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec du MDDEFP.

Tableau 11 Détails de construction des piézomètres dans les dépôts meubles et des sondages CPT et RPSS

| Site | Type | Municipalité | Profondeur (m) | Longueur crépine (m) |
|-----------|------|-----------------------------|----------------|----------------------|
| S1a | CPT | Villeroy | 6,0 | - |
| S1b (P4) | RPSS | Villeroy | 4,9 | 1,5 |
| S2 | CPT | Villeroy | 5,6 | - |
| S3 | RPSS | Villeroy | 10,0 | - |
| S4 (P6) | RPSS | Villeroy | 11,0 | 3,0 |
| S5 (P3) | RPSS | Sainte-Marie-de-Blandford | 9,1 | 3,0 |
| S6 (P2) | RPSS | Saint-Sylvère | 14,0 | 3,0 |
| S7 | RPSS | Saint-Sylvère | 3,0 | - |
| S8 | CPT | Bécancour | 13,0 | - |
| S9 | CPT | Parisville | 15,0 | - |
| S10 | CPT | Deschaillons-sur-St-Laurent | 13,0 | - |
| S11 | CPT | Sainte-Cécile-de-Lévrard | 20,0 | - |
| S12 (P5) | RPSS | Lemieux | 9,0 | 7,5 |
| S13a | CPT | Plessisville | 11,0 | - |
| S13b (P1) | RPSS | Plessisville | 10,0 | 4,5 |

3.2.4 Essais hydrauliques sur les puits

Essais de pompage

Des puits de particuliers (nommés PRI02 à PRI08) ont été testés à l'aide de la pompe déjà en place dans le puits. À certains sites, le puits était abandonné et une pompe submersible de 5 GPM (18,9 L/min) ou de 10 GPM (37,8 L/min) a été utilisée. Les forages au roc (F1 à F9) ont été testés à l'aide des mêmes pompes. Le débit était mesuré à l'aide d'un récipient de 20 ou de 100 L. Le niveau piézométrique durant le pompage était suivi en continu à l'aide d'une sonde de pression automatisée de marque *Solint Levellogger Gold*. Des valeurs manuelles étaient aussi prises à intervalle régulier comme double vérification. Aucun essai de pompage n'a été réalisé dans les piézomètres.

Parmi les 16 essais de pompage réalisés, seulement trois sites possédaient un puits pouvant être utilisé comme puits d'observation. Ces essais ont été interprétés à l'aide de la solution de Cooper-Jacob (Cooper et Jacob, 1946) en descente et en remontée et ont

permis d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique et d'emmagasinement. Les autres essais ont été interprétés en remontée selon la méthode de Theis (1940) et ont permis d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique seulement.

Essais à charge variable

Des essais à charge variable ont été réalisés dans les 10 forages au roc et dans les six piézomètres installés dans le cadre du projet. Dans les forages au roc, les variations de charges ont été induites en insérant ou en retirant dans le forage un tube d'ABS de 100 mm de diamètre et de 1,8 m de longueur rempli de sable. Ce dispositif a permis de générer des variations maximales du niveau d'eau dans le puits de 0,8 m. Dans le cas des piézomètres, une tige d'aluminium de 16 mm de diamètre et de 1,5 m de longueur a été utilisée, ce qui a permis de générer des variations maximales du niveau d'eau dans le piézomètre de 0,6 m. Durant les essais à charge variable, le niveau piézométrique était mesuré à chaque seconde à l'aide d'une sonde de pression automatisée. Des mesures manuelles ont également été prises afin de suivre l'évolution temporelle de l'essai et de valider les mesures de l'enregistreur. Pour chaque site, trois à six essais (un essai correspondant à une descente et une remontée) ont été réalisés. Les résultats ont été interprétés selon les méthodes de Bower (1976) et Hvorslev (1951).

Essais au perméamètre de Guelph et analyses granulométriques

Un total de 101 stations distribuées également sur la zone d'étude et dans les différents types de dépôts meubles ont été caractérisés *in situ* par des essais au perméamètre de Guelph (voir **Figure 19** pour la localisation des stations). Pour chaque essai au perméamètre de Guelph, un trou de 0,05 m de diamètre a été foré à une profondeur de 0,3 m. À chaque site, deux charges (5 et 10 cm) ont été imposées afin de créer un gradient hydraulique à l'intérieur du trou foré. Le taux de descente était ensuite mesuré et la conductivité hydraulique a été calculée. À chaque site stations de mesure au perméamètre de Guelph, des échantillons de sols remaniés ont été recueillis pour des fins d'analyse granulométrique. Les méthodes utilisées sont résumées dans Godbout (2012) (voir **Annexe 10**).

Essais d'injection à charge constante

Des essais d'injection à charge constante avec obturateurs gonflables (essais *Packers*) ont été réalisés par l'équipe du Centre d'étude sur les ressources minérales de l'UQAC. Les essais se sont déroulés du 12 au 16 novembre 2011 sur cinq forages (F4, F7, F8, F9 et F10). Les essais ont été réalisés le long de la partie ouverte du forage à intervalles de 3,27 m. Au total, il y a eu 85 essais d'injection à charge constante et la transmissivité a été calculée pour les cinq forages. La méthode utilisée est décrite dans l'**Annexe 9**.

3.2.5 Mesure des niveaux piézométriques

Des mesures du niveau de l'eau souterraine ont été prises lors de l'échantillonnage de l'eau souterraine. Ces mesures ont été réalisées à l'aide de sondes piézométriques *Heron* ayant une précision de l'ordre du centimètre. Au total, 112 mesures manuelles du niveau piézométrique ont été prises au cours de l'été 2010. En plus des mesures manuelles, un réseau de suivi des fluctuations des niveaux piézométriques a été mis en place. Le niveau de l'eau souterraine a été mesuré toutes les heures, de l'automne 2010 à la fin de l'année 2012, dans les 10 forages au roc et dans les six puits d'observation installés dans les dépôts meubles. Les niveaux ont été mesurés à l'aide de sondes *Solinst Levelogger Gold*. Des visites mensuelles ont permis de faire une vérification du niveau d'eau à l'aide de mesures manuelles.

3.2.6 Échantillonnage d'eau

Analyse des ions

Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés entre le 5 juillet et le 4 août 2010 dans 103 puits de particuliers et puits municipaux. À l'automne 2010 et au printemps 2011, des échantillons complémentaires ont été prélevés dans les 10 nouveaux forages au roc et dans les six nouveaux piézomètres dans les dépôts meubles. Au total, 119 puits ont été échantillonnés pour la zone à l'étude, ce qui correspond à une densité d'échantillonnage d'environ un puits par 25 km² (**Figure 19**). Les municipalités situées en aval de la zone d'étude étant pour la plupart reliées à un réseau d'aqueduc depuis de nombreuses années, très peu d'échantillons proviennent de cette zone.

Tous les échantillons ont été prélevés suivant le protocole développé par le GRIES pour l'ensemble des projets PACES (**Annexe 6**). Bien que généralement pompés de façon journalière, les puits ont été purgés avant l'échantillonnage. La stabilisation des mesures *in situ* de pH, température, salinité, conductivité électrique et d'oxygène dissous (mesurés au moyen d'une sonde multiparamètres *WTW*) ont permis d'estimer l'atteinte d'une purge satisfaisante. L'eau a généralement été prélevée à partir du robinet extérieur, après s'être assuré qu'aucun système de traitement de l'eau n'était présent entre le puits et le robinet. Pour les échantillons prélevés dans les nouveaux forages, les puits tubulaires ont été échantillonnés après pompage d'un volume d'eau équivalent à trois fois la colonne d'eau présente dans le puits et après stabilisation des paramètres physico-chimiques. Les piézomètres ont été purgés selon le même protocole que les puits au roc, mais à l'aide de tubages de type *Waterra*.

Tous les échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles polyéthylène de 250 ml. Les échantillons ont été filtrés *in situ* à l'aide de filtres jetables de nitrocellulose de 0,45 µm vissés à l'extrémité de seringues de 60 ml en polyéthylène, avant leur mise dans les bouteilles contenant un agent de conservation. Les échantillons ont été conservés dans des glacières où la température était maintenue inférieure à 4°C. À la fin de chaque

semaine, tous les échantillons étaient envoyés au laboratoire MAXXAM de Montréal pour l'analyse des paramètres chimiques présentés au **tableau 12**.

Les échantillons ont été prélevés dans 90 puits résidentiels, 13 forages municipaux et dans 16 nouveaux forages au roc ou dans les dépôts meubles. Parmi les 119 puits échantillonnés, 29 interceptent les dépôts meubles et 90 sont des forages au roc. La profondeur moyenne des puits aux stations situées dans les dépôts meubles échantillonnés est de 7 m tandis que celle aux stations interceptant le roc est de 44 m.

Tableau 12 Paramètres chimiques analysés

| Cations | | Anions |
|----------------|----------------|---|
| Aluminium (Al) | Lithium (Li) | Alcalinité totale (en CaCO ₃) |
| Antimoine (Sb) | Magnésium (Mg) | Anions sulfures (S=) |
| Argent (Ag) | Manganèse (Mn) | Azote ammoniacal (N-NH ₄) |
| Arsenic (As) | Molybdène (Mo) | Bromure (Br-) |
| Baryum (Ba) | Nickel (Ni) | Chlorures (Cl) |
| Béryllium (Be) | Plomb (Pb) | Fluorure (F) |
| Bismuth (Bi) | Potassium (K) | Nitrate(N) et Nitrite(N) |
| Bore (B) | Silicium (Si) | Phosphore inorganique |
| Cadmium (Cd) | Sélénium (Se) | Sulfates (SO ₄) |
| Chrome (Cr) | Sodium (Na) | |
| Calcium (Ca) | Strontium (Sr) | |
| Cobalt (Co) | Titane (Ti) | |
| Cuivre (Cu) | Uranium (U) | |
| Étain (Sn) | Vanadium (V) | |
| Fer (Fe) | Zinc (Zn) | |

Analyses isotopiques

Isotopes stables de l'eau (²H et ¹⁸O)

Des échantillons d'eau ont aussi été prélevés à chaque station d'échantillonnage pour les ions dans des bouteilles de HDPE de 30 ml. Ces bouteilles ont été envoyées au laboratoire des isotopes stables et légers du GEOTOP de l'UQAM pour analyse de la composition isotopique de la molécule d'eau (²H et ¹⁸O). Un suivi saisonnier (à quatre

moments durant 2010 et 2011) a également été réalisé dans les 16 forages et les piézomètres du projet. Des échantillons ont donc été prélevés en novembre 2010, février 2011, mai 2011 et septembre 2011. Des échantillons cumulatifs de précipitations ont également été prélevés tous les mois à deux stations météorologiques (Lemieux: 46°17' N, 72°06'O, élévation 90 m; Saint-Ferdinand: 46°08' N, 71°35'O, élévation 206 m) entre octobre 2010 et septembre 2011, dans le but de créer une droite météorologique locale.

Isotopes stables des nitrates (^{18}O et ^{15}N)

Les résultats des analyses pour les 119 échantillons ont permis d'identifier les sites où les concentrations en N-NO_3 étaient supérieures à 2 mg/L. Ces sites ont été ré-échantillonnés au printemps 2011 dans des bouteilles de 2 L en PE, stabilisés par l'ajout de KOH jusqu'à un pH de 10, et congelés jusqu'à leur analyse par spectrométrie de masse (*Micromass IsoChrom-EA*) au laboratoire « Environmental Isotope Laboratory » de l'Université de Waterloo (Ontario).

Radon (^{222}Rn)

Le radon (^{222}Rn) est un traceur largement utilisé dans l'évaluation des apports en eau souterraine dans les eaux de surface, tant dans les rivières (Cook et al., 2006; Cook et al., 2003; Stellato et al., 2007; Burnett et al., 2010), les lacs (Schmidt et Schubert, 2007), les milieux humides (Cook et al., 2008) et les environnements côtiers (Cable et al., 1996; Santos et Eyre, 2011), voire même à l'échelle d'un bassin versant (Gleeson et al., 2009). Produit de la désintégration radioactive de la série des isotopes de l'uranium, le radon a une courte demi-vie de 3,8 jours, ce qui permet de refléter les processus de mélange se produisant sur une courte échelle de temps. Il est chimiquement inerte et son activité est généralement deux à trois fois plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface. Ainsi les activités élevées en radon dans les eaux de surface reflètent les résurgences d'eau souterraine sur une courte distance puisque les concentrations en radon diminuent rapidement dans les rivières par dégazage à l'interface avec l'atmosphère (Cook et al., 2006).

Des échantillons d'eau destinés à la quantification de l'activité radiologique du ^{222}Rn ont été prélevés au cours de l'été 2011 dans les 10 forages au roc et les six piézomètres dans les dépôts meubles. Un suivi temporel de l'activité du ^{222}Rn dans la rivière Bécancour a été réalisé au cours de l'année 2011. Des échantillons ont été prélevés sous la glace en février 2011, de même qu'en avril, juin et juillet 2011. Chaque fois, entre cinq à dix sites étaient échantillonnés selon l'accessibilité des stations. Toutes les analyses ^{222}Rn ont été faites par scintillation liquide (compteur *Hidex*) à l'UQAM.

3.2.7 Caractérisation des tourbières

Des travaux de caractérisation ont été réalisés dans neuf tourbières de la zone d'étude (voir Avard, 2013 pour tous les détails). Des sites peu ou pas perturbés et représentatifs du gradient topographique de la région ont été choisis, soit les tourbières de Blanford, Defoy, Francoeur, Lac Rose, Lemieux, Mer Bleue, Plessis, Saint-Sylvère et Villeroy (**Figure 19**).

Sur chaque tourbière, les mesures suivantes ont été réalisées:

- Profondeur des dépôts organiques mesurée manuellement sur deux profils;
- Prélèvement de deux échantillons du dépôt minéral sous-jacent (sonde Hiller) pour analyse granulométrique;
- Levé géoradar sur un profil par tourbière, afin de préciser les profondeurs de tourbe entre les stations de mesure des profondeurs;
- Datation ^{14}C du début de l'entourbement pour quatre des neuf sites: Lac Rose, Mer Bleue, Saint-Sylvère et Villeroy (collaboration avec Martin Lavoie du Centre d'études nordiques de l'Université Laval).

3.2.8 Mesure des débits de base en période d'étiage

Afin d'obtenir de l'information hydrologique sur les rivières qui n'étaient pas instrumentées par le CEHQ, des mesures de débit en période d'étiages ont été réalisées dans les zones aval des rivières Noire, Bourbon, Blanche, aux Orignaux et Gentilly (**Figure 19**). Les mesures ont été réalisées lors des périodes d'étiages prolongés, en août 2009, 2010 et 2011. Les débits ont été mesurés selon la méthode des sections à l'aide d'un vélocimètre *Swoffer* (modèle 1200).

Des séries temporelles de débits de base ont aussi été fournies par le CEHQ pour six stations hydrométriques: trois sur la rivière Bécancour, une sur la rivière Gentilly, une sur la rivière Palmer et une sur la petite rivière du Chêne. Le CEHQ a utilisé le filtre d'Eckhardt (Poirier, 2012) pour estimer le débit de base.

3.3 Saisie, validation et archivage des données

En partenariat avec l'INRS-ETE, une base de données spatiale a été développée afin d'uniformiser l'information saisie à travers tous les projets PACES. À l'exception des données cartographiques de base (hydrographie, réseau routier, etc.), toutes les données utilisées pour bâtir les livrables y sont comptabilisées. Les données provenant des rapports gouvernementaux ou municipaux disponibles sous format papier ont été comptabilisées manuellement dans la base de données de l'UQAM. Les données de la base de données SIGPEG ont été comptabilisées manuellement à partir des données en accès libre du site internet de l'organisme. Les données du SIH, du MTQ, de la BADGEQ

et du MRN ont été fournies par les différents ministères sous forme de base de données numérique. Ces informations ont aussi été intégrées à la base de données.

3.3.1 Inventaire des données (sources et types)

Le **tableau 13** présente les différentes sources d'information ainsi que la quantité d'information saisie dans la base de données.

Tableau 13 Synthèse des informations intégrées à la base de données

| Sources | Format | Information comptabilisée |
|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Rapports de consultant | Rapports papier et numérisés | 146 forages |
| Rapports gouvernementaux | Rapports papier et numérisés | 360 forages |
| Système d'information hydrogéologique (SIH) | Base de données numérique | 7300 forages |
| Système d'information géoscientifique et pétrolier et gazier (SIGPEG) | Base de données en ligne | 136 forages |
| MRN | Base de données numérique | 4915 affleurements rocheux |
| Base de données géochimique (BADGEQ) | Base de données numérique | 3500 sites d'information géochimique |
| Ministère des Transports (MTQ) | Base de données numérique | 415 forages |

3.3.2 Protocoles de saisie, d'archivage et de validation

Le protocole de saisie et d'archivage des données développé par l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAT) a été utilisé lors de la saisie des données provenant des différentes sources. Ce protocole assure la traçabilité de l'information saisie dans la base de données et aussi la possibilité d'attribuer une cote de fiabilité de l'information saisie. Ces cotes servent ensuite d'indicateur de qualité de l'information ce qui permet de sélectionner les données en fonction des critères de qualité de chaque livrable.

4 CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONAUX

4.1 Géologie du socle rocheux

4.1.1 *Histoire géologique*

La zone d'étude couvre deux provinces géologiques majeures du sud du Québec, les Basses-Terres du Saint-Laurent et la zone géologique de Humber (Williams, 1979) ancienne marge continentale du palécontinent Laurentia. Ces roches ont surtout été affectées par la déformation Taconienne, première phase de l'orogénèse (formation de chaîne de montagnes) appalachienne au cours de l'Ordovicien (471-455 Ma; Castonguay et al., 2001). Ce premier épisode orogénique est attribuable, à cette époque, à la fermeture du paléo Océan Iapétus pour aboutir à la formation des Appalaches. Une partie des roches de cette chaîne de montagnes sont des shales, vestiges du fond océanique de l'océan Iapétus qui ont été métamorphisés en schiste et en phyllade durant la formation de la chaîne de montagnes. L'érosion rapide de cette chaîne de montagnes durant l'Ordovicien a enseveli le plateau continental de sédiments tels que des shales et des grès, qui affleurent en aval de la zone d'étude. La ligne de Logan marque la limite entre les roches détritiques issues de cette érosion et celles issues de l'orogénèse Taconienne. Durant le Dévonien moyen à tardif (390-376 Ma), une seconde phase orogénique (la déformation Acadienne) a affecté ces roches, mais de manière moins pénétrative, contribuant notamment à la formation du synclinal de Chambly-Fortierville, dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, et à la formation de nombreuses failles de chevauchement.

4.1.2 *Stratigraphie et lithologies*

La géologie de la zone d'étude a été cartographiée par plusieurs auteurs qui ont couvert les parties Basses-Terres du Saint-Laurent et Appalaches. Les descriptions lithologiques décrites ici proviennent des travaux de Globensky (1987) pour les Basses-Terres du Saint-Laurent et de Slivitsky et Saint-Julien (1987) pour la zone appalachienne. La zone d'étude compte 17 formations géologiques présentes à l'affleurement et dans les premières dizaines de mètres sous la surface. Dans le **tableau 14**, les formations sont présentées chronologiquement, de la plus récente à la plus ancienne. Mis à part les Formations de Bécancour et de Nicolet qui sont superposées stratigraphiquement au sein du synclinal de Chambly-Fortierville, les unités géologiques présentées dans ce tableau ont une étendue verticale relativement limitée. Les formations les plus jeunes sont situées à l'aval, près du fleuve Saint-Laurent, et les plus anciennes en amont de la zone d'étude (**Figure 21**).

- Le Groupe de Sillery est composé principalement de schiste argileux rouge, vert et gris, avec localement des interlits de siltstone de moins de 15 cm d'épaisseur.
- La Formation de Lévis est principalement constituée de schiste argileux et de mudstone vert, gris et rouge avec des interlits de conglomérat calcaire.

- La Formation de Bourret se compose de schiste argileux et d'ardoise noire avec des interlits de calcaire argileux, de grès, de dolomie et de conglomérat calcaire.
- La Formation de Bulstrode se compose d'un assemblage d'ardoise calcareuse et graphitique gris-noir avec des interlits de calcaire graphitique noir et la présence des fragments de fossiles. L'assemblage est formé d'ardoise en lits de 10 cm à 1 m d'épaisseur et d'interlits de sédiments détritiques et dolomitiques de 1 à 10 cm d'épaisseur. On trouve localement du calcaire argileux et du mudstone calcareux, en bancs massifs ou laminés.
- L'Olistostrome de la rivière Etchemin se compose d'un schiste argileux rubané noir et jaunâtre contenant des blocs de grès grossier, de mudstone vert ou brunâtre silicifié, de chert à radiolaires, de schiste argileux noir bitumineux, de calcaire gris bien lité, de calcaire et de siltstone dolomitique.
- La Formation de Tibbit Hill est composée de schiste et de phyllade vert foncé.
- La Formation de Pinnacle comprend des lits de quartzite impurs gris-verdâtre, localement conglomératique alternant avec des lits de schiste gris et gris-vert.
- La Formation de West Sutton est constituée de phyllade rouge et de phyllade à hématite gris à gris-bleu, localement conglomératique.
- La Formation de Gilman se compose de phyllade grise à quartz et grès très fins. On y retrouve aussi des lits de quartzite, impurs et schisteux, contenant des lentilles centimétriques de quartz-feldspath.
- La Formation de Dunham comprend du marbre dolomitique gris, massif ou lité, et du marbre calcaro-schisteux blanchâtre.
- La Formation de Sweetsburg comprend une alternance de petits lits d'ardoise ou de phyllade gris-foncé à gris-noir 2 mm à 1 cm d'épaisseur et de lamines quartzo-dolomitiques blanchâtres avec quelques niveaux de schistes à chlorite.
- La Formation de Nicolet est principalement composée de shale gris à bleu-noir, silteux, micacé et fissile, se débitant facilement en fragments lenticulaires. Elle contient des interlits de grès à grains fins lenticulaires et discontinus, de siltstone argileux et de calcaire gréseux. Les valeurs géochimiques varient comme suit à l'intérieur de la formation: le titane augmente de la base au sommet et un intervalle riche en manganèse est présent dans la partie supérieure.
- La Formation de Pontgravé est similaire à celle de Nicolet, mais présente une plus grande abondance de lits de calcaire et de grès calcareux. Ces calcaires sont coquinoïdes et sont interstratifiés de shale gréseux et localement de grès. Il y a répétition de ces trois lithologies, de façon cyclique, avec toujours les calcaires coquinoïdaux à la base. Cette formation est la plus fossilifère des Basses-Terres du Saint-Laurent; elle contient une faune à coquille très importante. La région du centre industriel de Bécancour est particulièrement fossilifère.
- La Formation de Bécancour occupe le centre du synclinal de Chambly-Fortierville. Elle est composée de dépôts continentaux et subaériens déposés dans un delta à l'ouest de la zone de Humber. Ces dépôts sont formés principalement de shale rouge, verdâtre contenant quelques interlits de grès verts, ainsi que des lits de siltstone et des lentilles de gypse et d'anhydrite. De plus, les interlits de grès sont plus abondants vers le sommet de la formation.

Tableau 14 Stratigraphie des unités géologiques

| Groupe | Formation | Époque | Lithologie |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Queenston | Bécancour | Ordovicien supérieur | Shale rouge, grès vert |
| Lorraine | Pontgravé | Ordovicien supérieur | Calcaire, shale |
| Lorraine | Nicolet | Ordovicien supérieur | Shale, grès |
| - | Olistostrome riv. Etchemin | Ordovicien moyen | Shiste à bloc |
| Sainte-Rosalie | Sainte-Sabine | Ordovicien moyen | Ardoise, dolomie |
| - | Bulstrode et Melbourne | Ordovicien moyen | Ardoise, calcaire |
| - | Bourret | Ordovicien moyen | Ardoise, calcaire, grès |
| - | Lévis | Ordovicien inférieur | Mudstone, calcaire |
| Sillery | - | Cambrien inférieur | Shiste, grès |
| Saint-Roch | Montagne de Saint-Anselme | Cambrien inférieur | Volcanite basique |
| Oak Hill | Sweetsburg | Cambrien inférieur à moyen | Ardoise, conglomérat |
| Oak Hill | Dunham | Cambrien inférieur à moyen | Dolomie |
| Oak Hill | Gilman | Cambrien inférieur à moyen | Phyllade, shiste, quartzite |
| Oak Hill | West Sutton | Cambrien inférieur à moyen | Phyllade |
| Oak Hill | Pinnacle | Cambrien inférieur à moyen | Quartzite, shiste |
| Oak Hill | Tibbit Hill | Cambrien ? | Phyllade |

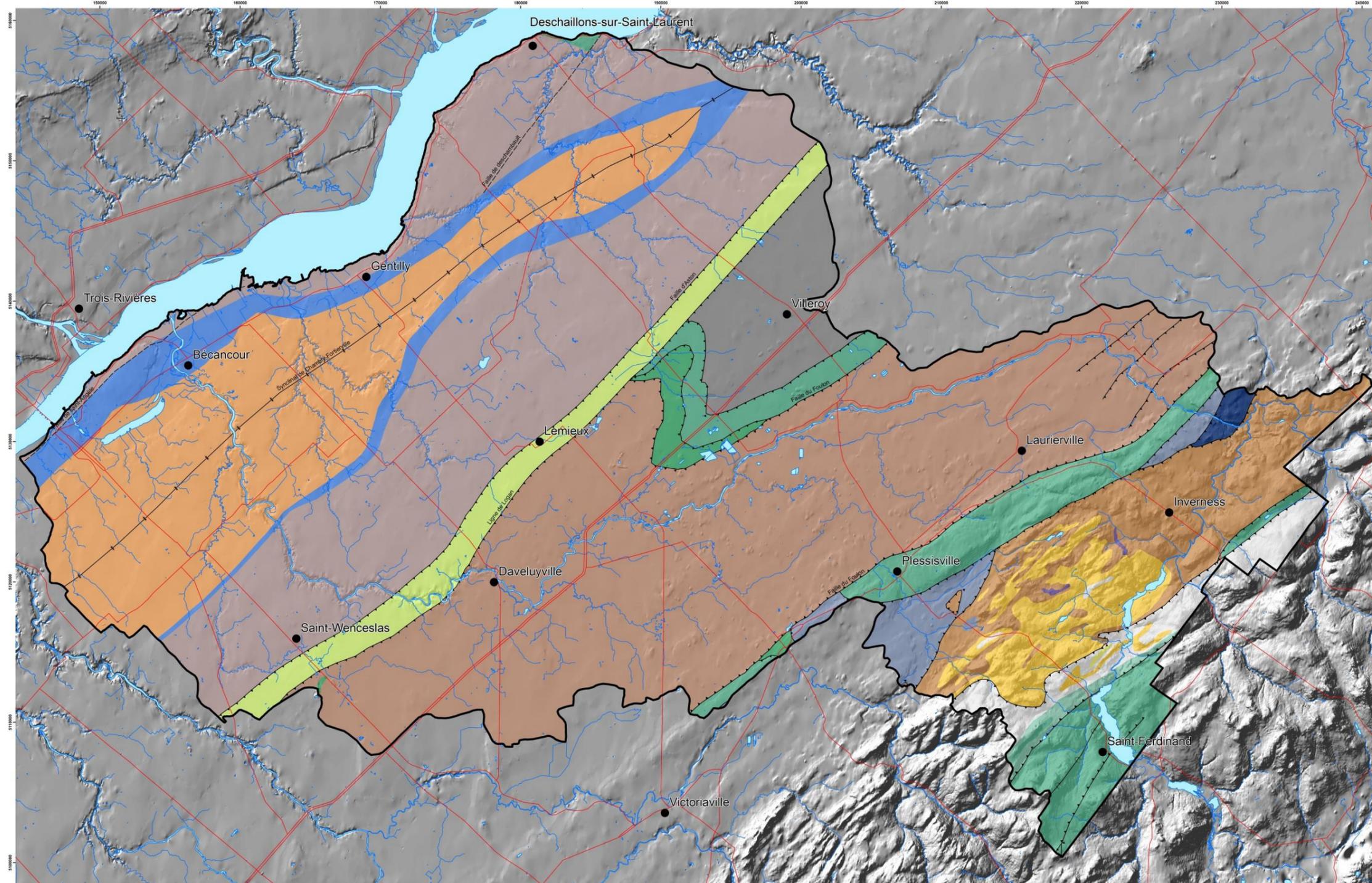
4.1.3 Géologie, structure et fracturation

La ligne de Logan marque le front de l'orogène appalachien, délimitant la portion imbriquée des Basses-Terres du Saint-Laurent et les nappes de chevauchement allochtones de la zone de Humber (St-Julien et Hubert, 1975). Les roches de la zone située entre le fleuve Saint-Laurent et le piémont appalachien sont principalement des shales, des calcaires et des grès datant de l'Ordovicien supérieur à supérieur moyen (443-460 MA). Le long de l'autoroute 20, on retrouve cependant des horizons de roches volcaniques basiques qui sont parfois exploitées pour la roche concassée. De même, dans le piémont on retrouve la Formation de l'Olistostrome de la rivière Etchemin qui est

un schiste à blocs polygéniques, elle aussi exploitée pour la roche concassée. Vers l'amont du bassin, le niveau de métamorphisme des roches augmente et l'on retrouve principalement des schistes, des phyllades et des quartzites du Cambrien inférieur à moyen (541-509 Ma). Ces roches sont généralement plus fracturées que les roches des Basses-Terres du Saint-Laurent dû à la schistosité et à leur plus fort degré de déformation.

Les roches appalachiennes sont fortement plissées et sont parcourues par un important réseau de failles (**Figure 20**). Les roches des Basses-Terres du Saint-Laurent sont quant à elles légèrement plissées et forment le large synclinal de Chambly-Frotierville. Cette structure, ainsi que les systèmes de failles d'Aston et de Logan, sont orientés NE-SO parallèlement au grain tectonique appalachien. Les formations des Basses-Terres du Saint-Laurent exposées dans la zone d'étude ont un faible pendage vers le sud-est et sont parcourues par un réseau de failles de chevauchement. Sur la **figure 20**, il est possible d'observer la succession verticale des formations géologiques. Dans la partie centre et droite de la figure, la formation de Nicolet (Groupe de Lorraine) occupe une part importante de la stratigraphie avec une épaisseur pouvant atteindre 1 km. Les shales d'Utica en brun, sous la Formation de Nicolet sont les roches ciblées pour l'exploitation des gaz de shale.

Dans le cadre de cette étude, le système hydrogéologique étudié ne s'étend que sur les premiers 100 m d'épaisseur du socle rocheux. Il n'y a donc pas de variation verticale importante de la géologie dans le système étudié, cela ayant été confirmé par les forages du roc réalisés durant le projet. Cependant, dans la partie nord-est du synclinal de Chambly-Fortierville, dans la Formation de Bécancour, des venues d'eau ont été observées provenant de fractures localisées au contact entre des unités de shale rouge et de grès fin verts identifiées dans les forages. Au niveau de la fracturation du roc, la majorité des forages réalisés dans ce projet ont montré un niveau de fracturation du roc important dans les 10 premiers mètres. Plus en profondeur (30 m), peu de fractures importantes ont été rencontrées en forage. Ces observations sont confirmées par la faible transmissivité du roc généralement observée dans la zone d'étude.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude

Linéaments

- Faille indéterminée
- ↔ Faille inverse direction 1
- ↔ Faille inverse direction 2
- ↔ Trace axiale d'une synforme déversé
- ↔ Trace axiale d'une synforme

Géologie du roc

- Formation de Bécancour
- Formation de Nicolet
- Formation de Pontgravé
- Groupe de Sillery
- Formation de la Montagne de Saint-Anselme
- Formation de Sweetsburg
- Formation de Dunham
- Formation de Gilman
- Formation de West Sutton
- Formation de Pinnacle
- Formation de Tibbit Hill
- Formations de Sainte-Sabine et de Les Fonds
- Olistostrome de la rivière Etchemin
- Formation de Bourret
- Formation de Lévis
- Formations de Bulstrode et de Melbourne



MÉTADONNÉES
Section 4.1.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 21 Géologie du roc
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Géologie du roc: SIGEOM 250K
Linéament: SIGEOM 250K
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'origine ne donnent aucune garantie quant à l'exactitude, ou quant à l'adéquation à une fin particulière de toute donnée extraite de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de conservation des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

4.2 Géologie du Quaternaire

Les travaux de caractérisation des dépôts meubles ont été réalisés en collaboration avec Michel Lamothe, professeur à l'UQAM. Un étudiant de maîtrise en Sciences de la Terre, Pierre-Marc Godbout (Godbout, 2013) a mené la plupart des travaux dans ce volet du projet PACES-Bécancour. Ses résultats ont été présentés lors de conférences (Godbout et al., 2011a; Godbout et al., 2010). Ils ont fait l'objet d'un rapport déposé au Ministère des Ressources naturelles (Godbout et al., 2011b). Une excursion de géologie du Quaternaire et d'hydrogéologie a été organisée sur la zone d'étude du PACES-Bécancour en août 2011, dans le cadre du colloque annuel de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues. Cette excursion a réuni 25 participants et a fait l'objet d'un livret-guide d'excursion (Godbout et al., 2011c).

4.2.1 Histoire du Quaternaire

La distribution des sédiments quaternaires a été cartographiée par plusieurs auteurs. Lamothe et Allard (2009) en ont fait une mosaïque qui montre bien la variabilité marquée des unités lithostratigraphiques ainsi que le manque d'intégration des cartes publiées. La sous-surface a été abordée lors de la campagne de l'été 2010. Sa complexité est apparente, au vu des travaux de Gadd (1971) et Lamothe (1985).

Une séquence quaternaire complexe surmonte le socle rocheux et peut atteindre plus de 100 m d'épaisseur dans la partie aval du bassin de la Bécancour et dans les sous-bassins où coulent des tributaires du fleuve Saint-Laurent. La séquence quaternaire comprend une succession de deux à trois tills séparés par des sédiments glaciolacustres fortement imperméables de par leur granulométrie, leur texture et aussi leur état de surconsolidation. Des sédiments granulaires (sables et graviers essentiellement) sont présents dans la séquence et leur étendue est généralement discontinue. Lors de la déglaciation, un bref épisode de transgression marine a succédé au retrait glaciaire. Ce dernier a abandonné des épandages fluvioglaciaires qui peuvent localement surmonter directement le soubassement rocheux, en particulier le long du piémont appalachien.

La séquence stratigraphique complète comprend trois tills. Localement, les épaisseurs cumulées peuvent être très importantes et dépasser les 90 m. L'unité de base est représentée par le Till de Bécancour, d'âge pré-Sangamonien (probablement Illinoien). Le Till de Gentilly est le till de surface qui a été déposé lors de la dernière grande avancée glaciaire et il recouvre l'ensemble de la région. Le réseau de drainage étant structuré vers le NE, les avancées et retraits du glacier peuvent provoquer la création de lacs glaciaires, ce qui explique que des sédiments laminés glaciolacustres (peut-être des varves) sont présents au sommet et/ou à la base de chaque couche de till. L'unité glaciaire suivante est le Till de Lévrard, qui date du début de la glaciation wisconsinienne. Le retour à des conditions normales de drainage est représenté par les sédiments fluviatiles, lacustres et organiques des formations de Lotbinière et de Saint-Pierre.

La déglaciation finale a mis en place successivement des sédiments fluvioglaciaires et glaciolacustres. L'épisode de la Mer de Champlain a suivi lorsque la glace s'est retirée de la vallée du Saint-Laurent, permettant par le fait même à l'océan Atlantique d'inonder les Basses-Terres sous les élévations d'environ 180 m. Enfin, le réseau fluvial actuel s'est progressivement mis en place lors de l'Holocène.

4.2.2 Stratigraphie des dépôts meubles

La zone d'étude compte 34 unités stratigraphiques quaternaires. À l'échelle de la zone d'étude, il était impossible d'intégrer verticalement, la stratigraphie de ces 34 unités. Un modèle simplifié, basé sur la description granulométrique et sur les propriétés hydrauliques des différentes unités, a été développé pour construire le modèle hydrostratigraphique de la zone d'étude. Le **tableau 15** montre le passage du modèle stratigraphique détaillé au modèle simplifié. Ce dernier compte neuf unités hydrostratigraphiques, dont cinq unités aquifères (perméables) et quatre unités aquitard (imperméables).

4.2.3 Couverture de dépôts meubles

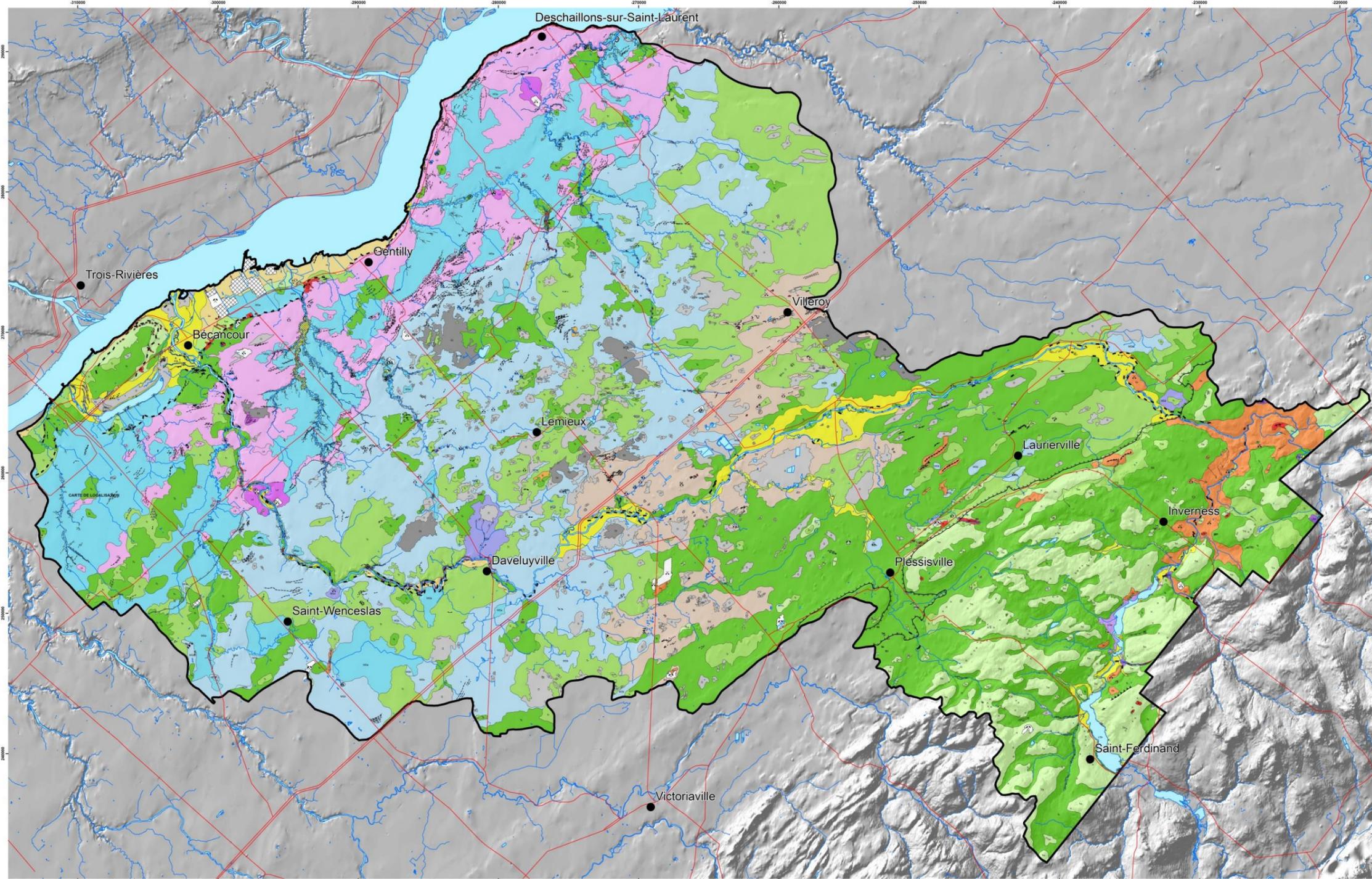
La **figure 22** illustre la répartition spatiale des dépôts quaternaires sur la zone d'étude. Cette carte est disponible en format vectoriel et image auprès du Ministère des Ressources naturelles du Québec. Les principales caractéristiques sédimentologiques et cartographiques des unités lithostratigraphiques de la région étudiées en 2009 et 2010 sont décrites en termes de texture, structure, couleur, compacité, composition lithologique dans la légende étendue de la carte géologique. Les contacts et limites stratigraphiques inférieurs et supérieurs, ainsi que la distribution régionale, permettent de mieux apprécier la représentation cartographique finale. Les éléments présentés plus bas servent à compléter la description des unités.

Le Quaternaire ancien (Q)

Cette unité complexe affleure d'une façon relativement continue le long du fleuve Saint-Laurent en aval de Gentilly et le long des tributaires importants du fleuve comme la Bécancour, la Gentilly et la Petite rivière du Chêne. Cette unité englobe les sédiments glaciolacustres deltaïques et prodeltaïques des sables des Vieilles Forges et les sédiments lacustres corrélés avec les Rythmites du Saint-Maurice.

Tableau 15 Stratigraphie des dépôts meubles

| Contexte hydrogéologique | Unité géologique | Unité hydrostratigraphique |
|--------------------------|------------------|----------------------------|
| | Cg | |
| | Ot | |
| | O | |
| | Ed | |
| Unité perméable | Ap | U1 |
| | Ac | |
| | At | |
| | Ax | |
| | Ld | |
| | Lb | |
| Unité perméable | MGb | U3 |
| | MGd | |
| Unité imperméable | MG | U4 |
| | MGa | |
| | MG | |
| | MGa | |
| Unité perméable | Gx | U7 |
| | G | |
| | Trm | |
| | Tr | |
| Unité imperméable | Tf | U8 |
| | Tm | |
| | Tc | |
| Unité perméable | G | U9 |
| | LGa | |
| Unité imperméable | LGd | U10 |
| | La | |
| | A et O | |
| | MGa | |
| Unité perméable | Tc | U11 |
| | LGa | |
| Unité imperméable | A | U12 |
| | LGa | |
| | Tc | |
| | A | |



LÉGENDE

| | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| ● Ville | Autres informations |
| — Réseau routier | ○ AFFLEUR_ROC |
| — Hydrographie linéaire | ○ COUPE |
| — Hydrographie surfacique | ◁ DELTA |
| ⊞ Zone d'étude | ○ FORAGE |
| Dépôts quaternaires | ○ FOSSILE |
| Dépôts de versant | × GRAV_SABL |
| ■ Cg | × GRAV_SABL_ABAN |
| ■ Sédiments organiques | × MINE |
| ■ Ot | × MINE_ABAN |
| ■ O | |
| Dépôts éoliens | |
| ■ Ed | Lignes |
| Sédiments alluviaux | — BARRE_ALLUV |
| ■ A | — CHENAL |
| ■ Ap | — CHENAL_FONTE |
| ■ At | — CHENAL_INC |
| ■ Ax | — CHE_JUXTA |
| Sédiments lacustres | — CICATR_GLISS |
| ■ Ld | — CR_MOR_MIN |
| ■ Lb | — DUNE |
| Sédiments glaciomarins | — ESCARP_ROC |
| ■ MGd | — ESKER_ENFOUI |
| ■ MGb | — FORM_EOLIENNE |
| ■ MGA | — LIM_LACUSTRE |
| Sédiments glaciolacustres | — LIM_MARINE |
| ■ LGd | — PLAGE |
| ■ LGa | — RAVIN |
| Sédiments fluvioglaciaires | — RAVIN_MIN |
| ■ Gx | — TERRASSE_FLU |
| ■ G | — TERRASSE_LAC |
| Sédiments glaciaires | |
| ■ Trm | Polygones |
| ■ Tr | ■ Gravière/sablière |
| ■ Tc | ■ Mine |
| ■ Tm | ■ Remblai |
| Quaternaire ancien | ■ Zone de glissement |
| ■ Q | |
| Substrat rocheux | |
| ■ R | |



MÉTADONNÉES
Section 4.2.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 22 Géologie du Quaternaire
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique : BNDT 20K
Réseau routier : BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MRN 20K
Géologie du Quaternaire : Godbout, 2013
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliation ne donnent aucune garantie quant à l'exactitude, ou quant à l'utilisation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagnon, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013.
Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

Les sédiments glaciaires (Tf, Trm, Tr, Tc, Tm)

Le till de surface, qu'il soit mince ou continu, remanié ou non, couvre en majeure partie, les portions centrale et amont du territoire à l'étude. Ce diamicton glaciaire affleure surtout dans le secteur appalachien et dans la zone du piémont, dans la portion nord-est du bassin versant et près de la région de Bécancour, notamment dans le secteur de Sainte-Angèle-de-Laval, là où la couverture de dépôts meubles près du fleuve est faible. Les épaisseurs observées vont de 0,3 m (Tm) à plus de 20 m (Tc) dans les Basses-Terres, notamment le long de la Petite rivière du Chêne, tandis qu'elles atteignent rarement plus de 10 m dans les vallées des Appalaches. Ce diamicton est caractérisé par une matrice comprenant une grande proportion de silt, et des quantités variables d'argiles, de sables, graviers, galets et blocs, dont plusieurs proviennent du Bouclier Canadien. Le till de fond est assez pauvre en blocs et caractérisé par une très grande proportion de matrice argilo-silteuse. Le till non-altéré est gris-verdâtre, compact, normalement non-fissile et carbonaté dans les Basses-Terres et le piémont. Pour ce qui est de la région appalachienne, le till de surface est non-carbonaté et exhibe ordinairement un faciès gris et compact à la base et un faciès gris-brunâtre et lâche en surface. La proximité des sources fait en sorte que la proportion de clastes augmente de manière significative dans les Appalaches. Le till y est donc moins compact et plus fissile. Le till remanié (Tr) est un till dont les particules fines ont été lessivées par des processus subséquents au dépôt du matériel original. Généralement, il correspond à la zone superficielle du till où la portion fine de la matrice est lavée par des processus d'érosion littorale glaciomarine, glaciolacustre ou même fluviale.

Les sédiments fluvioglaciaires (Gx, G)

Les sédiments fluvioglaciaires ont été identifiés sur la base de la morphologie du corps sédimentaire, la présence de sable fin, moyen et grossier, de galets et de graviers subanguleux à subarrondis, triés ou non, et de déformations synsédimentaires. Le volume de sédiments fluvioglaciaires est particulièrement faible régionalement. Il y a peu de sédiments de contact glaciaire associés à la Moraine des Hautes Terres (Gadd, 1964), sauf dans certaines portions hautes des rivières Bécancour et Palmer où les accumulations parfois stratifiées peuvent atteindre des épaisseurs supérieures à 30 m. Quelques amas formant des terrasses de kame et des buttes de matériel juxtaglaciaire ont également été identifiés dans les secteurs amont et aval du lac William. Dans la zone du piémont, les sédiments fluvioglaciaires se présentent surtout sous la forme d'une série de crêtes discontinues subparallèles (Gadd, 1964) situées entre la rivière Bécancour et le contrefort appalachien, où des moraines en creux et en bosses sont visibles dans le secteur de Lysander Falls (Lortie, 1976). Suite aux observations de terrain, ces crêtes, dont certaines sont exploitées, sont plutôt constituées d'un assemblage hétérogène et sans structure de clastes centimétriques à métriques subanguleux à subarrondis, dont plusieurs d'origine précambrienne, soutenus par une matrice de sable fin à grossier et reposant directement sur le roc. Dans la zone des Basses-Terres, les sédiments fluvioglaciaires forment des amas isolés partiellement enfouis ou remaniés par les eaux de la Mer de Champlain. Notamment, une ancienne gravière située à environ 5 km à

l'ouest de Manseau et une gravière-carrière située à environ 7,5 km au sud de Manseau près de l'autoroute 20 exhibent des sédiments proglaciaires non-différenciés. Sur le site de cette dernière, près de 8 m de sédiments fluvioglaciaires mis en place directement sur le roc et enfouis sous des sédiments glaciomarins littoraux sont visibles.

Les sédiments glaciolacustres (LGd, LGb, LGa)

Les sédiments glaciolacustres se retrouvent uniquement dans les Appalaches. Des séquences de sédiments fins, localement rythmés, et des sables littoraux et deltaïques ont été observés en petits amas localisés le long de la rivière Bécancour jusqu'à la hauteur du lac William, et surtout le long de la rivière Palmer où ils sont visibles à des élévations allant jusqu'à 355 m (Gadd, 1978). Les sédiments fins sont composés d'argiles et de silts et s'observent surtout sous forme massive. Les sédiments deltaïques sont surtout composés de sable fin à grossier et de graviers généralement bien triés et stratifiés, quoique des bancs de sable massifs ont été observés.

Les sédiments glaciomarins (MGd, MGb, MGA)

À partir du front appalachien, et ce jusqu'au fleuve Saint-Laurent, affleurent des sédiments littoraux et pélagiques qui contiennent localement des fossiles de la Mer de Champlain. Même si apparemment non-fossilifères, les sédiments d'origine aquatique localisés sous l'élévation de 175 m (Parent, 1987) sont aussi cartographiés comme glaciomarins. Le faciès deltaïque glaciomarine (MGd) a été identifié à trois endroits sur le territoire à l'étude. Ces épandages deltaïques sont tous situés sur le parcours de la rivière Bécancour, où le premier s'est formé à un niveau correspondant à la limite marine maximale, le second a été mis en place à une élévation de 80 m tandis que le dernier marque la transition Mer de Champlain-Lac à Lampsilis à la limite de 65 m. Les sédiments marins peu profonds comprennent des sables et des graviers généralement bien triés, une faible quantité de silts ou de graviers, avec des structures sédimentaires typiques des milieux littoraux. Ils sont généralement de couleur grisâtre à brunâtre et montrent parfois des signes d'oxydation. Leur extension verticale est limitée aux zones supérieures à 65 m. Les sédiments pélagiques sont surtout constitués d'argiles massives, bleutées, parfois silteuses et litées. On les rencontre dans des anciens chenaux, généralement sous l'élévation de 100 m.

Les sédiments lacustres (Ld, Lb)

Sous les élévations d'environ 65 m, on observe de grandes zones sableuses d'origine soit deltaïque ou littorale, remaniées par les eaux douces du Lac à Lampsilis. Des travaux récents (Ouimet et al., 2011) supposent la présence d'importants volumes de sables des Vieilles Forges sous-jacents. Quoique la majorité des sédiments déposés au cours de cet événement reflète l'exondation, certaines unités plus fines, silteuses et légèrement rythmées montrent la présence d'un faciès plus pélagique dans ce bassin dont les caractéristiques demeurent peu connues. Ces sédiments comprennent aussi des

éléments fluviaux et estuariens, mais la division fine de ces unités n'a pas encore été effectuée.

Les sédiments alluviaux (Ap, Ac, At, Ax, A)

Les sédiments d'origine fluviale, localisés à une élévation légèrement supérieure à celle du système de drainage actuel, sont cartographiés comme sédiments alluviaux. Ces derniers sont majoritairement concentrés tout le long de la rivière Bécancour, à partir de la limite nord des Appalaches, où ils délimitent l'ancienne plaine alluviale et les terrasses adjacentes. Près du fleuve Saint-Laurent, ces sédiments et formes fluviales sont rattachés à la phase du Proto-Saint-Laurent. Cette unité inclut les sédiments actuellement transportés par les rivières modernes.

Les sédiments éoliens (Ed)

Présents sur la partie centrale de la région à l'étude, les sédiments éoliens sont notamment situés au cœur des unités littorales glaciomarines à des élévations allant de 70 à 130 m, où des dunes paraboliques d'une hauteur moyenne de 5 à 8 m avec des maximums de 20 à 25 m sont présentes (Filion, 1987). Les champs de dunes s'observent normalement dans un axe NE-SO de part et d'autre de l'autoroute 20, de Saint-Louis-de-Blandford jusqu'à Villeroy, de même qu'au nord-est du village de Saint-Rosaire. Les sédiments éoliens sont normalement constitués de sables moyens à fins, très bien triés et stratifiés, remaniés à partir de sédiments marins littoraux ou deltaïques (Chauvin, 1979; Gadd 1955, 1960, 1971; Filion, 1987). L'activité éolienne à l'origine de ces champs de dunes paraboliques aurait subsisté pour une durée de 2500 années ^{14}C , soit pour une période variant entre 10000 et 7500 ans A.A. (Filion, 1987). Les sédiments éoliens sont fréquemment observés autour des tourbières, où l'activité éolienne a ainsi remanié le matériel granulaire disponible jusqu'à son immobilisation par la végétation.

Les sédiments organiques (Ot, O)

Les sédiments organiques observés régionalement sont surtout des tourbières. Généralement, il y a un lien entre l'unité sous-jacente et la densité de tourbières. Dans le bassin versant de la Bécancour, ces milieux humides sont parfois rencontrés sur des plateaux d'élévation de l'ordre de la centaine de mètres, au-dessus des argiles de la Mer de Champlain (tourbière de Saint-Sylvère), elles-mêmes localisées sous des sables d'exondation marine. Cependant, la majorité des sédiments organiques se retrouvent sur de faibles épaisseurs de sédiments littoraux glaciomarins (tourbière du Lac Rose), sur le till de surface ou directement sur le roc.

Les dépôts de versant (Cg)

Les dépôts de glissement de terrain ont été surtout cartographiés le long des rivières Gentilly et Gentilly sud-ouest. Cette unité, surtout formée de silts et d'argiles remaniés, est principalement identifiable grâce aux éléments géomorphologiques qui y sont associés.

La classification de ces dépôts s'est faite suivant l'identification d'amphithéâtres, de gradins et de cicatrices de glissement.

4.2.4 Architecture des sédiments

Un modèle tridimensionnel de l'hydrostratigraphie des dépôts meubles a été construit afin de mieux comprendre les contextes hydrogéologiques et d'obtenir l'information stratigraphique nécessaire à la réalisation de plusieurs livrables (indice de confinement, évaluation de la recharge, indices DRASTIC). Ce modèle a été réalisé conjointement avec l'équipe de cartographie quaternaire de l'UQAM. Il est basé sur les épaisseurs de dépôts meubles et la topographie du roc, en plus de tous les forages au roc, des levés géologiques et géophysiques (voir **Annexe 7** pour le détail des levés géophysiques, rapport de Pelletier, 2010).

À la base de la construction du modèle 3D, une cinquantaine de coupes ont été décrites, et plus de 1000 forages de sources diverses (SIH, SIGPEG, consultants, etc.) couvrant la totalité de la zone cartographiée ont été interprétés en fonction du modèle conceptuel hydrostratigraphique présenté à la **section 4.2.2**. Les descriptions détaillées des coupes stratigraphiques réalisées par l'équipe de quaternaristes de l'UQAM, ainsi que les forages réalisés dans le cadre du projet constituent les données les plus fiables pour le modèle 3D régional. Ces descriptions sont représentées dans le mémoire de Gobout (2013). À partir de ces données, 170 coupes topogéologiques ont été réalisées sur la zone Bécancour à l'aide du logiciel GMS8.0. Ces coupes ont été construites en reliant entre elles les données stratigraphiques les plus fiables (coupes naturelles et forages au roc) interprétées selon le modèle conceptuel hydrostratigraphique et en ajustant les contacts géologiques en fonction des surfaces d'érosion, de l'incision des rivières et de la topographie du roc. Combinées à la carte de la topographie du roc, ces coupes ont par la suite permis de contraindre le modèle 3D lors de l'interpolation des surfaces et des volumes.

Épaisseur des dépôts meubles

La réalisation d'une carte de l'estimation de l'épaisseur des dépôts meubles est essentielle à la connaissance des systèmes aquifères et aquitard granulaire d'une région. Elle donne un aperçu du rôle que les dépôts granulaires peuvent jouer dans la dynamique de l'écoulement souterrain et dans la recharge de l'aquifère du roc fracturé (**Figure 23**). L'épaisseur des dépôts meubles peut aussi s'avérer utile dans d'autres domaines que l'hydrogéologie comme la construction d'infrastructures et le transport. L'**Annexe 8** décrit comment cette carte a été réalisée.

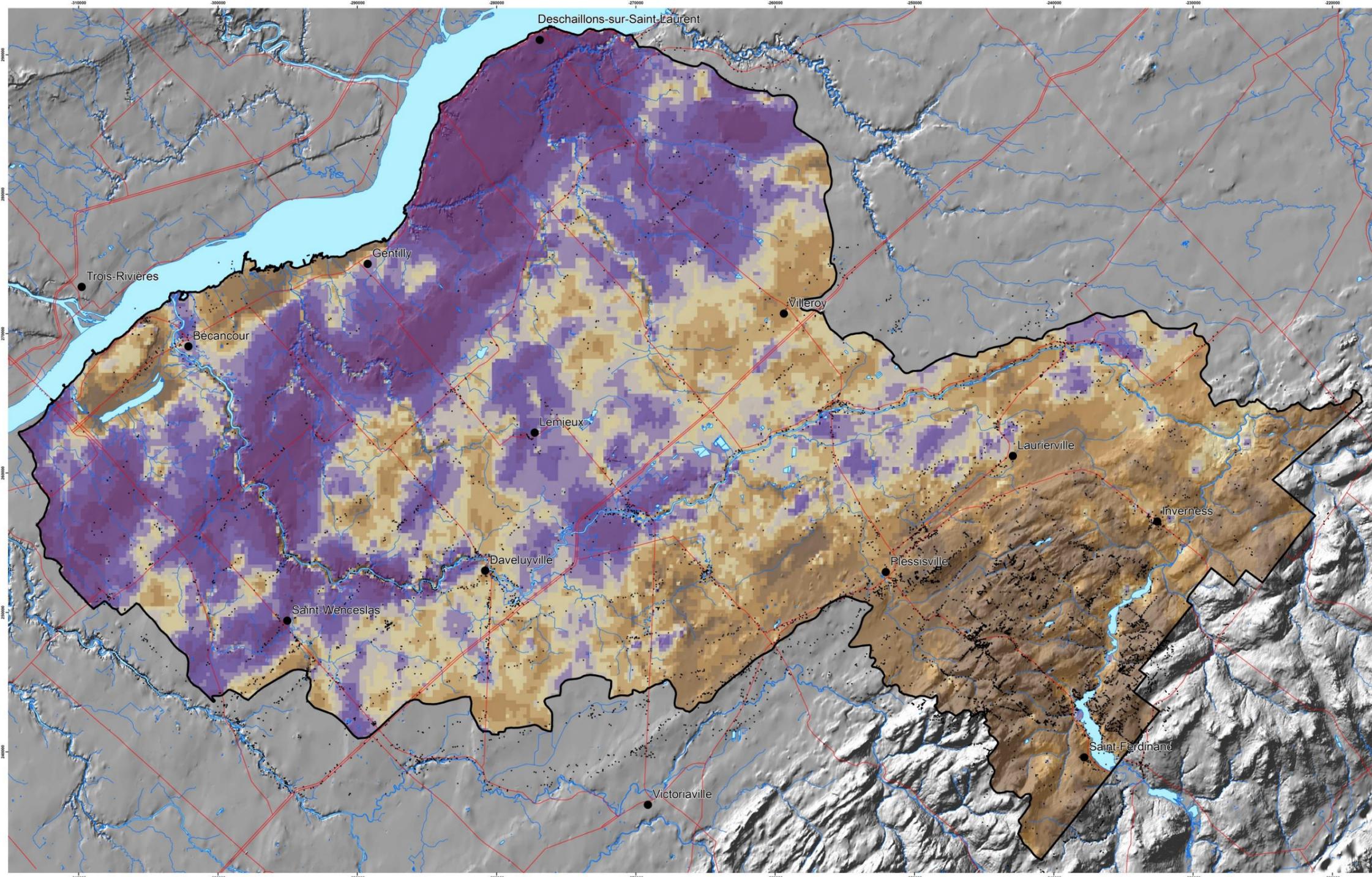
L'axe du synclinal de Chambly-Fortierville est la zone où les épaisseurs sont les plus importantes, plus précisément dans le secteur compris entre les rivières Petite du Chêne et aux Orignaux. À cet endroit, l'épaisseur des dépôts peut atteindre 90 m. Le secteur central de la rivière Gentilly, là où un aquifère granulaire important est situé, comporte des

zones ayant une épaisseur de 40 à 60 m. Des dépôts meubles ayant des épaisseurs supérieures à 40 m sont aussi présents le long de la partie aval de la rivière Bécancour. Ces dépôts se seraient accumulés dans la vallée creusée dans le roc par la rivière Bécancour. Dans la partie amont, l'épaisseur des dépôts meubles n'excède pas 20 m. Ces zones d'accumulation sont principalement localisées dans la vallée du lac William et de la rivière Bécancour.

Topographie du roc

La topographie du roc a été calculée en soustrayant la couche d'épaisseur des dépôts meubles au modèle numérique altimétrique. De façon générale le roc suit la même tendance que la topographie de surface, avec une diminution progressive de l'élévation du piémont des Appalaches vers le fleuve Saint-Laurent, à l'exception de la vallée de la rivière Bécancour et de la zone située entre les rivières aux Orignaux et Petite du Chêne (**Figure 24**).

La partie de la rivière Bécancour qui est encaissée directement dans le substrat rocheux se situe en aval de la faille de Logan. À partir de cette limite structurale géologique, le substrat rocheux est composé de shales et de marnes de la formation de Bécancour. Ces roches sont plus facilement altérables ce qui a permis à la rivière Bécancour de creuser son lit jusqu'à des profondeurs d'une trentaine de mètres. De plus, les variations historiques de débit et de localisation du lit de la rivière ont créé une vallée encaissée dans le roc de faible amplitude latérale, mais suffisante pour y permettre l'accumulation importante de sédiments quaternaires. Dans la zone située au nord-est de la rivière Gentilly, entre les rivières aux Orignaux et Petite du Chêne, le roc s'enfonce en dessous du niveau de la mer. La forme de la zone où l'épaisseur des dépôts meubles excède 30 m, ainsi que la présence de dépôts quaternaires anciens au contact du roc suggère qu'un ancien chenal fluvial aurait pu être mis en place avant la dernière glaciation.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Épaisseur des dépôts meubles (m)

- 0 - 1
- 2 - 3
- 4 - 6
- 7 - 9
- 10 - 11
- 12 - 14
- 15 - 17
- 18 - 22
- 23 - 30
- 31 - 90

- Forages et affleurements utilisés

Figure 23 Épaisseur des dépôts meubles

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC

Échelle 1/100 000

Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Système de coordonnées géographiques nord-américain, 1983



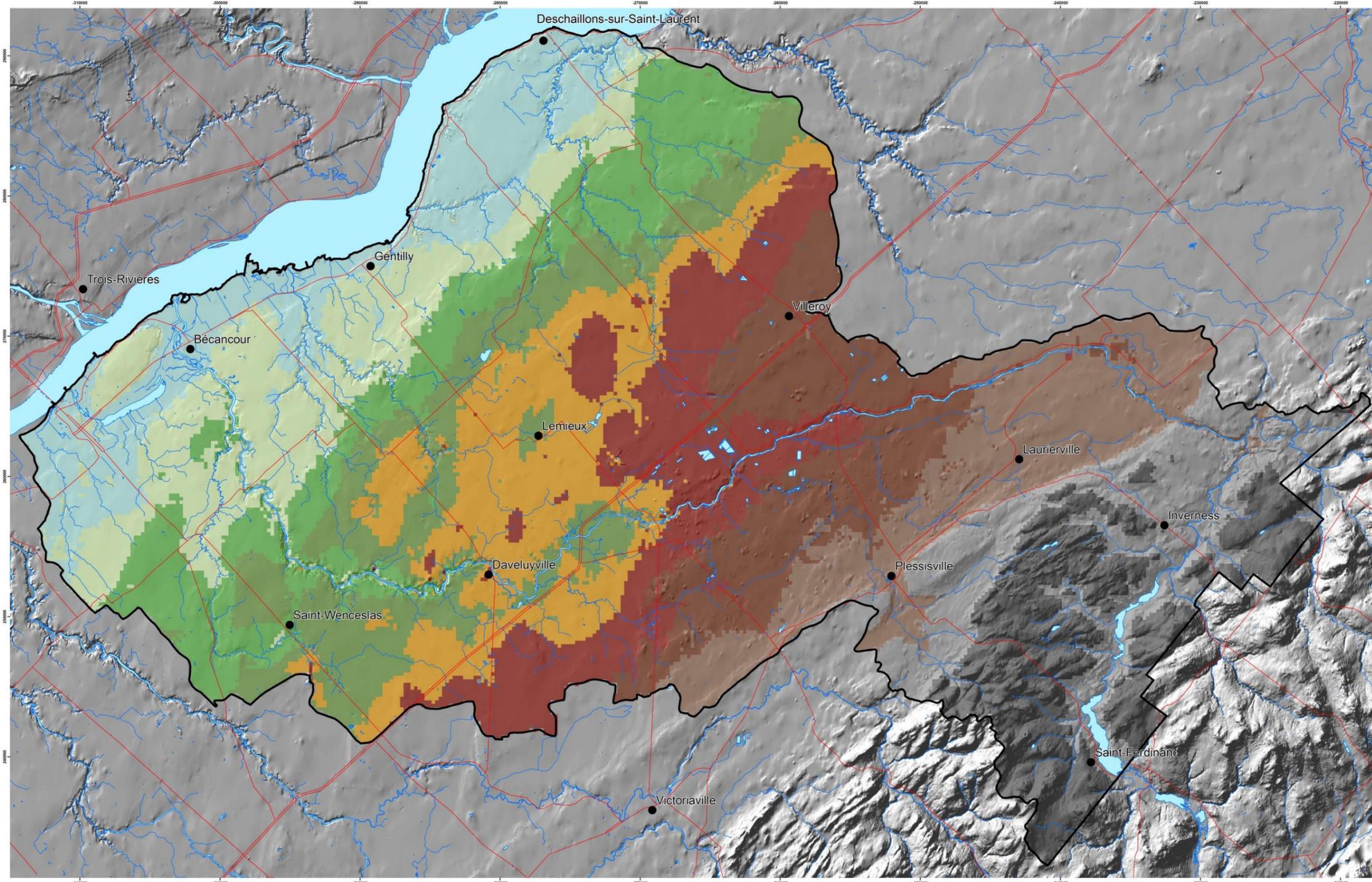
MÉTADONNÉES
Protocole livrable 15/16
Section 4.2.4 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Données de forages: SIH, MTQ, SIGPEG,
consultants, UQAM
Affleurement: SIGEOM, UQAM
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études réalisées pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'actualité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliation ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adéquation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013.
Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬭ Zone d'étude

Élévation de la surface du roc (m)

| |
|-----------|
| -50 - 9 |
| 10 - 35 |
| 36 - 61 |
| 62 - 77 |
| 78 - 88 |
| 89 - 106 |
| 107 - 124 |
| 125 - 176 |
| 177 - 263 |
| 264 - 584 |

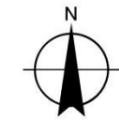
**Figure 24 Topographie du roc
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC**



MÉTADONNÉES
Protocole livrables 15/16
Section 4.2.4 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour traiter la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions locales et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'origine ne donnent aucune garantie, explicite ou implicite, quant à l'actualité ou aux fins particulières de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013. Projet de consultation des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

Coupes stratigraphiques

Des coupes stratigraphiques ont été réalisées à quatre endroits sur la zone d'étude (**Figure 25**). Les coupes ont été extraites à partir du modèle hydrostratigraphique 3D. Ces coupes représentent la grande majorité des séquences des sédimentaires quaternaires de la zone d'étude.

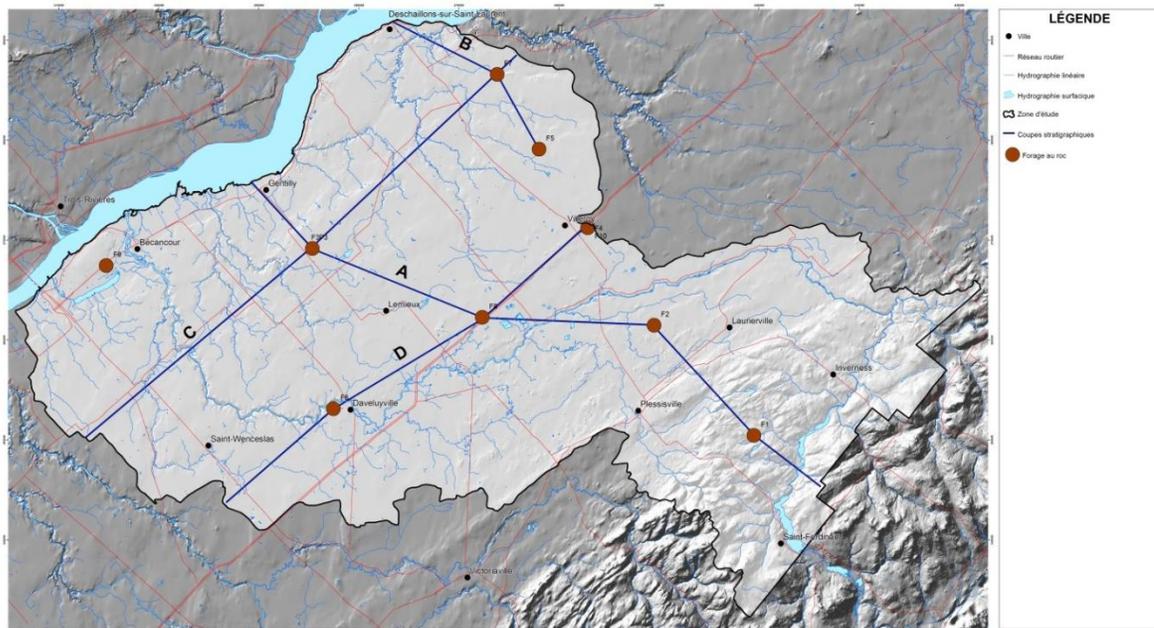


Figure 25 Localisation des coupes stratigraphiques

Coupe A

La coupe hydrostratigraphique A (**Figure 26**) s'étend du fleuve à la limite amont de la zone d'étude (**Figure 25**). Elle donne un aperçu général de la stratigraphie des dépôts meubles ainsi que de la distribution amont/aval de la géologie du roc. La partie amont est recouverte de till mince. Celui-ci n'est pas présenté sur la coupe en raison de sa faible épaisseur. La zone centrale est principalement recouverte de till compact avec à certains endroits des dépôts granulaires superposés au till. Les dépôts organiques sont situés soit directement sur le till compact ou encaissés dans les dépôts granulaires. En aval la stratigraphie devient plus complexe avec la présence de dépôts quaternaires anciens qui reposent sur le flanc de la dépression du roc.

Coupe B

La coupe stratigraphie B (**Figure 27**) est localisée dans la partie nord-est de la zone d'étude (**Figure 25**). Elle représente toutes les unités hydrostratigraphiques à l'exception du till remanié. L'étendue spatiale des dépôts quaternaires anciens demeure toutefois incertaine dans cette région. En effet, malgré les coupes stratigraphiques observées le long des rivières, très peu de forages sont présents dans cette zone.

Coupe C

La coupe stratigraphique C (**Figure 28**) croise la coupe A à la hauteur du forage F3 (**Figure 25**). Elle permet de visualiser l'importance de l'unité des sables des Vieilles Forges (première unité perméable de quaternaire ancien). Les rivières Bécancour et Gentilly sont encaissées de plusieurs dizaines de mètres dans cette zone. Elles n'atteignent pas le roc sur cette coupe, mais plus en aval, elles sont encaissées à même le substrat rocheux.

Coupe D

La coupe stratigraphique D (**Figure 29**) suit l'axe de l'autoroute 20 (**Figure 25**). Elle illustre la zone de transition entre la partie amont et la partie aval. Les dépôts argileux sont présents dans la partie ouest de la coupe aux endroits où la topographie est plus basse. Dans la portion plus élevée, les dépôts argileux ont complètement été érodés et les dépôts sableux récents dominent la stratigraphie.

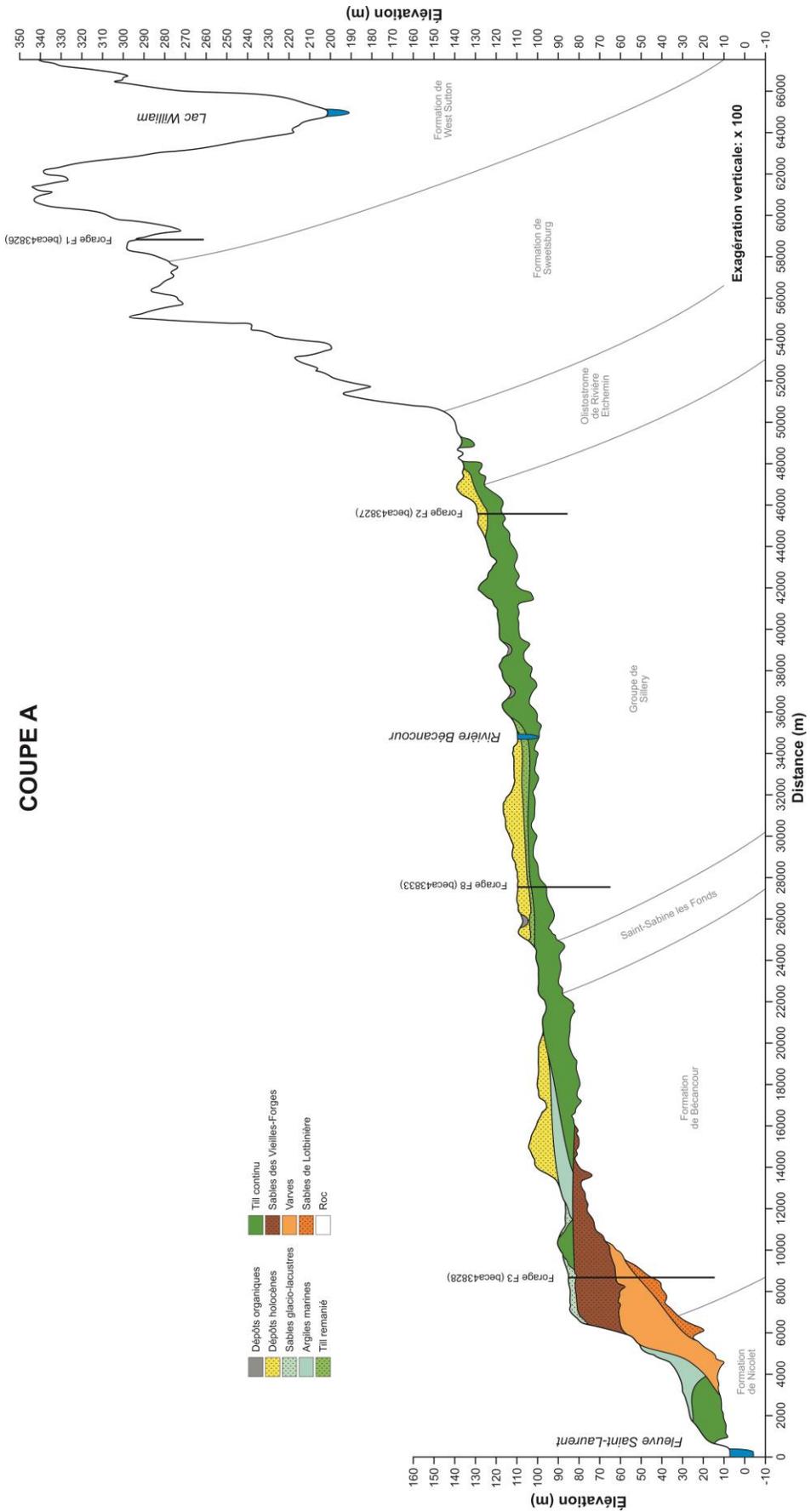


Figure 26 Coupe stratigraphique A

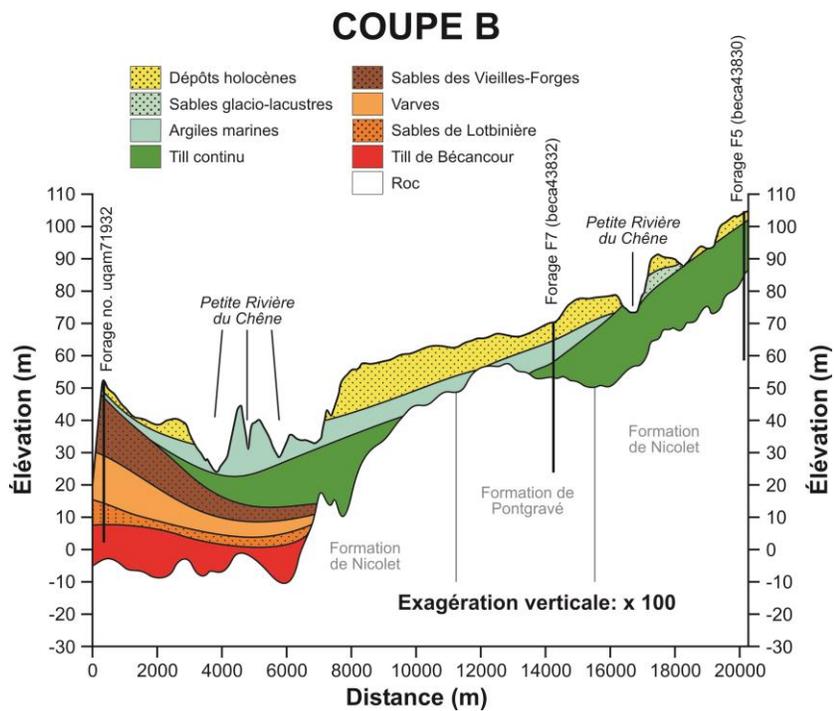


Figure 27 Coupe stratigraphique B

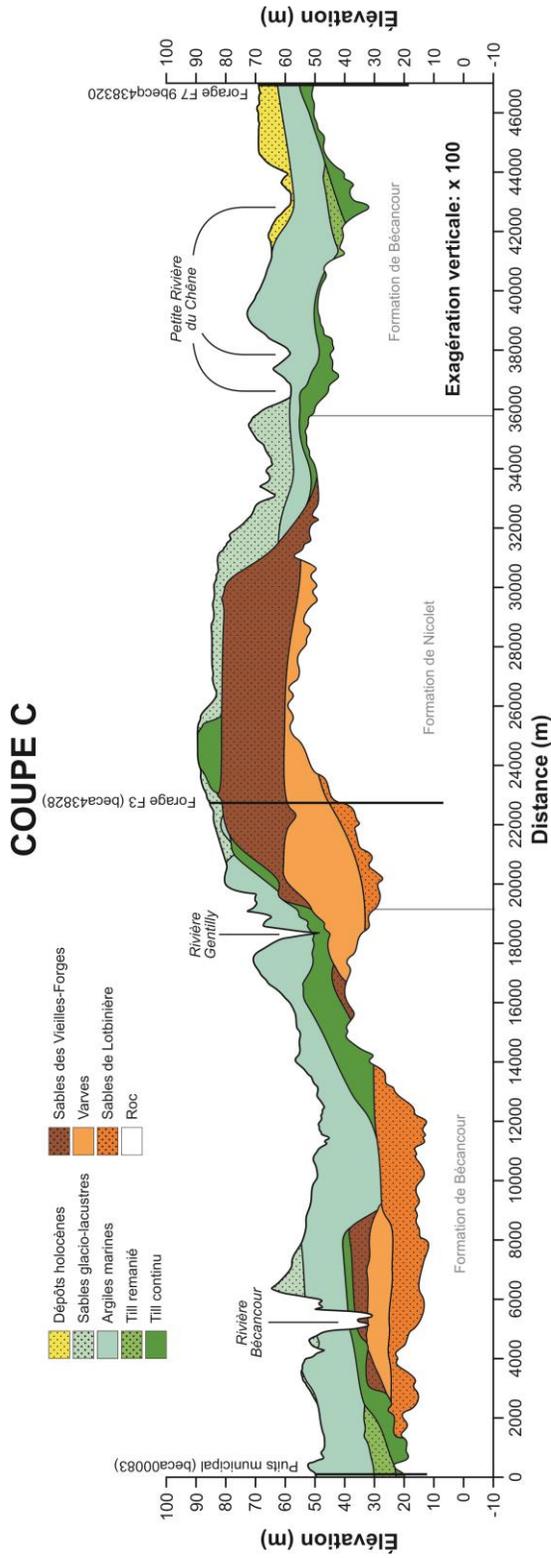


Figure 29 Coupe stratigraphique C

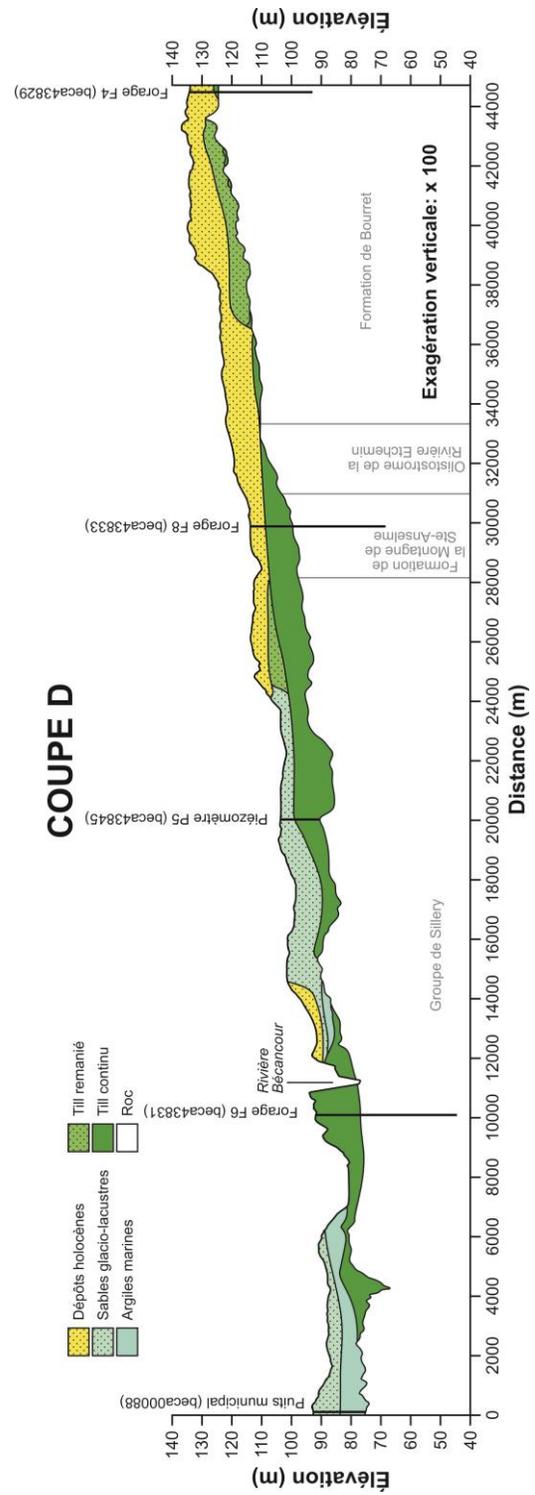


Figure 28 Coupe stratigraphique D

4.2.5 Contexte hydrostratigraphique des tourbières

Selon les travaux d'Avard (2013), l'épaisseur maximale de la tourbe dans les neuf tourbières étudiées varie entre 1,63 et 6,40 m et est en moyenne de 3,18 m (**Tableau 16**). L'épaisseur moyenne des dépôts tourbeux varie entre 1,10 et 2,94 m. La superficie des tourbières varie entre 71 et 1197 ha; la moyenne est de 367 ha et la médiane de 15 ha.

Les levés géoradar permettent d'illustrer la variabilité topographique de la surface minérale probablement mise en place à la faveur d'écoulements de surface, avant une phase d'isolement de l'eau dans des cuvettes qui se sont peu à peu comblées. L'analyse visuelle et l'analyse granulométrique montrent que huit tourbières sur les neuf étudiées se sont développées sur des sédiments généralement grossiers. Les faciès sous les tourbières de Villeroy, Mer Bleue et Francoeur situées au nord et à l'est de la zone d'étude, sont composés de till remanié et de sédiments d'origine éolienne, ceux-ci étant présents surtout en bordure des sites. Les tourbières de Blandford, Defoy et Lemieux reposent sur des sédiments d'origine glaciaire de till compact et de till remanié. La tourbière du Lac Rose repose sur des sédiments d'origine littorale ou deltaïque et sur du till remanié. Ces tourbières peuvent donc avoir des liens directs avec l'aquifère sous-jacent. Seule la tourbière de Saint-Sylvère s'est développée sur les dépôts imperméables de la Mer de Champlain. Il est important de souligner que la présence de dépôts relativement grossiers à la base des tourbières n'exclut pas la présence de matériaux beaucoup moins perméables (argile ou till compact) plus en profondeur.

Les dates basales montrent une évolution du début de l'entourbement de l'amont vers l'aval, avec les âges basaux les plus anciens observés dans les tourbières de Villeroy (10 220 ans A.A.) et de Saint-Sylvère (10 260 ans A.A.), vers l'aval de la zone avec les tourbières de Mer Bleue (9620 ans A.A.) et de Lac Rose (9510 ans A.A.). Ces résultats indiquent que les tourbières se sont développées d'abord dans les parties les plus hautes de la zone d'étude et un peu plus tardivement vers le fleuve Saint-Laurent, suivant la direction du retrait de la Mer de Champlain après la dernière glaciation et le relèvement isostatique associé.

Tableau 16 Épaisseurs, substrats et superficies des tourbières étudiées

| Tourbière | Épaisseur maximale de tourbe (m) | Épaisseur moyenne de tourbe (m) | Minéral sous-jacent | Superficie de la tourbière (ha) |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
| Blanford | 3,01 | 1,84 | Till et till remanié | 71 |
| Defoy | 3,73 | 1,86 | Till et till remanié | 458 |
| Francoeur | 2,38 | 1,34 | Sédiments éoliens Till remanié | 200 |
| Lac Rose | 2,60 | 1,62 | Sable littoral et deltaïque Till remanié | 665 |
| Lemieux | 3,20 | 1,61 | Till et till remanié | 155 |
| Mer Bleue | 2,00 | 1,20 | Till remanié Sédiments éoliens | 360 |
| Plessis | 1,63 | 1,10 | Sédiments éoliens Till remanié | 129 |
| Saint-Sylvère | 6,40 | 2,94 | Sédiments marins Till remanié | 146 |
| Villeroy | 3,70 | 1,83 | Sédiments éoliens Till remanié | 1197 |

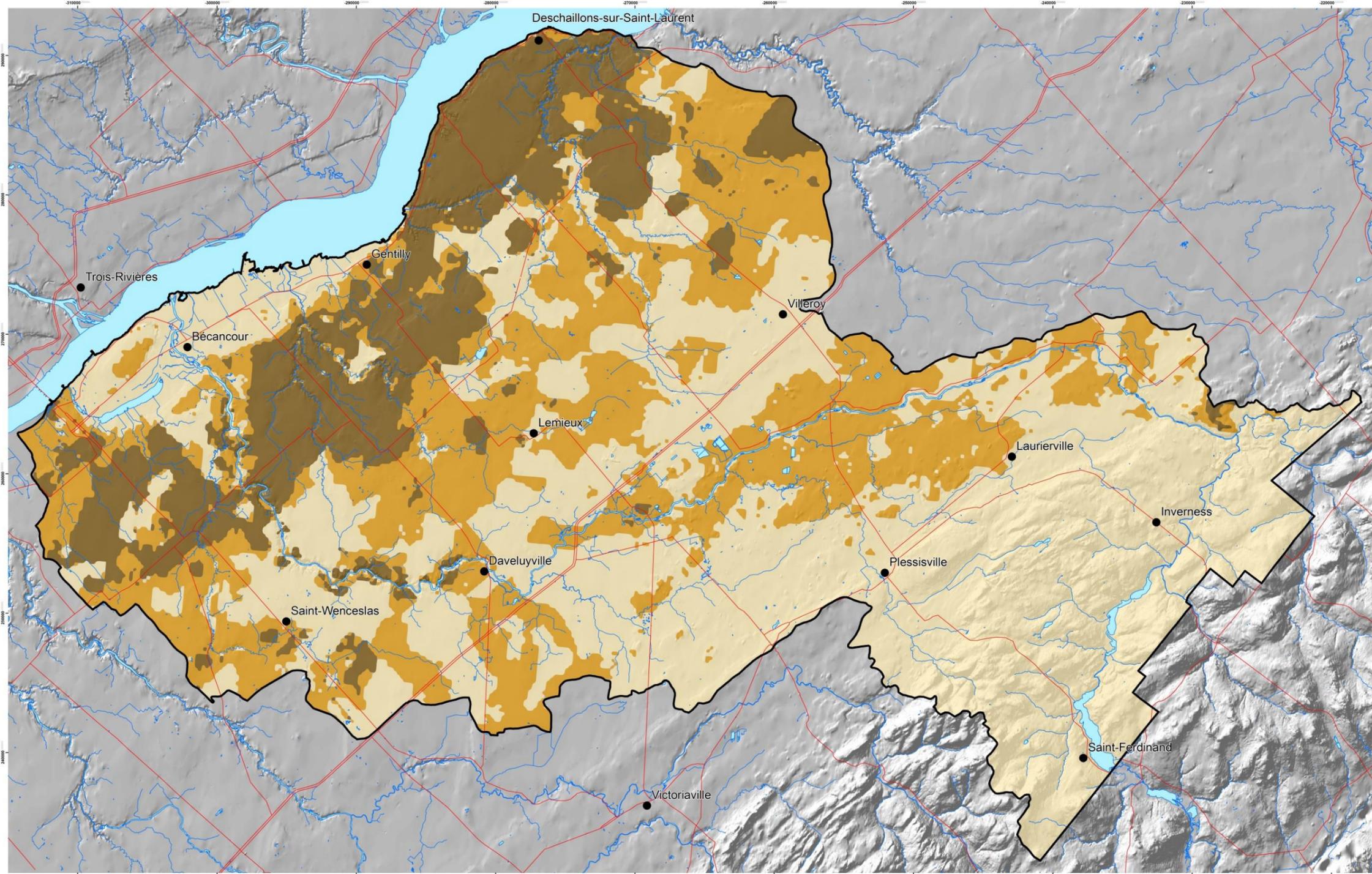
Les contextes géomorphologiques ont été extrapolés à l'ensemble de la région par Avard (2013). L'extrapolation a été faite en étudiant les dépôts de surface dans l'environnement immédiat des tourbières et en le comparant à ceux des tourbières étudiées (voir Avard, 2013 pour les détails). Sur l'ensemble de la zone d'étude, les dépôts éoliens et de till remanié couvrent le plus grand territoire (8202 ha). Suivent ensuite les tourbières qui reposent soit sur le till remanié (5336 ha), sur les sédiments littoraux ou deltaïques et les tills remaniés (1917 ha), et sur les sédiments d'alluvion et de till remanié (1042 ha). Les tourbières qui se sont développées sur du till mince sur roc et sur des sédiments marins couvrent seulement une petite partie du territoire (801 et 329 ha). La composition sableuse dominante est dans l'ensemble perméable aux écoulements. Ceci indique que l'eau souterraine peut transiter entre la tourbière et l'aquifère voisin et que les tourbières peuvent donc contribuer à la dynamique hydrogéologique de la région.

4.3 Conditions de confinement

Les conditions de confinement représentent le niveau de contact entre l'atmosphère et la nappe phréatique de l'aquifère du roc fracturé. Les niveaux de confinement sont généralement liés à la géochimie de l'eau souterraine et donnent un premier aperçu des zones de recharge. Les zones de confinement ont été déterminées à partir du modèle 3D de l'architecture des sédiments quaternaires. Le niveau de confinement dépend de l'épaisseur des unités imperméables (**section 4.2.2**). Si plusieurs unités imperméables sont présentes dans une zone, le niveau de confinement est évalué selon l'unité la plus épaisse et non selon la somme de toutes les unités. Les résultats ont ensuite été interpolés sur des mailles de 250 m x 250 m. Les conditions de confinement ont été définies selon les critères suivants:

- Nappe captive: plus de 3 m d'argile ou plus de 5 m de till compact
- Nappe semi-captive: de 1 à 3 m d'argile ou de 3 à 5 m de till compact
- Nappe libre: moins de 1 m d'argile et moins de 3 m de till compact

La **figure 30** illustre la distribution spatiale des niveaux de confinement de l'aquifère au roc sur la zone d'étude. Les zones d'aquifère de roc fracturé à nappe libre représentent 53% de la superficie étudiée, les zones à nappe semi-captive représentent 30% de la superficie étudiée et les zones de nappe captive représentent 17% de superficie étudiée. Les zones de nappe captive sont principalement localisées aux endroits où la couverture argileuse est présente en surface (cf. **Figure 22**).



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Indice de confinement

- Nappe libre
- Nappe semi-captive
- Nappe captive



MÉTADONNÉES

Protocole livrable 17
Section 4.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 30 Indice de confinement

ZONE BÉCANCOUR

QUÉBEC

Échelle 1/100 000



Projection cartographique conforme au Lambert de Québec
Réseau-Canada 83
Système de référence géographique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliés ne donnent aucune garantie quant à l'exactitude, ou quant à l'adéquation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour :
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

4.4 Contextes hydrogéologiques

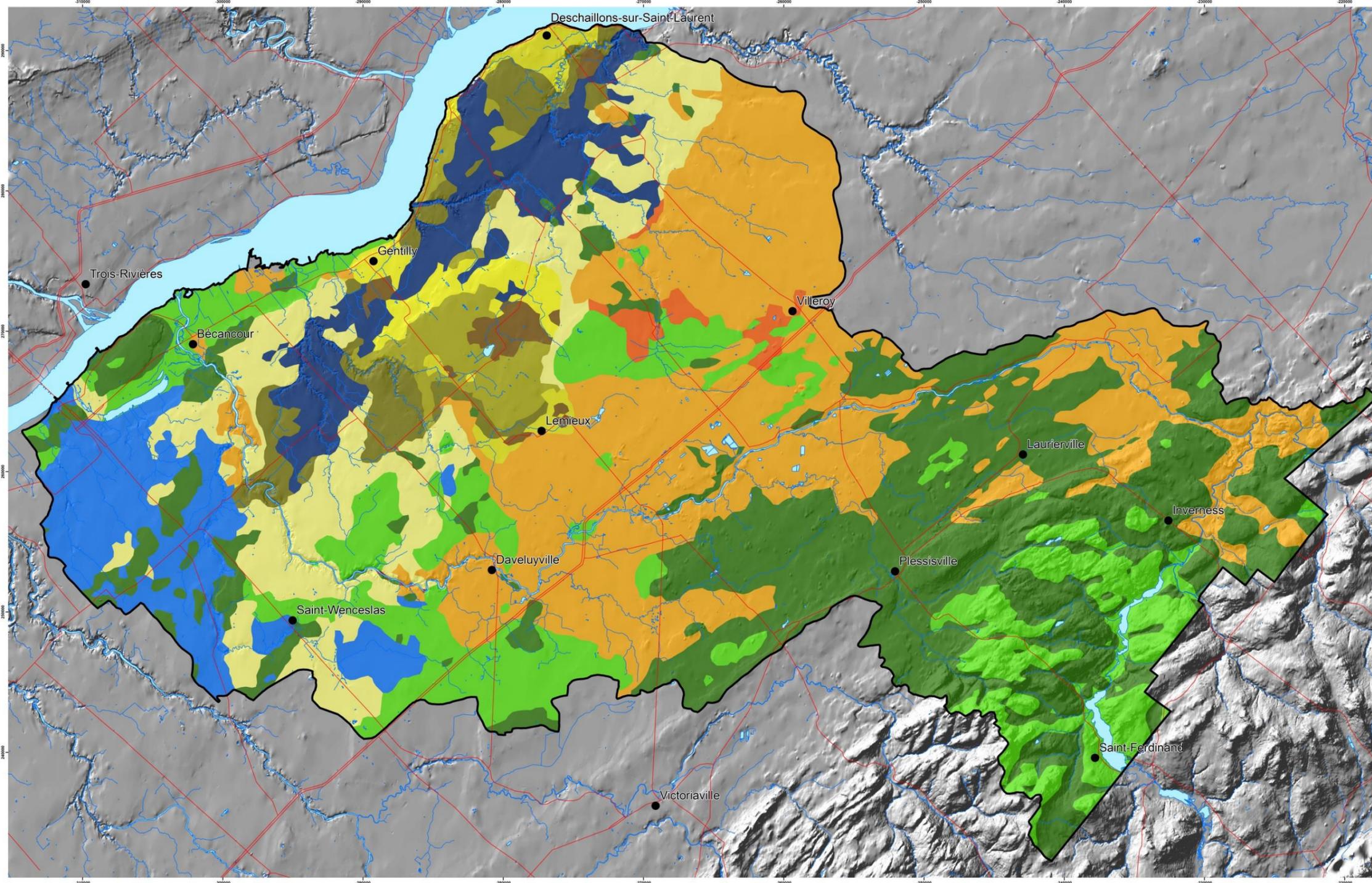
Les contextes hydrogéologiques représentent la répartition spatiale de séquences hydrostratigraphiques-types de dépôts meubles. Ils permettent d'identifier quelle séquence de dépôts meubles peut être rencontrée dans un secteur de la zone d'étude. Les unités hydrostratigraphiques présentées dans ce livrable sont les mêmes que celles présentées à la **section 4.2.2**. Les différentes couches d'information représentant l'épaisseur des unités hydrostratigraphiques ont été superposées afin d'identifier des regroupements de contextes hydrogéologiques. Certains regroupements ont dû être réalisés afin d'assurer un aspect visuel intéressant. Les unités U1 (dépôts holocènes) et U3 (sables littoraux) ont été regroupées en une seule unité nommée «granulaire». Les unités U9 (sables des Vieilles Forges), U10 (varves de Deschaillons), U11 (sédiments de Saint-Pierre) et U12 (Till de Bécancour) ont été regroupées en une seule unité nommée «Quaternaire ancien». Tous les contextes hydrogéologiques des dépôts meubles reposent sur le roc fracturé. L'épaisseur des unités n'a pas été prise en compte dans le choix et la simplification des contextes types. L'utilisation des coupes géologiques présentées à la **section 4.2.4** permet de prendre connaissance de l'épaisseur des différentes unités.

La **figure 31** illustre la répartition spatiale des contextes-types. La partie amont est dominée par les contextes de till, de till remanié et de matériel granulaire reposant sur le till. En général dans cette partie de la zone d'étude, l'épaisseur de l'unité de till est inférieure à 3 m et celle de l'unité granulaire est inférieure à 10 m. Cependant, dans le secteur de Lysander Falls, à la jonction de la rivière Bécancour et de la rivière Palmer, des épaisseurs de matériel granulaire de 20 m ont été observées dans certains forages.

Dans la partie centrale, la stratigraphie est dominée par une séquence de dépôts granulaires reposant sur un till généralement compact qui peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. Les dépôts granulaires sont quant à eux d'épaisseur très variable allant de 1 m à plus de 10 m dans le secteur amont de la Petite rivière du Chêne. Ces dépôts granulaires ne constituent pas un aquifère majeur bien que certaines petites municipalités (Villeroy, Sainte-Eulalie et Saint-Rosaire) puisent leur eau dans cette unité. Dans la partie sud-ouest de la zone centrale se retrouve du till remanié reposant sur le roc fracturé.

Une transition vers les contextes argileux et une complexification importante de l'hydrostratigraphie est observée vers l'aval de la zone d'étude. Ceci est principalement dû à la présence des unités de quaternaire ancien souvent présentes sous les dépôts argileux ou sous le till. Dans cette portion de la zone d'étude, les dépôts argileux peuvent atteindre des épaisseurs de quelques mètres à plus de 20 m. L'unité dépôts quaternaire comporte deux unités perméables (sables des Vieilles Forges et de Saint-Pierre) séparées par une unité imperméable (varves de Deschaillons). Les unités les plus importantes en termes d'épaisseur sont les sables des Vieilles Forges et les varves de Deschaillons. Dans le secteur central du bassin versant de la rivière Gentilly et de la tourbière du lac Rose, ces unités peuvent atteindre plus de 20 m d'épaisseur (voir aussi

les coupes stratigraphiques de la **section 4.2.4**). Les sables des Vieilles Forges constituent l'aquifère granulaire le plus important de la zone d'étude en raison de leur épaisseur. Cette unité alimente en eau potable une partie de la municipalité de Bécancour ainsi qu'une usine d'embouteillage commerciale. Les dépôts quaternaires anciens disparaissent complètement dans la partie sud-ouest de la portion aval de la zone d'étude, à l'ouest de la rivière Bécancour, où ils sont remplacés par une couverture d'argile reposant sur le till. L'étendue spatiale de cet aquifère est présumée importante, mais n'a pas pu être délimitée précisément dans ce projet.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude

Contexte hydrogéologique

- Argile-till-Q. ancien
- Argile-till
- Granulaire-argile-till-Q. ancien
- Granulaire-argile-Q. ancien
- Granulaire-till-Q. ancien
- Granulaire-Q. ancien
- Granulaire-argile-till
- Granulaire-till
- Granulaire
- Till
- Till remanié
- Till-Q. ancien
- Roc

Figure 31 Contextes hydrogéologiques

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Modèle hydrostratigraphique 3D, carte des dépôts meuble (Godbout et al., 2011).

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



MÉTADONNÉES
Section 4.4 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant permet toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte. Malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données, par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ne prennent aucune responsabilité à l'égard de l'utilisation ou de l'interprétation de toute donnée dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

5 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

5.1 Propriétés hydrauliques

Les premiers travaux de caractérisation à l'échelle du Québec (Simard et Desrosiers, 1979) classaient le roc fracturé de la zone d'étude comme étant de perméabilité faible à modérée, i.e. pouvant fournir des débits moyens de 2,7 à 5 m³/h. En raison de son étendue spatiale, l'étude de Simard et Desrosiers ne considérait cependant pas les dépôts quaternaires.

Dans une étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Bécancour, Paré (1981a) identifiait les meilleurs réservoirs aquifères comme étant les dépôts meubles et précisait que ces derniers pouvaient fournir des débits de 10 à 80 m³/h. Cette analyse était basée sur des données hydrogéologiques issues des pompages municipaux et des données provenant du SIH. Paré (1981) identifiait également l'aquifère fracturé comme étant peu productif avec des débits d'environ 5 m³/h et une augmentation de la productivité du roc des Basses-Terres du Saint-Laurent vers les Appalaches.

5.1.1 *Essais hydrauliques*

Données disponibles pour les forages municipaux

Tous les approvisionnements municipaux dans l'aquifère rocheux ou dans les dépôts meubles ont été caractérisés par des consultants au moment de la mise en place des captages. Les propriétés hydrauliques qui en résultent sont présentées dans le **tableau 17**.

La municipalité de Deschaillons-sur-Saint-Laurent puise son eau à partir de deux puits installés dans un aquifère superficiel composé de sables littoraux lacustres (Grenier, 1986). Cette formation se compose de sable fin à grossier. L'épaisseur moyenne de la formation dans le secteur des puits est de 15 m et se termine sur une couche d'argile pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. À certains endroits, l'aquifère est en condition semi-captive, car il est recouvert d'une couche de silt et d'argile pouvant atteindre 1,5 m.

La municipalité de Fortierville puise son eau à partir d'un puits installé dans un aquifère fracturé de la formation de Bécancour (Envir'eau, 2008a). Cette formation se compose de shale rouge et de grès verts. Le puits a une profondeur totale de 70,2 m et traverse 26 m de dépôt quaternaires et la nappe est en condition captive.

La municipalité de Laurierville puise son eau à partir d'un puits installé dans un aquifère fracturé du Groupe de Sillery. Cette formation se compose de shale noir et de grès. Aucune information n'est disponible sur ce forage, à l'exception de son débit pompé qui est d'environ 500 L/min. Ce forage a été mis en fonction en 2005, suite à une

problématique bactériologique dans l'aquifère de surface de la région (Fréchette LGL, 2006). Avant cette date, la municipalité exploitait un aquifère superficiel à nappe libre d'une épaisseur de 10 m principalement composé de dépôts marins littoraux et de till remanié, ainsi que deux sources (TechnoRem, 2004a).

La municipalité de Lyster puise son eau à partir de deux puits installés dans un aquifère granulaire composé de sables et graviers fluviatiles (TechnoRem, 2003). Cette unité a une épaisseur variant de 2 à 9 m. Une couche silto-argileuse d'alluvions récents d'une épaisseur moyenne de 3 m recouvre localement le secteur de l'aquifère granulaire où se situent les puits, ce qui crée des conditions de nappe captive.

La municipalité de Manseau puise son eau potable à partir d'un puits installé dans un aquifère granulaire de surface composé de sables et graviers littoraux d'origine marine (TekEau, 1980). L'épaisseur de l'aquifère est de 7,5 m et est limité à sa base par une unité d'argile de la mer de Champlain.

La municipalité de Saint-Célestin s'alimente à partir d'un aquifère granulaire en condition de nappe captive (Bilodeau, 2007). L'unité granulaire est composée de sables et graviers fluviatiles d'une épaisseur de 7 m provenant de l'ancien réseau de drainage de la rivière Blanche et est encaissée entre deux unités aquicludes. Le sommet étant composé d'argile et de sable des alluvions de la rivière Blanche (15 m) et la base d'argile de la mer de Champlain (5 m).

La municipalité de Sainte-Eulalie puise son eau potable dans un aquifère granulaire superficiel composé de sable fin à moyen littoral d'origine marine (BPR, 2006). L'épaisseur moyenne de cette formation est de 9 m. Une couche imperméable de sable fin et de silt d'origine marine d'une épaisseur moyenne de 10 m constitue la base de l'aquifère.

La municipalité de Sainte-Marie-de-Blandford puise son eau potable dans un aquifère granulaire en condition semi-captive (Consultants HGE, 1985). L'unité aquifère est composée de sables et graviers d'origine fluviatile correspondant aux sables des Vieilles Forges et son épaisseur moyenne est de 12 m. L'aquifère est limité à sa base par une unité argileuse avec trace de gravier très compact. À son sommet, une couche de sable silteux et d'argile d'une épaisseur de 2 m crée des conditions de nappe semi-captive.

La municipalité de Saint-Pierre-Baptiste puise son eau souterraine à partir d'un puits installé dans un aquifère fracturé constitué de schiste à séricite du Groupe des Schistes de Bennett (Services techniques en eau souterraine inc., 1975). Le puits a une profondeur de 28,3 m et est tubé jusqu'à une zone de fracture située entre 25,9 m et 28,3 m.

La municipalité de Saint-Wenceslas, est alimentée en eau potable par trois puits installés dans un aquifère fracturé composé de shale et de grès du Groupe de Sainte-Rosalie (Consultants HGE, 1985; 1989; 1999). Cet aquifère est confiné en surface par une

couche de silts et d'argiles de la mer de Champlain d'une épaisseur de 6 à 14 m. Les puits ont une profondeur moyenne de 20,2 m. La zone la plus productive se situe dans les premiers mètres de la cavité forée dans le roc.

La municipalité de Villeroy puise son eau potable dans un aquifère superficiel composé de sables éoliens et littoraux marins (TechnoRem, 2004b). Son épaisseur totale est en moyenne de 5 m. Une couche de sable fin d'une épaisseur moyenne de 3 m est superposée à une couche de sable graveleux d'une épaisseur moyenne de 2 m. Elle est limitée à sa base par une unité de till compact.

Essais de pompage et essais à charge variable réalisés dans le roc fracturé

Des essais de pompage (15 sites) à charge variable (neuf sites) ont été réalisés dans les puits forés dans le roc au cours du projet (F1 à F9, le F10 ayant été utilisé comme puits d'observation). Des essais de pompage dans des puits de particuliers (PRI02 à PRI08) ont également été réalisés. Les résultats montrent que l'aquifère est généralement peu transmissif, confirmant les résultats obtenus par Paré (1981a et 1981b). En effet, les conductivités hydrauliques obtenues à partir des essais de pompage et des essais à charge variable dans le roc fracturé sont comprises entre $3,7 \times 10^{-9}$ et $1,4 \times 10^{-4}$ m/s (**Tableau 17**; les moyennes ont été calculées à partir des $\log(K)$ et les résultats ont ensuite été transformés en K). Ces résultats sont généralement inférieurs aux valeurs d'environ 2×10^{-5} m/s aux conductivités hydrauliques obtenues dans les puits municipaux de Saint-Wenceslas, Saint-Pierre-Baptiste et Fortierville. Il est important de noter que les forages réalisés dans le cadre du projet ont tous la même profondeur (30 m dans le roc) et qu'aucune tentative n'a été faite pour maximiser la productivité de ces forages. Pour les puits de particuliers dans lesquels des essais ont été réalisés, les conductivités hydrauliques mesurées sont aussi inférieures à celles des forages pour l'alimentation en eau potable des municipalités. En général, les conductivités hydrauliques obtenues par essais hydrauliques à charge variable sont supérieures à celles des essais de pompage, en raison du faible rayon d'influence des essais à charge variable qui caractérise une zone où la fracturation a pu être augmentée artificiellement au cours du forage.

Essais à charge variable réalisés dans les dépôts granulaires

Aucun essai de pompage n'a été réalisé dans les dépôts meubles. Par contre, des essais à charge variable ont été réalisés dans les six piézomètres installés dans des formations granulaires principalement composées de sables (P1 à P6). Les résultats indiquent que la conductivité hydraulique des dépôts varie de $1,2 \times 10^{-6}$ à $1,1 \times 10^{-3}$ m/s à (**Tableau 17**). Ces résultats concordent bien avec ceux déjà obtenus dans le cadre des études hydrogéologiques réalisées par les consultants sur la zone d'étude.

Tableau 17 Synthèse des propriétés hydrauliques obtenues par essai de pompage et essais à charge variable

| Source | Site/ municipalité | Contexte | K moyen (m/s) | S | T (m ² /s) | Formation géologique |
|---------------|---------------------------|-------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Consultant | Deschaillons | Semi-captif | $3,5 \times 10^{-4}$ | $4,0 \times 10^{-4}$ | | Sables littoraux |
| Consultant | Deschaillons | Libre | $1,9 \times 10^{-5}$ | $5,2 \times 10^{-1}$ | | Sable littoraux |
| Consultant | Deschaillons | Libre | $5,8 \times 10^{-5}$ | | $3,4 \times 10^{-4}$ | Sables littoraux |
| Consultant | Fortierville | Captif | $1,61 \times 10^{-5}$ | $6,2 \times 10^{-3}$ | | Shales (Form. Bécancour) |
| MRN | Laurierville | Libre | $1,7 \times 10^{-3}$ | $1,0 \times 10^{-1}$ | | Alluvions et gravier |
| MRN | Lyster | Semi-captif | $4,6 \times 10^{-4}$ | | | Sables fluviatiles |
| MRN | Lyster | Semi-captif | $1,1 \times 10^{-3}$ | $1,0 \times 10^{-4}$ | $2,0 \times 10^{-3}$ | Sables et graviers fluviatiles |
| Consultant | Manseau | Semi-captif | $4,4 \times 10^{-4}$ | | $5,5 \times 10^{-4}$ | Sables et gravier littoraux |
| Consultant | Sainte-Eulalie | Libre | $4,6 \times 10^{-4}$ | | $1,3 \times 10^{-3}$ | Sables et gravier littoraux |
| Consultant | Sainte-Eulalie | Libre | $3,4 \times 10^{-4}$ | | $7,3 \times 10^{-4}$ | Sables et gravier littoraux |
| Consultant | Saint-Célestin | Captif | $5,5 \times 10^{-4}$ | | | Sables et graviers |
| Consultant | Sainte-Marie-de-Blandford | Semi-captif | $5,8 \times 10^{-3}$ | | | Sables des Vieilles-Forges |
| Consultant | Saint-Pierre-Baptiste | Libre | $1,4 \times 10^{-4}$ | | | Schistes (Gr. de Benett) |
| Consultant | Saint-Wenceslas | Captif | $1,9 \times 10^{-5}$ | $3,0 \times 10^{-5}$ | | Shales et grès (Gr. Sainte-Rosalie) |
| Consultant | Villeroy | Libre | $2,7 \times 10^{-3}$ | | | Sédiments éoliens |
| PACES UQAM | Forage F1 | Libre | $1,6 \times 10^{-8}$ | | | Schistes (Gr. de Benett) |
| PACES UQAM | Forage F1 | Libre | $1,64 \times 10^{-8}$ | | | Shales/grès (Gr. de Stanbridge) |

* Le tableau se poursuit à la page suivante

| Source | Site/ municipalité | Contexte | K moyen (m/s) | S | T (m ² /s) | Formation géologique |
|---------------|-----------------------|-------------|-----------------------|---|--------------------------|---|
| PACES UQAM | Forage F2 | Captif | 8,34x10 ⁻⁷ | | | Shales/grès (Gr. de Sillery) |
| PACES UQAM | Forage F3 | Captif | 5,3x10 ⁻⁹ | | | Shales (Gr. de Lorraine) |
| PACES UQAM | Forage F4 | Libre | 5,1x10 ⁻⁸ | | | Shales/grès (Gr. de Stanbridge) |
| PACES UQAM | Forage F5 | Captif | 4,8x10 ⁻⁹ | | | Shales (Gr. de Lorraine) |
| PACES UQAM | Forage F6 | Libre | 3,7x10 ⁻⁹ | | | Shales (Gr. de Sainte-Rosalie) |
| PACES UQAM | Forage F7 | Captif | 8,9x10 ⁻⁸ | | | Shales/grès (Form. de Queenston/Lorraine) |
| PACES UQAM | Forage F8 | Semi-captif | 2,0x10 ⁻⁷ | | | Shales/grès (Form. de Stanbridge) |
| PACES UQAM | Forage F9 | Libre | 3,1x10 ⁻⁸ | | | Calcaires/grès (Gr. de Lorraine) |
| PACES UQAM | Piézomètre P1 | Libre | 7,5x10 ⁻⁶ | | | Sable et gravier |
| PACES UQAM | Piézomètre P2 | Libre | 1,2x10 ⁻⁶ | | | Sable |
| PACES UQAM | Piézomètre P3 | Libre | 4,1x10 ⁻⁴ | | | Sables des Vieilles-Forges |
| PACES UQAM | Piézomètre P4 | Libre | 2,9x10 ⁻⁵ | | | Sédiments éoliens |
| PACES UQAM | Piézomètre P5 | Libre | 7,2x10 ⁻⁵ | | | Till remanié |
| PACES UQAM | Piézomètre P6 | Libre | 2,3x10 ⁻⁵ | | | Sables et graviers fluviaux |
| PACES UQAM | PRI02 | Libre | 9,8x10 ⁻⁸ | | | Olistostromes (Gr. rivière Etchemin) |
| PACES UQAM | PRI03 | Libre | 4,0x10 ⁻⁶ | | | Shales/grès (Groupe de Sillery) |
| PACES UQAM | PRI04 | Semi-captif | 7,8x10 ⁻⁸ | | | Shales (Gr. de Lorraine) |

* Le tableau se poursuit à la page suivante

| Source | Site/ municipalité | Contexte | K moyen (m/s) | S | T (m ² /s) | Formation géologique |
|---------------|-----------------------|-------------|----------------------|---|--------------------------|---------------------------------|
| PACES UQAM | PRI05 | Semi-captif | 9,5x10 ⁻⁸ | | | Shales/grès (Groupe de Sillery) |
| PACES UQAM | PRI06 | Captif | 1,4x10 ⁻⁶ | | | Shales/grès (Groupe de Sillery) |
| PACES UQAM | PRI07 | Libre | 6,0x10 ⁻⁷ | | | Shales/grès (Groupe de Sillery) |
| PACES UQAM | PRI08 | Captif | 1,3x10 ⁻⁷ | | | Shales (Gr. de Lorraine) |

Essais avec obturateurs (packers tests)

Des essais hydrauliques avec obturateurs ont été réalisés dans cinq des 10 puits forés dans le cadre de projet (F4, F5, F8, F9 et F10; voir **Annexe 9**) en partenariat avec l'UQAC. Ces travaux avaient comme objectifs d'obtenir des données sur les variations verticales de la transmissivité de l'aquifère fracturé ainsi qu'une valeur globale de la transmissivité. La conductivité hydraulique globale obtenue avec cette méthode se situe en général au-dessus des valeurs obtenues par essai de pompage et de celles obtenues par essais hydrauliques à charge variable (**Tableau 18**). Cette différence est principalement due au faible volume d'aquifère qui est sollicité durant les essais *packers*. Au cours des travaux de forages, une fracturation supplémentaire est générée dans un rayon assez restreint autour du puits. Le rayon d'influence des essais *packers* étant de l'ordre de 1 m, il est normal d'observer des conductivités hydrauliques supérieures à celles obtenues avec les autres types d'essais.

Les résultats des essais avec obturateurs n'ont pas permis d'identifier de variation de conductivité hydraulique avec la profondeur (voir **Annexe 9** pour les détails). Les premiers mètres de la cavité du forage sont cependant la zone la plus perméable pour la majorité des forages. Mis à part les premiers mètres, les zones ayant les conductivités hydrauliques les plus élevées correspondent généralement aux zones de fractures ou de venues d'eau identifiées durant les forages des puits. Ces zones sont généralement rencontrées aux contacts stratigraphiques entre deux unités géologiques. Des variations de conductivités hydrauliques de plus de deux ordres de grandeur ont été observées dans les cinq forages testés.

Tableau 18 Conductivités hydrauliques obtenues au moyen des essais avec obturateurs

| Forage | K moyen de tous les intervalles (m/s) | K toute la cavité au roc (m/s) | K ½ de la cavité au roc (m/s) |
|--------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| F4 | 4,2x10 ⁻⁶ | 4,1x10 ⁻⁷ | 2,4x10 ⁻⁷ |
| F7 | 2,3x10 ⁻⁷ | | |
| F8 | 2,2x10 ⁻⁵ | | 4,3x10 ⁻⁶ |
| F9 | 2,9x10 ⁻⁶ | | |
| F10 | 2,8x10 ⁻⁷ | 1,7x10 ⁻⁷ | |

5.1.2 Estimation de la conductivité hydraulique de l'aquifère fracturé à partir de la capacité spécifique

Les données de niveau statique, de niveau dynamique et de débit provenant de la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDEFP ont été utilisées afin d'estimer la transmissivité de l'aquifère fracturé. Les données ont été triées afin de ne conserver que les essais dont la durée était supérieure à une heure ayant été réalisés dans des forages de profondeur supérieure à 20 m. Les valeurs de transmissivité ont été calculées par itération selon la méthode de Theis (1963).

$$T = \frac{Q}{(h_0 - h)} \frac{2,3}{4\pi} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

où

T = transmissivité (m²/s)

Q = débit (m³/s)

h₀ = niveau statique (m)

h = niveau dynamique (m)

t = temps (s)

S = emmagasinement (-)

Dans le processus itératif, la valeur de transmissivité est fixée approximativement et l'équation résolue pour Q/(h₀-h). La valeur d'emmagasinement utilisée était de 3,5x10⁻⁵. Cette valeur correspond à la moyenne des données recensées dans les rapports hydrogéologiques disponibles dans la région (cf. **Tableau 17**).

La distribution des conductivités hydrauliques obtenues à partir de la capacité spécifique des forages est illustrée à la **figure 32**. La distribution des $\log(K)$ est quasiment symétrique et la valeur moyenne est de $5,3 \times 10^{-7}$ m/s. Le **tableau 19** montre qu'il n'existe pas de différence notable de conductivité hydraulique entre les différents Groupes géologiques, même si une légère différence est visible entre la partie amont (Schiste de Bennett et Groupe de Sillery) et la partie aval de la zone d'étude. La conductivité hydraulique est légèrement plus faible dans les formations géologiques de la partie amont (Schistes de Bennett), mais l'imprécision des données provenant du SIH ne permet pas de déterminer si cette différence est significative.

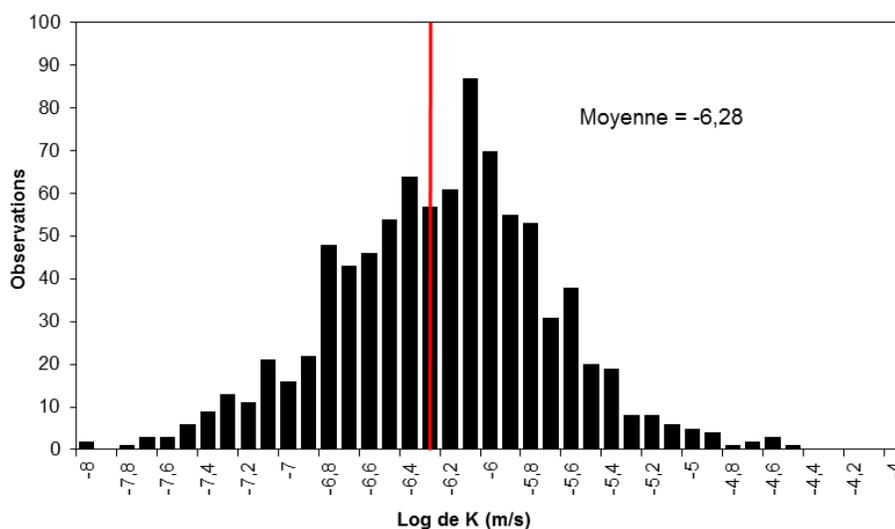


Figure 32 Distribution des conductivités hydrauliques estimées à partir de la capacité spécifique

Tableau 19 Conductivité hydraulique moyenne des groupes géologiques obtenus avec la méthode du débit spécifique

| Géologie | K moyen (m/s) | Prof. moyenne des forages (m) | Nombre de forages utilisés |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Groupe de Lorraine | $4,17 \times 10^{-7}$ | 33 | 378 |
| Groupe de Queenston | $5,37 \times 10^{-7}$ | 32 | 207 |
| Groupe de Sainte-Rosalie | $5,07 \times 10^{-7}$ | 30 | 98 |
| Groupe de Sillery | $5,27 \times 10^{-7}$ | 29 | 958 |
| Groupe de Stanbridge | $3,97 \times 10^{-7}$ | 40 | 118 |
| Olisostromes de riv. Etchemin | $4,58 \times 10^{-7}$ | 37 | 258 |
| Shistes de Bennett | $3,47 \times 10^{-7}$ | 41 | 309 |

5.1.3 Propriétés hydrauliques des dépôts meubles mesurés à l'aide du perméamètre de Guelph

La distribution des valeurs de conductivité hydraulique est illustrée à la **figure 33** (détails à l'**Annexe 10**). La valeur moyenne est de $3,2 \times 10^{-6}$ m/s. La distribution des $\log(K)$ est légèrement asymétrique vers les valeurs de conductivités hydrauliques élevées. Les valeurs moyennes de conductivité hydraulique pour chaque type de dépôts sont présentées au **tableau 20**. Selon ces résultats, les dépôts ayant le meilleur potentiel pour la recharge à l'aquifère fracturé sont les dépôts littoraux marins et lacustres, les sédiments éoliens et le till remanié. Les sédiments éoliens et le till remanié sont généralement superposés au till ou directement en contact avec le roc, dans la portion centrale et amont de la zone d'étude. Cette séquence stratigraphique est particulière favorable à la recharge de l'aquifère. Dans la partie aval, les dépôts littoraux sont généralement superposés aux argiles marines et aux silts lacustres qui présentent une couverture relativement uniforme sur la presque totalité de la partie aval. Cette couverture de dépôts peu perméables limite le potentiel de recharge à l'aquifère fracturé.

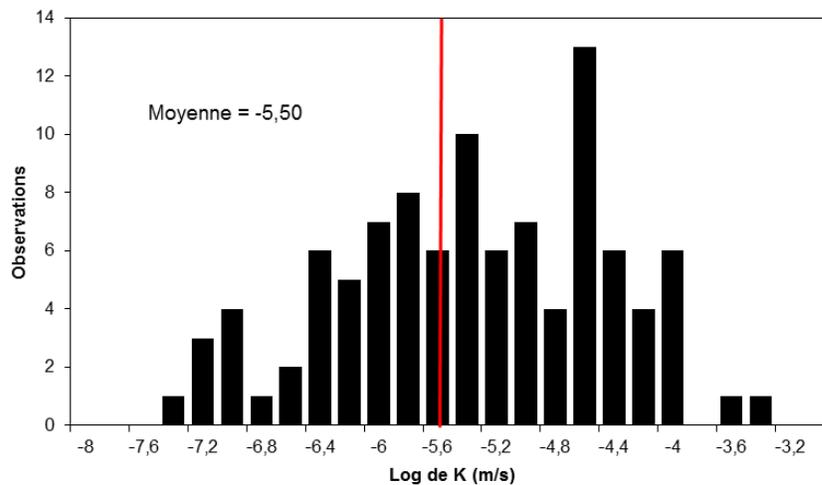


Figure 33 Distribution des conductivités hydrauliques obtenues avec le perméamètre de Guelph.

Tableau 20 Conductivité hydraulique moyenne des unités quaternaires

| Unité Quaternaire | Nombre d'échantillons | K minimum (m/s) | K maximum (m/s) | K moyen (m/s) |
|--|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Alluvions non différenciées (A) | 2 | $1,2 \times 10^{-6}$ | $1,4 \times 10^{-6}$ | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| Sédiments éoliens (Ed) | 7 | $1,3 \times 10^{-6}$ | $1,7 \times 10^{-4}$ | $4,5 \times 10^{-5}$ |
| Sédiments juxtaglaciaires (Gx) | 1 | $1,9 \times 10^{-5}$ | $1,9 \times 10^{-5}$ | $1,9 \times 10^{-5}$ |
| Sédiments lacustres (Lb) | 10 | $5,0 \times 10^{-8}$ | $2,8 \times 10^{-4}$ | $3,6 \times 10^{-5}$ |
| Sédiments glaciomarins fins (MGa) | 8 | $4,0 \times 10^{-8}$ | $8,5 \times 10^{-6}$ | $2,0 \times 10^{-6}$ |
| Sédiments glaciomarins fins / Roche sédimentaire (MGa/Rs) | 1 | $7,9 \times 10^{-7}$ | $7,9 \times 10^{-7}$ | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| Sédiments glaciomarins littoraux (MGb) | 19 | $2,2 \times 10^{-7}$ | $2,8 \times 10^{-5}$ | $9,0 \times 10^{-6}$ |
| Sédiments glaciomarins littoraux/Formations quaternaires anciennes non-différenciées (MGb/Q) | 1 | $2,1 \times 10^{-5}$ | $2,1 \times 10^{-5}$ | $2,1 \times 10^{-5}$ |
| Sédiments glaciomarins deltaïques (MGd) | 1 | $4,5 \times 10^{-6}$ | $4,5 \times 10^{-6}$ | $4,0 \times 10^{-6}$ |
| Till continu (Tc) | 21 | $9,0 \times 10^{-8}$ | $9,7 \times 10^{-5}$ | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| Till mince (Tm) | 5 | $1,3 \times 10^{-6}$ | $2,7 \times 10^{-6}$ | $2,0 \times 10^{-6}$ |
| Till remanié (Tr) | 20 | $7,0 \times 10^{-8}$ | $6,8 \times 10^{-5}$ | $2,3 \times 10^{-5}$ |

5.2 Piézométrie et écoulement

La piézométrie dans le roc est un élément important de la représentation de l'écoulement de l'eau souterraine. La carte piézométrique présente les élévations (par rapport au niveau moyen de la mer) de la nappe si l'aquifère est à nappe libre ou de la charge hydraulique si l'aquifère est à nappe captive. L'**Annexe 11** explique comment la carte piézométrique du roc fracturé (**Figure 34**) a été tracée. Compte tenu du manque de données de niveaux d'eau disponibles dans les aquifères granulaires de la zone d'étude, aucune carte piézométrique n'a été produite pour ceux-ci.

Les niveaux piézométriques sur la zone d'étude varient d'un maximum de 473 m en zone amont à un minimum de 0 m en zone aval. L'écoulement général dans l'aquifère fracturé se fait des Appalaches au fleuve Saint-Laurent, avec des variations locales causées principalement par la topographie et les rivières principales. Dans la partie amont, les niveaux piézométriques suivent généralement la topographie. L'écoulement souterrain a lieu des hauts topographiques aux creux de vallées qui sont souvent occupées par les cours d'eau et les plans d'eau. Ainsi, dans la partie amont de la zone d'étude, les Lac William et Joseph, de même que la rivière Bécancour sont alimentés par l'aquifère au roc. Le gradient hydraulique (diminution de la charge hydraulique avec la distance) est de l'ordre de 0,05 dans cette portion de la zone d'étude, ce qui favorise les phénomènes de résurgence. Les plus petits cours d'eau permanents sont également alimentés par la nappe. Plusieurs cours d'eau sont intermittents, ce qui reflète leur dépendance sur la position de la nappe. Dans la partie aval, certaines rivières sont encaissées dans les dépôts jusqu'au roc et la carte piézométrique montre qu'elles agissent comme un drain sur l'aquifère au roc. C'est le cas des rivières Bécancour, Gentilly et Petite du Chêne qui sont alimentées par l'aquifère toute l'année. Les rivières du Moulin, aux Glaises et aux Orignaux ne montrent pas de lien avec l'aquifère fracturé. Dans cette portion de la zone d'étude, le gradient hydraulique régional est plus faible qu'en amont avec des valeurs de 0,005 à 0,001. L'écoulement souterrain est généralement horizontal, à l'exception des zones de résurgences dans les rivières où le gradient hydraulique est plus important et vertical vers le haut. Les isopièzes indiquent que pour l'aquifère au roc, les limites des principaux bassins hydrogéologiques correspondent approximativement avec les limites des bassins versants.

Dans le cadre du projet, 16 stations de suivis en continu des variations du niveau de l'eau souterraine ont été installées. Tous les résultats sous forme graphique sont présentés à l'**Annexe 12**. La **figure 34** illustre les séries temporelles de niveaux piézométriques pour différents contextes hydrogéologiques montre que les différents aquifères ne réagissent pas de la même manière pour un même événement de précipitation. Ces différences sont principalement causées par la porosité et le degré de confinement des aquifères captés par les trois forages. Par exemple, après l'événement pluvieux majeur correspondant à l'ouragan Irène (28 août 2011), le niveau piézométrique du site F1 (aquifère fracturé à nappe libre) a subi une hausse rapide. Celui du site P3 (aquifère granulaire à nappe libre) a aussi subi une hausse, mais plus atténuée, tandis qu'au site F3 (aquifère fracturé à

nappe captive), le niveau est resté relativement stable. Au forage F1, la forte hausse est causée par la faible porosité de l'aquifère fracturé. Ce type d'aquifère est caractérisé par une porosité dominée par les fractures dans lesquelles l'eau circule plus facilement que dans la matrice rocheuse. Cette faible porosité limite la capacité de l'aquifère à emmagasiner l'eau, ce qui se traduit par une hausse marquée du niveau piézométrique. À l'inverse, au site P3, la hausse du niveau après le même événement est plus faible, en raison de la forte porosité de l'aquifère granulaire. Ceci n'indique pas nécessairement que la recharge y soit moins importante, mais bien que l'aquifère peut emmagasiner une plus grande quantité d'eau. Cette différence d'emmagasinement explique aussi la différence entre les aquifères fracturé et granulaire lors des périodes de récession. Au site F3, la condition captive fait en sorte qu'aucune recharge directe n'atteint l'aquifère au moment de l'ouragan Irène et aucune montée significative des niveaux de nappe n'est perceptible dans la chronique. D'ailleurs, la recharge printanière n'est pas non plus perceptible dans ce forage. La grande distance de la zone d'alimentation (la zone de recharge où l'aquifère fracturé est en condition de nappe libre se situe à plus de 10 km du forage F3) et la faible conductivité hydraulique du roc dans la zone du site ($5,3 \times 10^{-9}$ m/s) expliquent cette stabilité du niveau piézométrique.

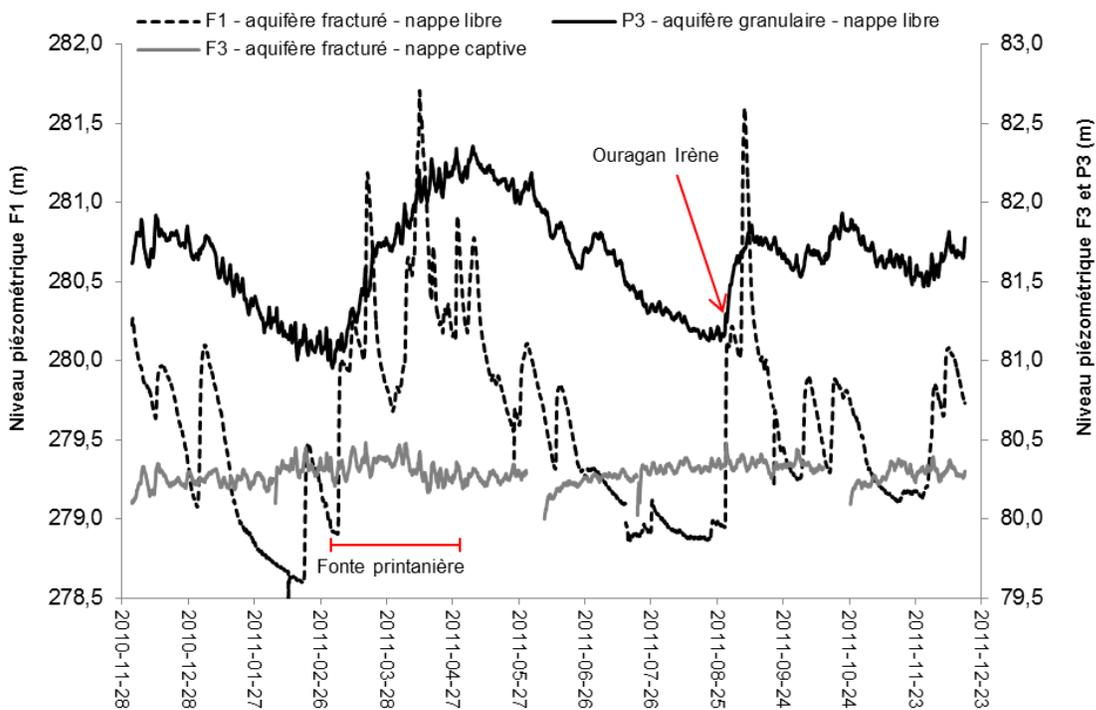
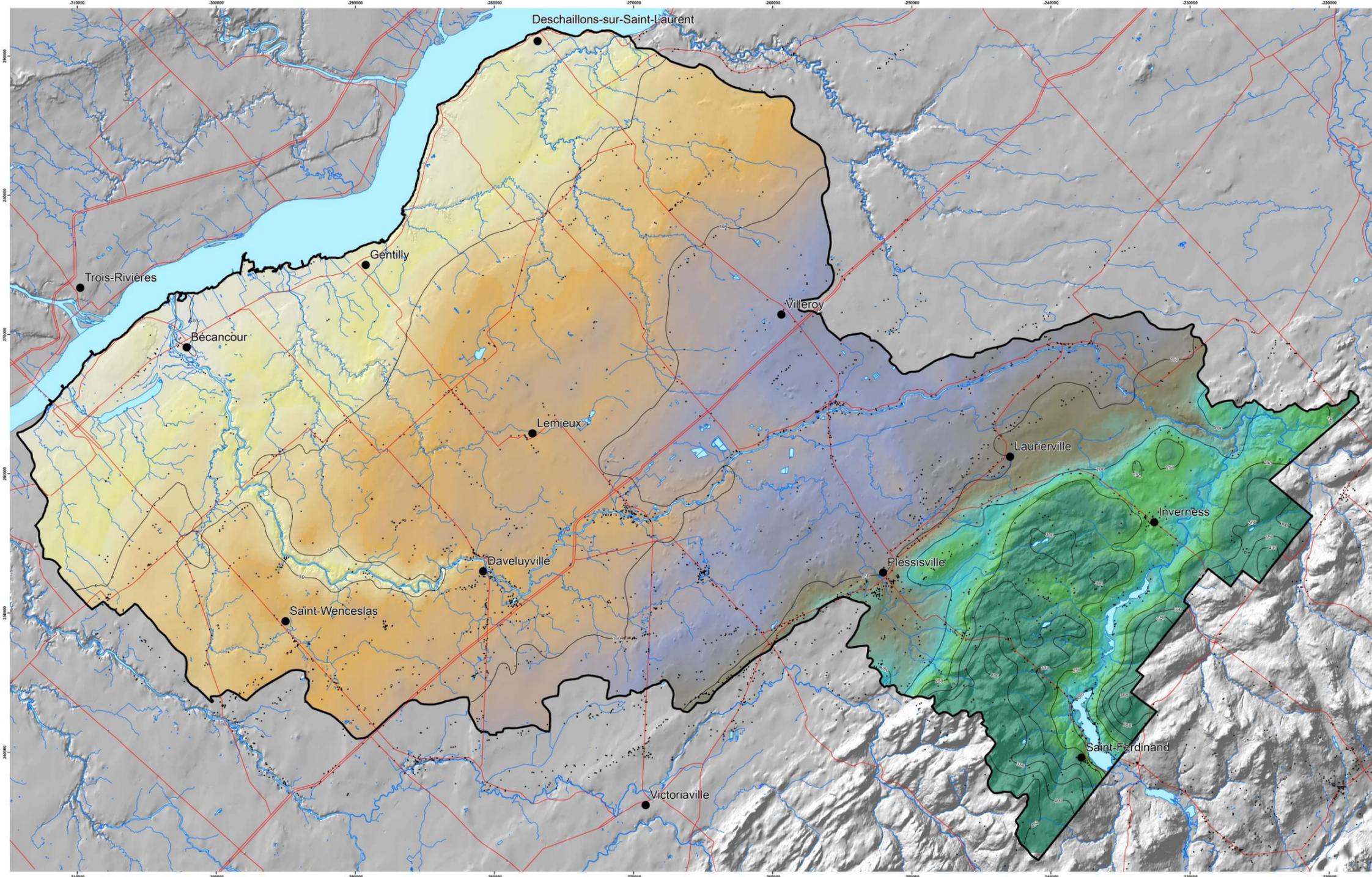


Figure 34 Séries temporelles des niveaux piézométriques dans trois forages



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude
- Élévation piézométrique (m)
 - Maximum : 478
 - Minimum : 5
- Isopièzes (intervalle 50m)
- Points utilisés pour l'interpolation
 - Consultant
 - SIH
 - UQAM



MÉTADONNÉES
Protocole livrable 20
Section 5.2 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 35 Piézométrie de l'aquifère au roc

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MRN 20K
Piézométrie: UQAM
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ne garantissent aucune responsabilité quant à l'utilisation ou au fait particulier de toute donnée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou les données et étant rattachées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagnon, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013. Projet de cartographie des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

5.3 Recharge

5.3.1 Débits de base mesurés et obtenus par séparation des hydrogrammes

Le débit de base représente la décharge de l'aquifère dans le cours d'eau. Le débit de base annuel est souvent utilisé pour estimer la recharge de l'aquifère sur un bassin versant. Les mesures de débits en période d'étiage permettent également de contraindre la calibration des modèles hydrogéologiques. La **figure 36** présente les débits mesurés en période d'étiage dans six cours d'eau non instrumentés en 2010, 2011 et 2012. Même si les débits ont chaque fois été mesurés après 4 et 10 jours sans pluie, les valeurs sont très variables d'une année à l'autre. Ceci reflète les conditions antécédentes à plus long terme de vidange de l'aquifère.

Le **tableau 21** illustre les statistiques des données de débit de base provenant du CEHQ. Les débits de base varient significativement d'un bassin versant à l'autre, en fonction de la taille du bassin, de sa position sur la zone d'étude, des pentes, de la nature des dépôts de surface et de l'occupation du territoire. Ils sont maximum à la station 024007 (20,69 m³/s, soit l'équivalent de 280 mm/an) et minimum à la station 023902 (1,81 m³/s, soit l'équivalent de 187 mm/an). Le débit de base représente entre 29,8% et 50,3% du débit total des cours d'eau pour lesquels des données sont disponibles. La proportion la plus élevée s'explique par le fait que seulement les données des périodes estivales sont disponibles pour la station sur la rivière Gentilly (023902). Les périodes estivales étant généralement caractérisées par des périodes de sécheresse, il est normal que le débit de base moyen représente une plus forte proportion du débit total moyen. Les données fournies par le CEHQ proviennent d'une séparation d'hydrogramme basée sur la méthode d'Eckhardt (2005). Ce filtre tend généralement à surestimer le débit de base provenant strictement de l'aquifère régional, car il inclut en partie l'écoulement hypodermique.

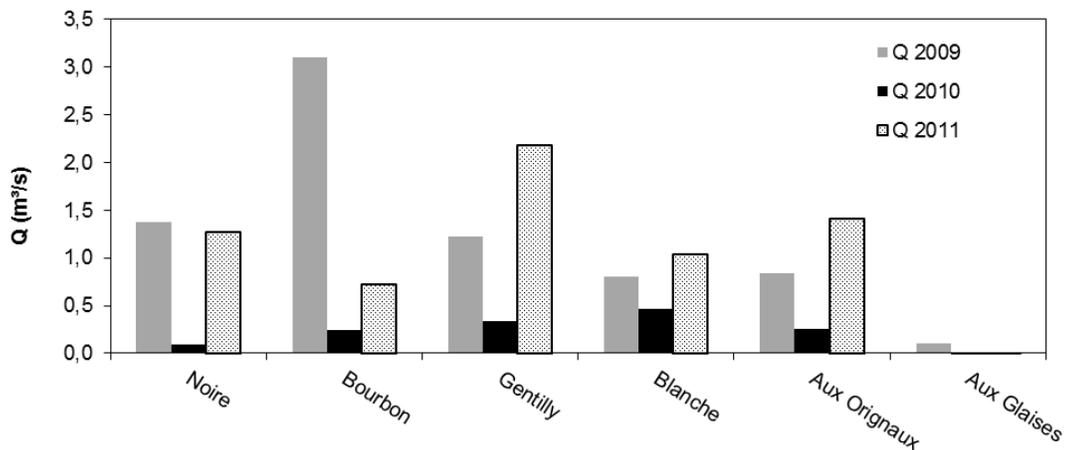


Figure 36 Débit en période d'étiage pour différents cours d'eau non instrumentés

Tableau 21 Statistiques sur les débits de base fournis par le CEHQ

| Station | Débit total journalier moyen (m ³ /s) | Débit de base journalier moyen (m ³ /s) | Proportion du débit total | Débit de base mm/an** |
|---------|--|--|---------------------------|-----------------------|
| 024014 | 48,08 | 19,09 | 39,7% | 277 |
| 024013 | 5,24 | 1,98 | 37,9% | 275 |
| 024003 | 22,05 | 6,57 | 29,8% | 225 |
| 024007 | 53,00 | 20,69 | 39,0% | 280 |
| 023701 | 6,67 | 2,23 | 33,5% | 198 |
| 023902* | 3,59 | 1,81 | 50,3% | 188 |

* Données estivales

** Équivalent en hauteur d'eau sur le bassin versant de la station

5.3.2 Recharge par bassin versant simulée avec MOHYSE

La recharge de l'aquifère par bassin versant a été quantifiée à l'aide du modèle hydrologique simplifié MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2007) par Meyzonnat (2012) dans le cadre d'une maîtrise en sciences de la Terre à l'UQAM. Le modèle MOHYSE permet de reproduire les débits totaux d'un cours d'eau en fonction de l'historique des données météorologiques. MOHYSE est un modèle hydrologique conceptuel comprenant deux réservoirs souterrains, le premier représentant la zone non saturée et le second l'aquifère. Après calage des débits, le modèle permet donc une estimation du volume d'eau qui transite du premier réservoir vers le second, ce volume étant considéré égal à la recharge de l'aquifère. Cependant, l'usage de ce modèle pour estimer la recharge est inhabituel, car MOHYSE a été conçu pour la simulation des débits de surface. En raison de la simplicité de ce modèle qui n'est pas spatialement distribué, la recharge ainsi estimée est approximative et ne tient pas compte de la variabilité spatiale des pentes, des dépôts de surface ou de l'occupation du territoire. Le volume total d'eau qui transite entre les deux réservoirs pendant une année est néanmoins considéré représentatif de la recharge annuelle de l'aquifère. Une version Excel du modèle MOHYSE a été utilisée dans ce projet.

Dans le projet, MOHYSE a été utilisé sur cinq sous-bassins versants, délimités par les cinq stations limnimétriques pour lesquelles les données ont été jugées suffisamment fiables et continues (voir **Tableaux 4** et **21** pour informations sur les stations; voir **Figure 14** pour la position des stations) : les bassins délimités par les stations 024013, 024003 et 024007 sur la Bécancour, de même que les bassins délimités par les stations 023701 sur la Petite rivière du Chêne et 024012 sur la rivière Palmer, un affluent de la Bécancour dans la zone amont. Pour les quatre premières stations, les débits de base sont estimés par le CEHQ (**Tableau 21**).

Les simulations ont été réalisées sur la période correspondant aux séries temporelles disponibles pour les débits des rivières. Le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) a été utilisé pour optimiser les paramètres (à l'aide du solveur Excel) dans le but de

reproduire au mieux les débits totaux mesurés aux cinq stations. Les détails du processus de calage peuvent être consultés dans Meyzonnat (2012). Les données météorologiques journalières (neige, pluie, température) appliquées à chacun des cinq bassins modélisés ont été établies à l'aide de polygones de Thiessen en fonction des données disponibles aux stations météorologiques présentes sur la zone d'étude. Le flux d'eau annuel simulé entre la zone non saturée et la zone saturée est interprété comme la valeur de la recharge annuelle moyenne sur la période considérée pour chaque bassin.

Les hydrogrammes simulés pour les cinq bassins versants peuvent être consultés dans Meyzonnat (2012). Le **tableau 22** montre le résultat du bilan hydrique simulé pour les cinq bassins versants. La modélisation des débits aux stations 024012 et 023701 n'a pas donné des résultats satisfaisants ($NS < 0.65$) et les recharges sur ces stations sont illustrées à titre indicatif seulement. Ces résultats peuvent être dus au fait que les séries temporelles utilisées pour ces derniers bassins ne sont pas continues. Par ailleurs, le modèle MOHYSE implique que toute la recharge simulée sur un bassin retourne au cours d'eau dans ce même bassin. Ceci est une hypothèse probable pour des flux d'eau souterraine peu profonds. Cependant, les écoulements d'eau souterraine régionaux n'induisent pas forcément que toute la recharge d'un sous-bassin versant retourne au cours d'eau dans le même périmètre. En réalité, plus les écoulements d'eau souterraine sont profonds et régionaux, moins leur contribution au débit de base de la rivière sera corrélée avec les intrants météorologiques locaux. Les mauvais résultats obtenus pour le sous-bassin délimité par la station 023701 (située en aval de la zone Bécancour) pourraient être dus à une contribution régionale non négligeable du débit de base sur la Petite rivière du Chêne qui ne serait pas corrélée aux intrants météorologiques utilisés, rendant dans ce cas le modèle hydrologique MOHYSE inadéquat.

Tableau 22 Bilan hydrique simulé avec le modèle MOHYSE

| Station | Précipitation | | Ruissellement | | Ruissellement hypodermique | | ETP | | Recharge | | NS* |
|---------|---------------|-----|---------------|------|----------------------------|------|-------|------|----------|------|------|
| | mm/an | % | mm/an | % | mm/an | % | mm/an | % | mm/an | % | |
| 024013 | 1249 | 100 | 407 | 32.6 | 156 | 12.5 | 507 | 40.6 | 179 | 14.3 | 0.65 |
| 024003 | 1200 | 100 | 420 | 35.0 | 124 | 10.3 | 506 | 42.2 | 150 | 12.5 | 0.79 |
| 024007 | 1129 | 100 | 370 | 32.8 | 142 | 12.6 | 502 | 44.5 | 115 | 10.2 | 0.73 |
| 023701 | 1052 | 100 | 189 | 18.0 | 214 | 20.3 | 514 | 48.9 | 135 | 12.8 | 0.35 |
| 024012 | 1031 | 100 | 361 | 35.0 | 144 | 14.0 | 412 | 40.0 | 114 | 11.1 | 0.55 |

*NS: critère de Nash-Stucliffe

Les simulations pour les bassins 024013, 024003 et 024007, situés en amont de la zone d'étude, sont satisfaisantes. Les valeurs de recharge les plus élevées soient 150 et 179 mm/an correspondent aux bassins de petite dimension situés dans le piémont appalachien (024003 et 024013 respectivement). Ces bassins sont associés à la présence marquée de till mince ou de roc affleurant. À l'inverse, le till devient généralement plus épais et de granulométrie plus fine vers l'aval du bassin, ce qui induirait des recharges moyennes moins élevées, soit de 115 mm/an pour le bassin dont le territoire s'étend du piémont vers la plaine centrale (024007). À titre de comparaison, la recharge simulée avec MOHYSE est inférieure aux débits de base estimés avec le filtre d'Eckhardt (2005).

Les flux calculés avec MOHYSE pour le bassin de plus grande dimension (024007) entre 1982 et 1992 (**Figure 37**) indiquent que la quantité de précipitations influence directement le flux de ruissellement, ainsi que le flux hypodermique. La recharge est influencée par les précipitations, mais selon une amplitude moins marquée que pour le ruissellement. L'évapotranspiration suit une tendance indépendante des précipitations et serait donc plutôt contrôlée par les différences de températures entre les années plus ou moins chaudes. Selon les résultats du modèle, la recharge serait principalement contrôlée par les précipitations, et les résultats ne montrent pas de lien clair avec l'évapotranspiration. Les flux simulés pour les autres bassins ne sont pas illustrés ici, mais présentent des caractéristiques similaires.

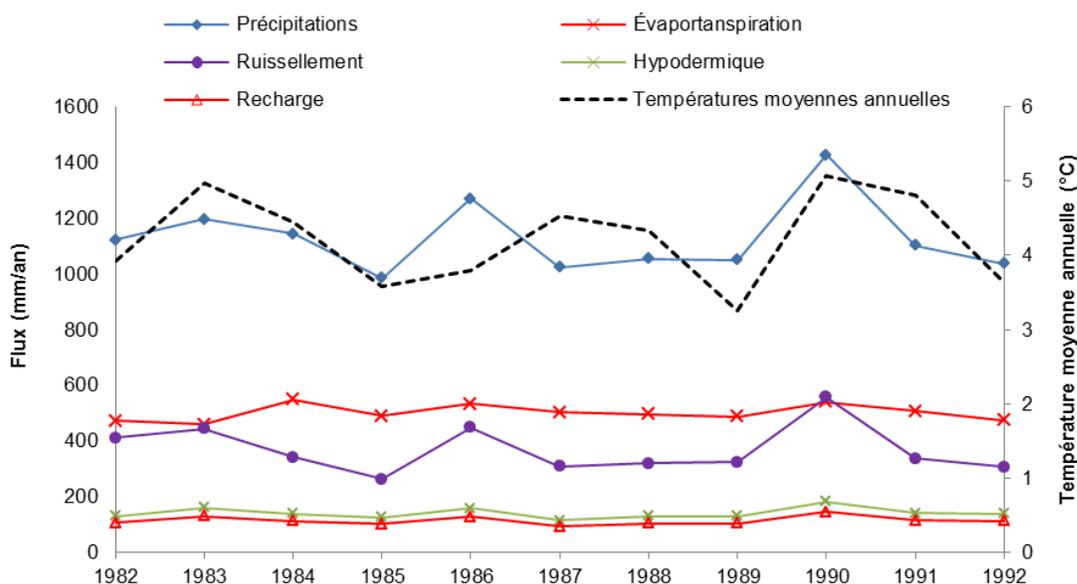


Figure 37 Flux obtenus avec MOHYSE sur le bassin 024007 entre 1982 et 1992

La **figure 38** illustre un exemple de débits simulés et mesurés pour le bassin délimité par la station 024007 en 1985 (les résultats des autres bassins et des autres années sont comparables). Tel qu'attendu, le ruissellement augmente rapidement après un événement pluvieux tandis que la réponse est lissée pour les débits hypodermiques et la contribution de l'aquifère. Par exemple, la fonte de la neige en mai 1985 provoque un ruissellement très important, mais une réponse beaucoup moins marquée pour l'aquifère (**Figure 38**).

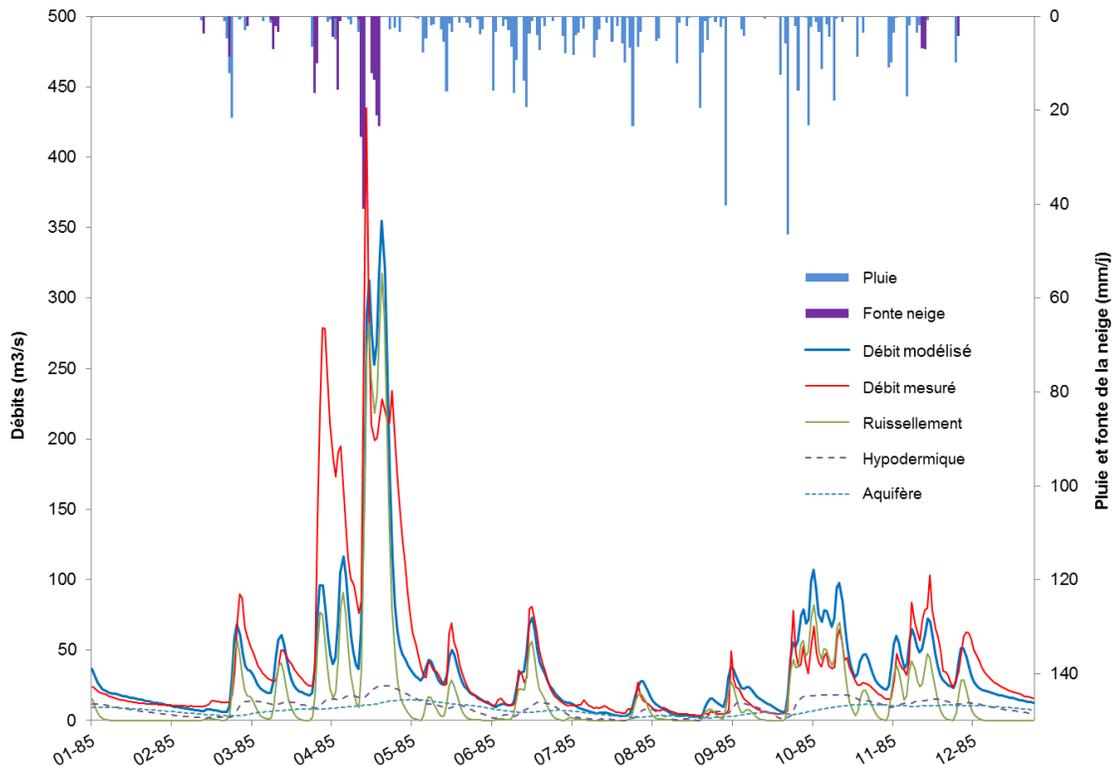


Figure 38 Détail des flux calculés avec MOHYSE sur le bassin 024007 pour 1985

5.3.3 Recharge spatialisée simulée par bilan hydrique spatialisé

La recharge potentielle à l'aquifère a également été calculée en réalisant un bilan hydrique journalier sur des mailles de 500 m x 500 m (4000 cellules sur la zone d'étude) sur une période de 20 ans (1990-2010). Pour y parvenir, un modèle simple a été développé dans Excel en Visual Basic. Le modèle a d'abord été calé sur le bassin délimité par la station 024003 (station amont sur la rivière Bécancour) en raison de la longue chronique de débits disponible à cette station et de l'absence de zone de nappe captive. Les paramètres calés ont ensuite été utilisés pour l'ensemble de la zone d'étude. La recharge spatialement distribuée ainsi calculée représente une recharge potentielle à l'aquifère. Dans les zone de nappe captive, cette recharge ne peut atteindre l'aquifère

(recharge posée égale à zéro). Dans les zones de nappe semi-captive, 50% de la recharge calculée par bilan hydrique est supposée atteindre l'aquifère rocheux. Les volumes d'eau ainsi interceptés sont redirigés vers le ruissellement de surface et l'écoulement hypodermique. L'**Annexe 13** décrit de manière détaillée les étapes du calcul et le calage du modèle. Les résultats seront présentés au colloque annuel de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues qui se tiendra à Montréal en septembre 2013 (Meyzonnat et al., 2013).

La recharge potentielle à l'aquifère obtenue pour la zone d'étude avec cette approche est de 244 mm/an. La recharge réelle, obtenue en tenant en compte la présence de zones où l'aquifère fracturé est semi-captif et captif, est de 159 mm/an (voir **Figure 39** pour la distribution spatiale). La recharge est minimale où les dépôts de surface sont peu perméables, à aval de la zone d'étude. Elle est maximale aux endroits où les matériaux en surface sont perméables (piémont et Appalaches). Les valeurs maximales sont observées sur un très petit nombre de cellules où les dépôts sont très perméables et les pentes très faibles.

La distribution temporelle bimodale de la recharge calculée par bilan hydrique sur le bassin versant délimité par la station 024003 pour la période 1990-2010 est très similaire à celle simulée par MOHYSE sur le bassin versant délimité par la station 024007 pour l'année 1985 (**Figure 39**). La recharge printanière au moment de la fonte de la neige (mars à mai) correspond à 26,4 et 29,5 % de la recharge annuelle respectivement avec l'approche par bilan hydrique et avec MOHYSE. La recharge automnale (octobre et novembre) représente 26,2 et 29,7 % de la recharge pour les deux approches respectivement.

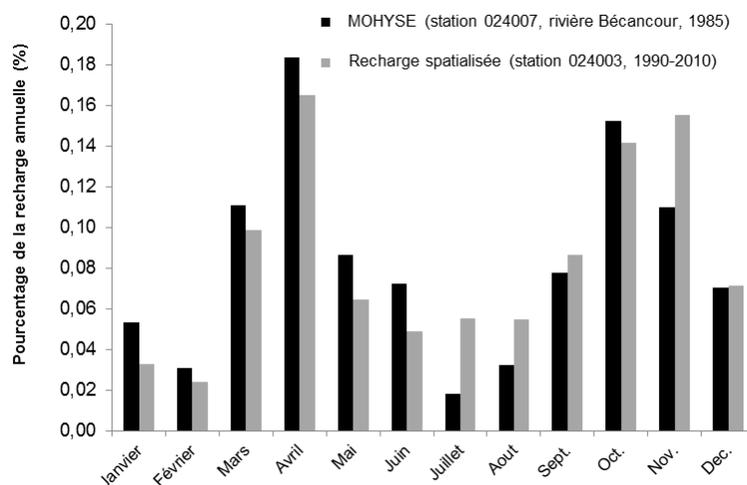


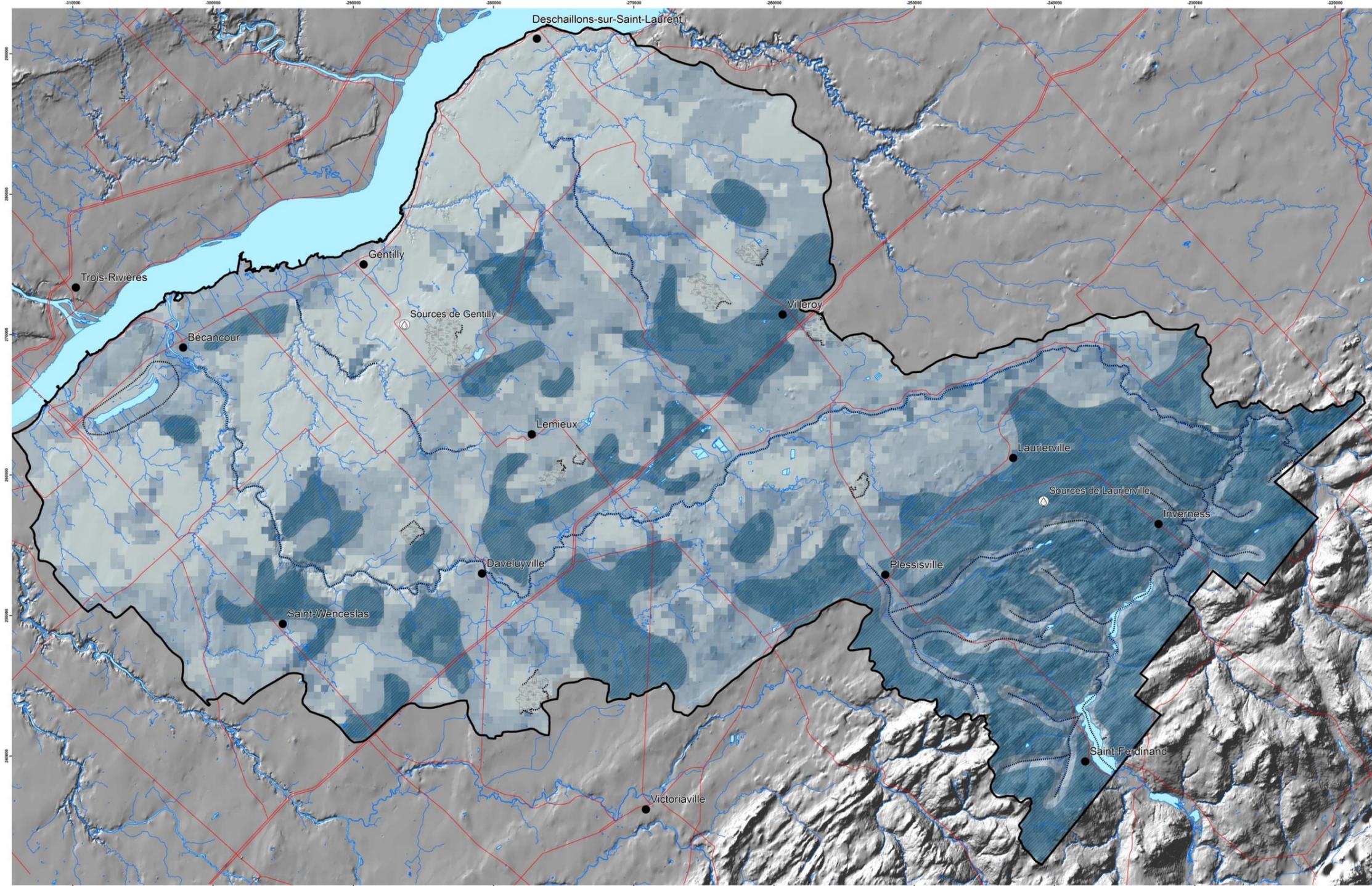
Figure 39 Saisonnalité de la recharge avec MOHYSE et avec le bilan hydrique spatialisé

5.3.4 Zones de recharge préférentielle et de résurgence

Les zones de recharge supérieures à 200 mm/an ont été identifiées comme zones de recharge préférentielle de l'aquifère au roc (**Figure 40**). Le seuil de 200 mm/an représente le 50^e percentile des valeurs de recharge calculées à l'aide du bilan hydrique spatialisé. Les zones de recharge préférentielle sont situées principalement dans la partie amont du domaine étudié (Appalaches). Ces zones sont clairement identifiées avec la signature géochimique de l'eau souterraine (voir **section 5.6** plus loin). Dans le piémont appalachien et la partie centrale où l'aquifère rocheux est à nappe libre; les zones de recharge préférentielle sont également présentes au milieu de zones de recharge plus faibles. Ces zones de recharge localisées ont également été mises en évidence par la géochimie. Il n'y a pas de zone de recharge préférentielle dans la portion située en aval où les dépôts fins sont continus et épais. Dans ce secteur, la géochimie montre des eaux plus minéralisées et probablement plus anciennes, donc recevant peu de recharge.

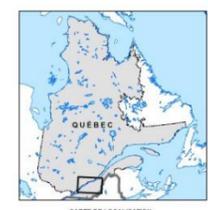
Les zones de résurgence des eaux souterraines correspondent principalement aux portions de rivières qui coulent directement sur le roc. Toutes les rivières principales situées dans la portion appalachienne de la zone d'étude sont ainsi considérées comme des zones de résurgence potentielle. Dans la portion plus basse de la zone d'étude, des parties de la rivière Bécancour ont été identifiées comme des zones de résurgence de l'aquifère au moyen d'une analyse du ²²²Rn (voir **section 5.6.3** plus loin). Ces zones correspondent principalement aux portions de la rivière qui ont érodé les dépôts meubles peu perméables en surface ou qui coulent sur des dépôts meubles perméables directement en contact avec le roc. Les portions des rivières Gentilly et Petite du Chêne qui sont situées dans un contexte géologique similaire ont été considérées comme zones de résurgence potentielle de l'eau souterraine.

Il existe très peu de sources répertoriées sur la zone d'étude. Les sources de Gentilly et celles de Laurierville sont toutefois bien connues et ont été identifiées comme des résurgences de l'eau souterraine. Le secteur du lac Saint-Paul a également été identifié comme une zone de résurgence au moyen de la piézométrie du secteur. Par exemple, le niveau piézométrique du forage F9 (800 m au nord-ouest du lac) est en général au même niveau ou au-dessus que la surface du sol. Ceci indique une zone de résurgence potentielle lorsque le niveau piézométrique rejoint la topographie, comme c'est le cas au lac Saint-Paul. Les portions des neuf tourbières étudiées par Avard (2013) et ayant été identifiées comme étant alimentées par l'aquifère superficiel ont également été cartographiées comme zones de résurgence. Il est important de souligner que les milieux humides qui sont alimentés par l'eau souterraine (et qui sont donc des zones de résurgence de l'aquifère superficiel) sont certainement plus nombreux que ceux identifiés ici.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude
- Recharge spatialisée (mm/an)
 - Maximum: 200
 - Minimum: 0
- ⊞ Zone de recharge préférentielle (+ de 200 mm/an)
- ⊞ Tourbières étudiées (Avard, 2013)
- ⊞ Source
- ⋯ Résurgence



MÉTADONNÉES
Section 5.3.4 du Rapport d'Étape Phase 3
(Larocque et al, 2013)

Figure 40 Zones de recharge préférentielle et de résurgences

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Livrabte: UQAM, MDDEFP, Consultants, SIH
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le porteur régional ne décline aucune responsabilité quant à l'exactitude ou à l'actualité des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les données requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et l'exactitude des données de terrain. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et s'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de toute œuvre dérivée, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données et plans attachés.

Notation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Maynard, G. 2013. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour. Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

5.4 Bilan hydrique régional

Le bilan hydrique régional a été calculé à l'aide du modèle pour le calcul de la recharge spatialisée développé dans Excel en Visual Basic (voir **section 5.3.3**). Pour la période simulée, les apports verticaux varient de 869 à 1220 mm/an et sont en moyenne de 1050 mm/an. Le modèle simule un ruissellement total (de surface et hypodermique) pour l'ensemble de la zone d'étude et pour la période 1990-2010 de 600 mm/an, soit l'équivalent de 57% des apports verticaux. Cette valeur est supérieure à la somme du ruissellement de surface et du ruissellement hypodermique obtenus avec MOHYSE sur le bassin délimité par la station 024003 (respectivement 35% et 10,3%, pour un total de 45,3% des précipitations totales). L'évapotranspiration moyenne annuelle simulée par le bilan hydrique est de 291 mm/an (28% des apports verticaux), soit une valeur significativement plus faible que celle obtenue avec MOHYSE sur le bassin 024003 (42,2% des précipitations totales). L'ETP calculée par bilan hydrique semble toutefois réaliste pour ce bassin: le débit total moyen à la station 024003 correspond à 757 mm/an, ce qui indique que l'ETP y est en moyenne de 291 mm/an (considérant que les apports verticaux sont de 1050 mm/an). La recharge moyenne de l'aquifère fracturé pour l'ensemble de la zone d'étude est de 159 mm/an, soit 15,1% des apports verticaux. La proportion de la recharge est plus grande que celle simulée avec MOHYSE sur le bassin 024007 (12,5%). Cette valeur de recharge est également inférieure au débit de base moyen observé fourni par le CEHQ (248 mm/an pour la station 024007). Il est important de rappeler que les débits de base fournis par le CEHQ surestiment probablement la recharge puisqu'ils incluent une composante d'écoulement hypodermique. D'ailleurs, la recharge potentielle de 244 mm/an obtenue au moyen du bilan hydrique spatialisée, i.e. sans correction pour les zones où l'aquifère fracturé est semi-captif et captif) est très similaire au débit de base fourni par le CEHQ.

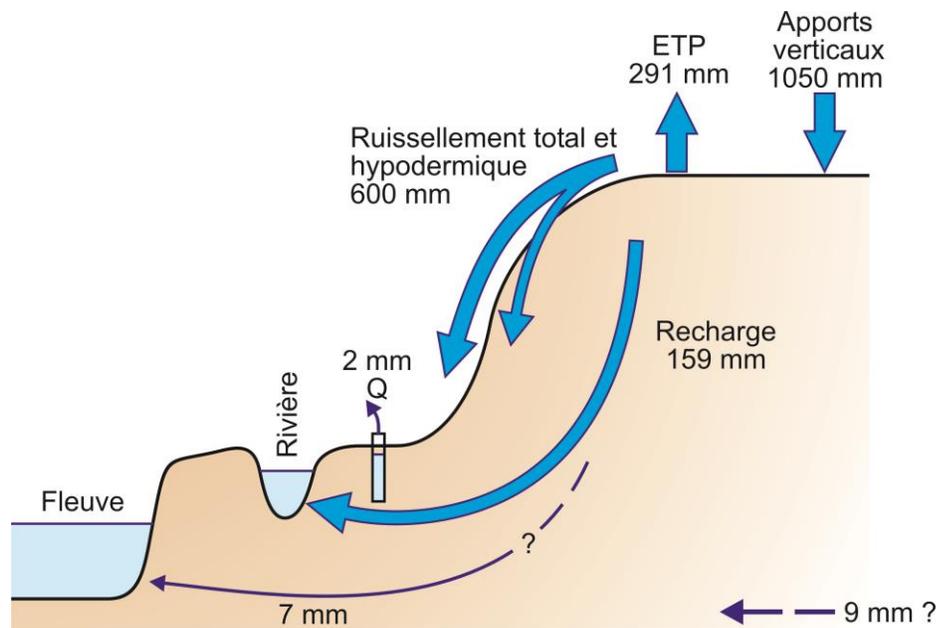


Figure 41 Bilan hydrique de la zone d'étude

Le débit total pompé à l'aquifère par les grands préleveurs et les particuliers correspond à une hauteur d'eau de 2 mm/an (voir **section 7.1** pour les résultats détaillés). Ce flux est très faible en comparaison aux autres écoulements quantifiés dans la zone d'étude. Le volume d'eau qui retourne au fleuve Saint-Laurent est estimé à 7 mm/an au moyen de la modélisation des écoulements souterrains (voir **chapitre 6**). Ce flux très faible s'explique par la géométrie de l'aquifère dans la partie aval de la zone d'étude où des écoulements souterrains très lents ont été mis en évidence par la géochimie (voir **section 5.6**). Il est probable que l'aquifère soit alimenté de l'amont (des Appalaches) par un flux d'eau souterraine de l'ordre de 9 mm/an. Cette valeur n'a toutefois pas été vérifiée directement et est très incertaine.

La variabilité temporelle des flux moyens résultant du calcul du bilan hydrique sur la zone d'étude de 1990 à 2010 (**Figure 42**) montre que l'aquifère agit comme un réservoir qui atténue les fluctuations annuelles des apports verticaux. En effet, si le ruissellement de surface et hypodermique varie de manière assez marquée suivant les apports verticaux, la recharge est relativement peu affectée par ceux-ci. Ceci reflète le fait que la quantité d'eau souterraine disponible est moins sensible aux variations interannuelles des précipitations que les débits de crue qui sont majoritairement composés de ruissellement de surface et hypodermique.

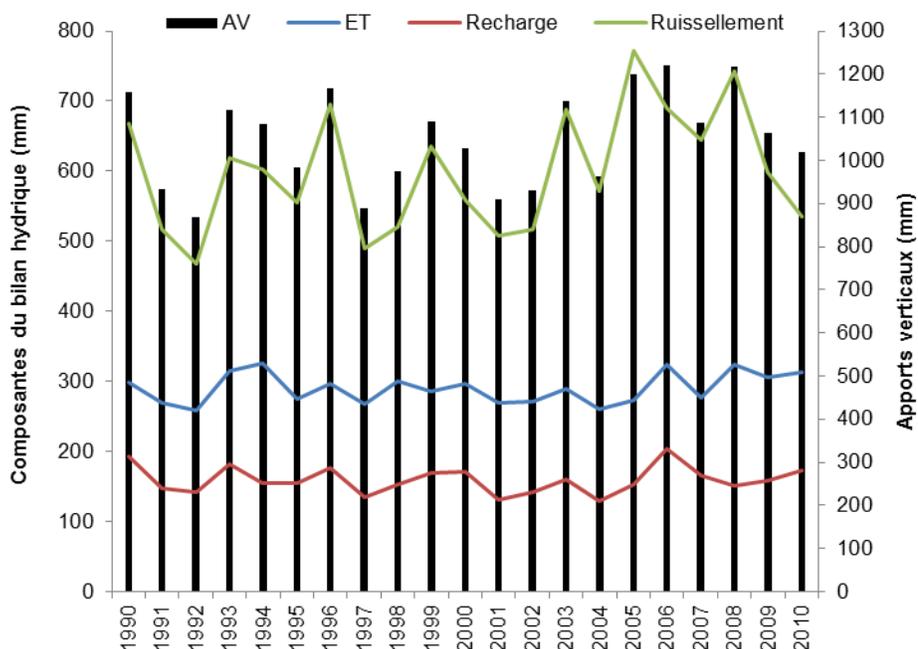


Figure 42 Évolution temporelle des flux moyens du bilan hydrique

5.5 Vulnérabilité des nappes

Une version préliminaire de la vulnérabilité de l'aquifère rocheux a été présentée au congrès GéoHydro2011 (colloque annuel de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues) et a fait l'objet d'un résumé étendu (Mezzonnat et Larocque, 2011; voir **Annexe 14**). Cette présentation faisait également état d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, basée sur la géochimie de l'eau.

La vulnérabilité de l'eau souterraine pour la zone Bécancour a été estimée grâce à l'indice DRASTIC, en suivant les règles de l'art de cette méthode développée par Aller et al. (1987). Pour l'aquifère au roc, la carte DRASTIC a été réalisée pour l'ensemble du bassin tandis que pour la surface, des indices DRASTIC ont été calculés ponctuellement à l'emplacement des piézomètres installés dans le cadre de ce projet. Une synthèse de l'approche et des calculs intermédiaires est présentée à l'**Annexe 15**.

Carte DRASTIC de l'aquifère rocheux

L'indice de vulnérabilité de l'aquifère rocheux varie de 33 à 179 sur la zone d'étude (voir **figure 44**). Vingt-huit pourcents de la zone d'étude présente une vulnérabilité pour l'aquifère au roc allant de très faible à moyenne, tandis que les 72% restants présentent un indice DRASTIC supérieur à 100 avec une vulnérabilité allant de significative à très élevée (**Figure 43**).

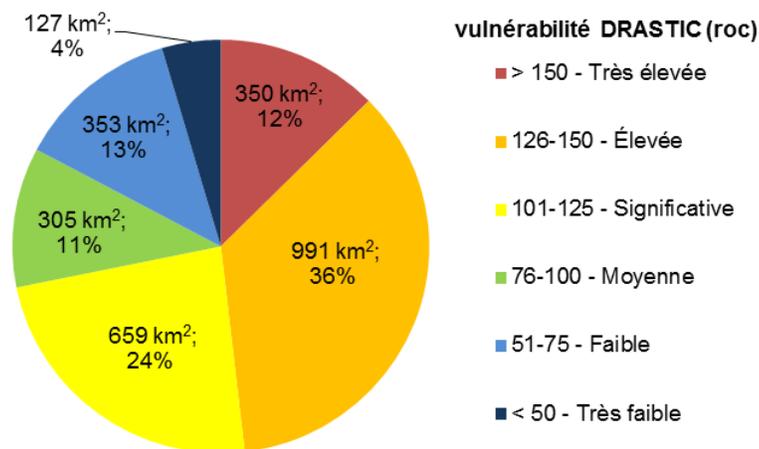


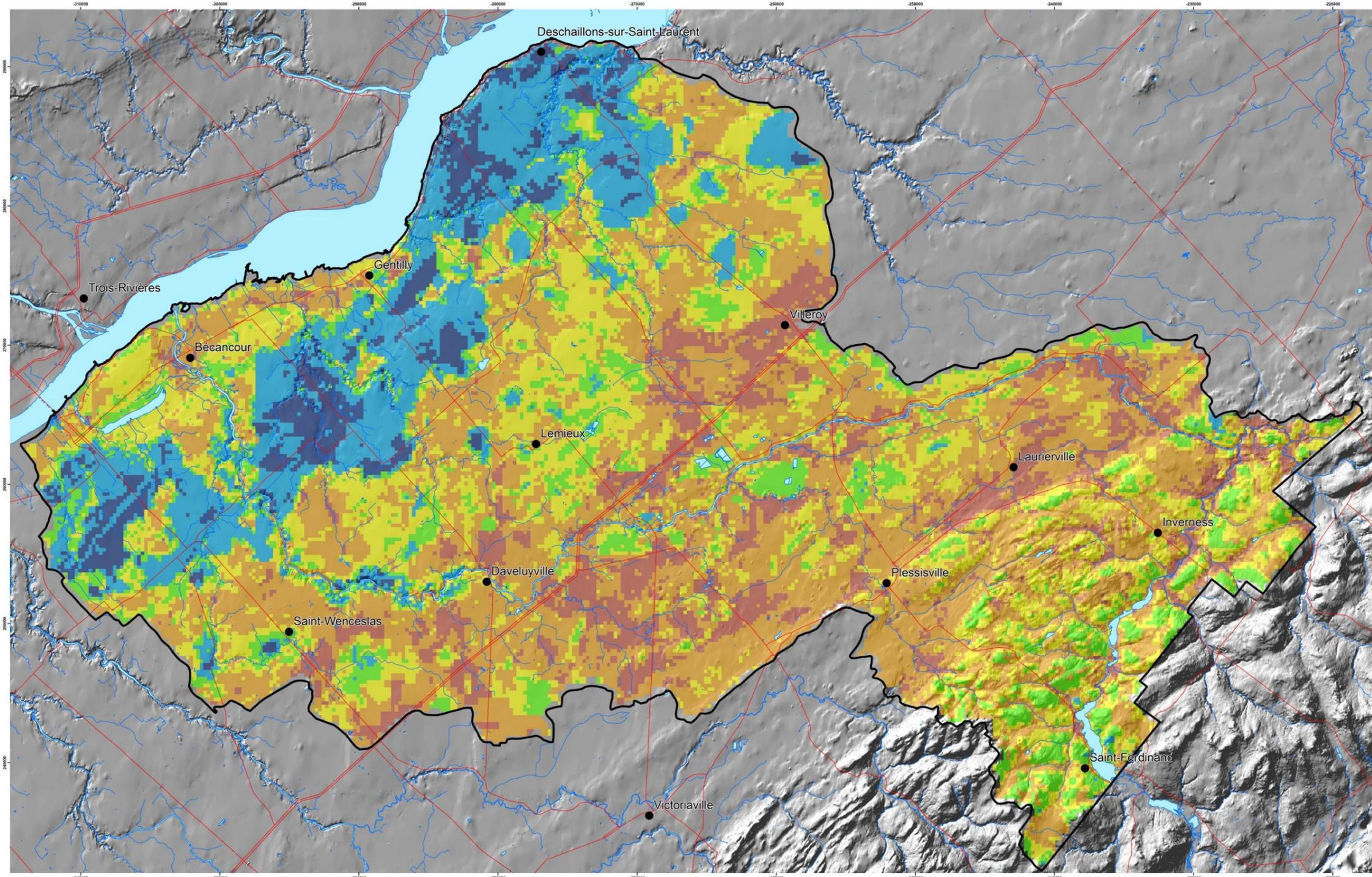
Figure 43 Superficie des classes de vulnérabilité DRASTIC au roc

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

secteur est associé à la présence de dépôts argileux qui fournissent peu de points à l'indice D (profondeur élevée du toit de l'aquifère au roc en présence d'argile), à l'indice R (recharge nulle en présence d'argile), à l'indice S (cote minimale quand l'argile se trouve à la surface du sol) et à l'indice I (indice minimal pour la zone non saturée considérée comme inexistante en présence d'argile). Des nuances pour les zones les moins vulnérables sont apportées par l'indice A (milieu aquifère), pour les différentes formations du Groupe de Bécancour, ce qui contribue à apporter plus ou moins de points aux zones les moins vulnérables situées dans la portion aval du bassin.

Dans la partie centrale de la zone d'étude et vers le piémont appalachien, la vulnérabilité DRASTIC est généralement élevée (indice DRASTIC de 126 à 150) à très élevée (indice DRASTIC de supérieur à 150). Les zones les plus vulnérables sont associées à des indices D, R et I apportant beaucoup de points, particulièrement dans le quadrilatère formé par les villes de Manseau, de Daveluyville, de Princeville et de Lyster. Ainsi, la faible profondeur de la nappe apporte des points avec l'indice D dans la partie centrale. Des taux de recharge relativement élevés apportent également des points via l'indice R pour de grandes superficies. Les indices I sont particulièrement élevés au centre du bassin lorsque la zone non saturée est de dépôts granulaires et de sédiments éoliens. Bien que la vulnérabilité de la partie centrale soit relativement élevée, des points sont cependant perdus pour l'indice R, mais aussi pour l'indice I et l'indice S à l'emplacement de zones de confinement locales avec présence de sols plus fins. Ceci est le cas particulièrement pour les secteurs où des dépôts organiques sont présents, par exemple aux alentours des villes de Saint Louis-de-Blandford et de Plage-Party. Cette dernière interprétation doit être prise avec prudence, car des zones de cultures de canneberges sont présentes à ces endroits et leur exploitation entraîne généralement le remaniement de la couverture organique naturellement présente. Ces zones pour lesquelles des points sont perdus marquent des enclaves où la vulnérabilité baisse et devient moyenne (indice DRASTIC de 76 à 100).

Pour le secteur des Appalaches, la méthode DRASTIC indique une vulnérabilité contrastée avec présence simultanée de zones dont la vulnérabilité est faible à très élevée. Pour cette région, des points de l'indice DRASTIC sont majoritairement apportés grâce aux taux de recharge élevés (indice R). En revanche, des profondeurs de nappe (indice D) plus importantes selon l'effet topographique, viennent enlever beaucoup de points à l'indice DRASTIC et caractérisent les zones où la vulnérabilité est moyenne à faible (indice DRASTIC de 51 à 100), notamment sur les crêtes topographiques. Les zones pour lesquelles la vulnérabilité est très élevée (indice DRASTIC supérieur à 150) sont caractérisées par la présence de dépôts granulaires fluvioglaciaires où la profondeur de la nappe est peu élevée, comme c'est le cas dans la vallée de la rivière Bécancour entre le lac Saint-Joseph et l'extrémité est de la zone d'étude. Le contraste entre la présence de zones faiblement vulnérables avec des zones fortement vulnérables est renforcé par la présence voisine de sols de natures différentes qui influent sur les indices S et I.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Indice DRASTIC

- >150 (très élevé)
- 126 - 150 (élevé)
- 101 - 125 (significatif)
- 76 - 100 (moyen)
- 51 - 75 (faible)
- <50 (très faible)

Figure 44 Indice DRASTIC de l'aquifère au roc

ZONE BÉCANCOUR

QUÉBEC



Projection cartographique : Lambert de Québec
Système de coordonnées : 48 3
Système de référence géodésique : NAD 83



MÉTADONNÉES
Protocole livrable 22
Section 5.5 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

SOURCES / RÉALISATION
Sources :
Réseau hydrographique : BDTQ 20K
Réseau routier : BNDT 250K
Couches d'information utilisées :
Piézométrie, dépôts quaternaires, pédologie,
géologie du roc, propriétés hydrogéologiques de
l'aquifère fracturé, recharge spatialisée (UQAM)
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découplant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ne garantissent aucune responsabilité quant à l'utilisation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013.
Projet de cartographie des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

Indice DRASTIC des aquifères superficiels

La zone à l'étude comporte des aquifères granulaires enfouis vers l'aval de la zone d'étude (e.g. sables des Vieilles Forges), mais ceux-ci sont la plupart du temps limités en épaisseur et en superficie. Bien que le bassin comporte de larges zones pour lesquelles du sable est présent à la surface, l'épaisseur de ces derniers reste trop faible pour qu'ils puissent être considérés comme des aquifères importants. Parce qu'il n'y a pas d'importants aquifères de surface à l'échelle régionale, aucune carte DRASTIC de surface n'a été produite dans le cadre de ce projet. Cependant, afin de donner un aperçu du niveau de vulnérabilité à certains endroits où du sable est présent en surface, des indices DRASTIC ponctuels ont été calculés à l'emplacement des six piézomètres installés en 2010 lors des travaux de terrains (voir localisation **figure 19** et résultats **tableau 24**). Les poids et cotes utilisées pour l'estimation de la vulnérabilité aux piézomètres ont été établis suivant la méthode DRASTIC (Aller et al. 1987). Les indices D ont été obtenus en prenant la moyenne des niveaux piézométriques mesurés entre 2010 et 2011. Les indices R ont été établis en fonction des valeurs obtenues pour l'infiltration potentielle (livrable 28, zones de recharge et de résurgence). Les indices A, S et I ont été établis en fonction des descriptions stratigraphiques des forages et de la profondeur de la zone crépinée. L'indice C a été obtenu en réalisant la moyenne géométrique des conductivités hydrauliques mesurées lors des essais hydrauliques. L'indice T provient des pentes obtenues selon le modèle numérique de terrain.

Les indices DRASTIC calculés pour cinq piézomètres sur six sont supérieurs à 150 (P1, P3, P4, P5, P6). En comparant ces valeurs avec la carte des indices DRASTIC réalisés pour le roc, ceci indique que cinq piézomètres sur six présentent une vulnérabilité très élevée. Le piézomètre P2 présente une vulnérabilité moyenne, car il traverse des dépôts organiques qui limitent l'infiltration, et la crépine est installée dans un till. Il est logique de retrouver une vulnérabilité généralement élevée pour les aquifères granulaires de surface, car à l'inverse de l'aquifère au roc, ces derniers ne bénéficient pas de couvertures confinantes offrant un niveau de protection par rapport à de la contamination depuis la surface du sol. Comme pour l'aquifère au roc, l'indice DRASTIC est plus sensible aux paramètres ayant les poids les plus élevés, soit pour D, R et I. Pour les piézomètres étudiés la profondeur de la nappe est faible, ce qui apporte beaucoup de points à l'indice D. Les indices élevés s'expliquent aussi par de fortes valeurs d'infiltration, apportant beaucoup de points à l'indice R (sauf pour le piézomètre P2), et à la nature graveleuse ou sableuse des dépôts qui apportent beaucoup de points aux indices I et S.

Tableau 23 Indices DRASTIC de surface pour les piézomètres

| indice | Poids | P1 | | | P2 | | | P3 | | | P4 | | | P5 | | | P6 | | |
|----------------|-------|----------|------|-----|-----------|------|-----|----------|------|-----|----------|------|-----|----------|------|-----|----------|------|-----|
| | | valeur | cote | Pts | valeur | cote | Pts | valeur | cote | Pts | valeur | cote | Pts | valeur | cote | Pts | valeur | cote | Pts |
| D | 5 | 2,05 | 9 | 45 | 0,09 | 10 | 50 | 2,13 | 9 | 45 | 1,25 | 10 | 50 | 2,23 | 9 | 45 | 2,01 | 9 | 45 |
| R | 4 | 276 | 10 | 40 | 5,8 | 1 | 4 | 139 | 6 | 24 | 162 | 6 | 24 | 175 | 6 | 24 | 251 | 8 | 32 |
| A | 3 | Gravier | 9 | 27 | Till | 5 | 15 | Sable | 8 | 24 | Sable | 8 | 24 | Till | 5 | 15 | Gravier | 9 | 27 |
| S | 2 | Gravier | 9 | 18 | Organique | 2 | 4 | Sable | 9 | 18 |
| T | 1 | 0-2% | 10 | 10 | 0-2% | 10 | 10 | 0-2% | 10 | 10 | 0-2% | 10 | 10 | 0-2% | 10 | 10 | 0-2% | 10 | 10 |
| I | 5 | Gravier | 9 | 45 | Confiné | 1 | 5 | Sable | 8 | 40 | Sable | 8 | 40 | Sable | 8 | 40 | Gravier | 9 | 45 |
| C | 3 | 4,74E-06 | 1 | 3 | 1,24E-06 | 1 | 3 | 4,11E-04 | 2 | 6 | 2,90E-05 | 1 | 3 | 7,23E-05 | 2 | 6 | 2,34E-05 | 2 | 6 |
| INDICE DRASTIC | | 188 | | | 91 | | | 167 | | | 169 | | | 158 | | | 183 | | |

Le Règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES) (Gouvernement du Québec, 2013) stipule certaines restrictions d'utilisation du sol lié à l'entreposage et à l'utilisation d'amendements agricoles qui s'appliquent à l'intérieur du périmètre de protection d'un lieu de captage d'eau souterraine, lorsque l'indice DRASTIC est égal ou supérieur à 100 sur une quelconque portion de cette aire. Au sens du RCES, les résultats obtenus pour les indices DRASTIC suggèrent ainsi que près des trois quarts de l'aquifère au roc de la zone d'étude sont vulnérables à la contamination et l'ensemble du territoire étudié pour la carte DRASTIC de surface.

Compte tenu de l'échelle de l'étude et du maillage utilisé pour l'indice DRASTIC (mailles de 250 m), des incertitudes subsistent à l'échelle locale, car les paramètres définissant la vulnérabilité peuvent varier localement dû à l'anisotropie et à l'hétérogénéité du milieu aquifère et de la géologie. De même, la méthode DRASTIC fournit des informations qualitatives, mais ne peut se substituer aux résultats d'études hydrogéologiques locales permettant d'estimer les aires de protection autour d'un puits. Dans le cadre du RCES, les études hydrogéologiques réalisées par des consultants permettent ainsi d'estimer les aires de protection bactériologique et virologique, d'estimer ponctuellement la vulnérabilité à l'aide de la méthode DRASTIC à l'emplacement de puits, et d'identifier les sources potentielles de contamination présentes en surface. Les cartes DRASTIC fournissent néanmoins aux décideurs institutionnels et municipaux, une information régionale pertinente permettant d'appréhender les zones plus ou moins vulnérables à la contamination à des fins d'aménagement et de gestion de territoire.

5.6 Géochimie de l'eau souterraine

Depuis les précipitations, jusqu'à ce qu'elle atteigne la zone saturée et tout au long de l'écoulement dans l'aquifère, l'eau subit des processus successifs qui modifient sa composition. Dans la zone d'étude, les processus hydrogéochimiques sont contrôlés 1) par la dissolution des carbonates depuis les tills et le roc; 2) par l'échange cationique Ca^{2+}/Na^{+} se produisant lors de l'interaction entre l'eau souterraine et la matrice aquifère et; 3) par la salinité de l'eau due à l'influence de la Mer de Champlain (présence d'eau confinée saumâtre et d'argiles marines dont les pores contiennent du chlorure de sodium) et 4) par le mélange de ces eaux souterraines entre elles.

Les types d'eau sont définis en fonction des concentrations en meq/L en ions majeurs (cations : Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ; anions : HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) selon leur prédominance à représenter plus de 50% de la charge de la solution. Les concentrations en meq/L pour les anions HCO_3^- et CO_3^{2-} (**Figure 45**) ont été calculées à partir de la mesure de l'alcalinité totale.

Les types d'eaux souterraines dans le roc peuvent être distingués à l'aide d'un diagramme de Piper (**Figure 45**) et classés en groupes principaux en suivant l'approche suggérée par Cloutier et al. (2008). Sur la zone d'étude, trois groupes principaux se distinguent. Sur un total de 84 échantillons retenus, 56% des échantillons appartiennent au Groupe 1 et représentent les eaux marquées par la recharge moderne. Le sous-groupe G1-A détermine les eaux marquées par la dissolution de matériaux dolomitiques, le sous-groupe G1-B détermine les eaux marquées par la dissolution de matériaux carbonatés tandis que les eaux des sous-groupes G1-C et G1-D sont représentatifs de la dissolution de gypse Ca-SO_4 . Les eaux du Groupe 2 représentent 39% des échantillons et représentent des eaux ayant subi une évolution depuis la recharge par l'échange cationique $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$ suite à l'interaction de l'eau avec la matrice aquifère. Enfin 5 % des échantillons appartiennent au Groupe 3, des eaux saumâtres marquées par l'invasion marine de la Mer de Champlain.

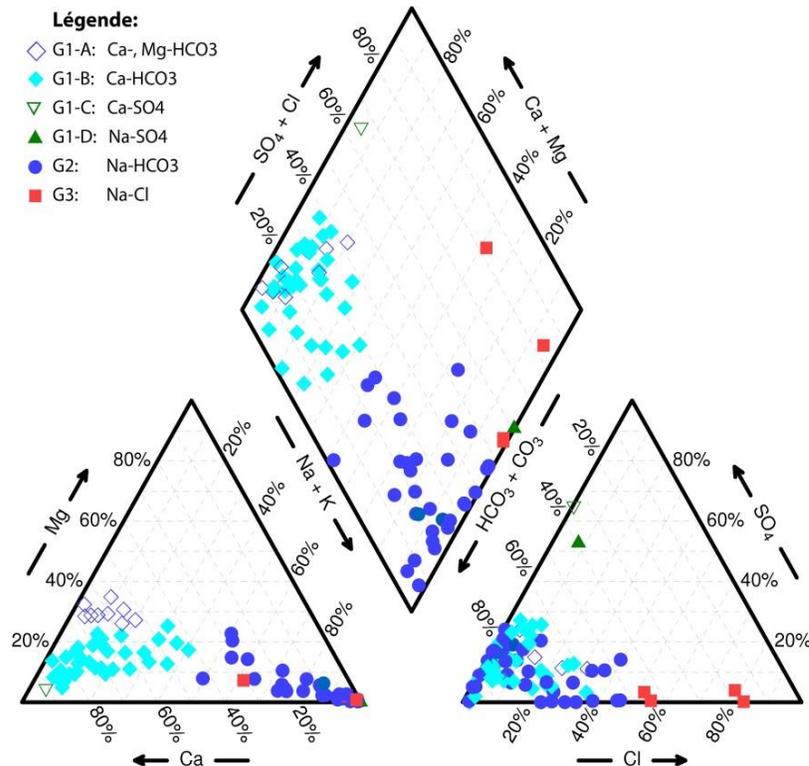


Figure 45 Diagramme de Piper pour les groupes d'eau de l'aquifère au roc

La **figure 46** met en évidence les processus d'échange cationique et de mélange intervenant dans l'eau souterraine. Les points du Groupe 2 se trouvant tous au-dessus de la droite $\text{Na}=\text{Cl}$ sont indicateurs d'un échange cationique, car la concentration de Na^+ n'est pas corrélée avec celle de Cl^- . Les eaux du Groupe 2 les plus chargées en sodium suivent la droite $\text{Na}=\text{Cl}$, ce qui pourrait indiquer un mélange entre les eaux du Groupe 2 et les eaux saumâtres du Groupe 3.

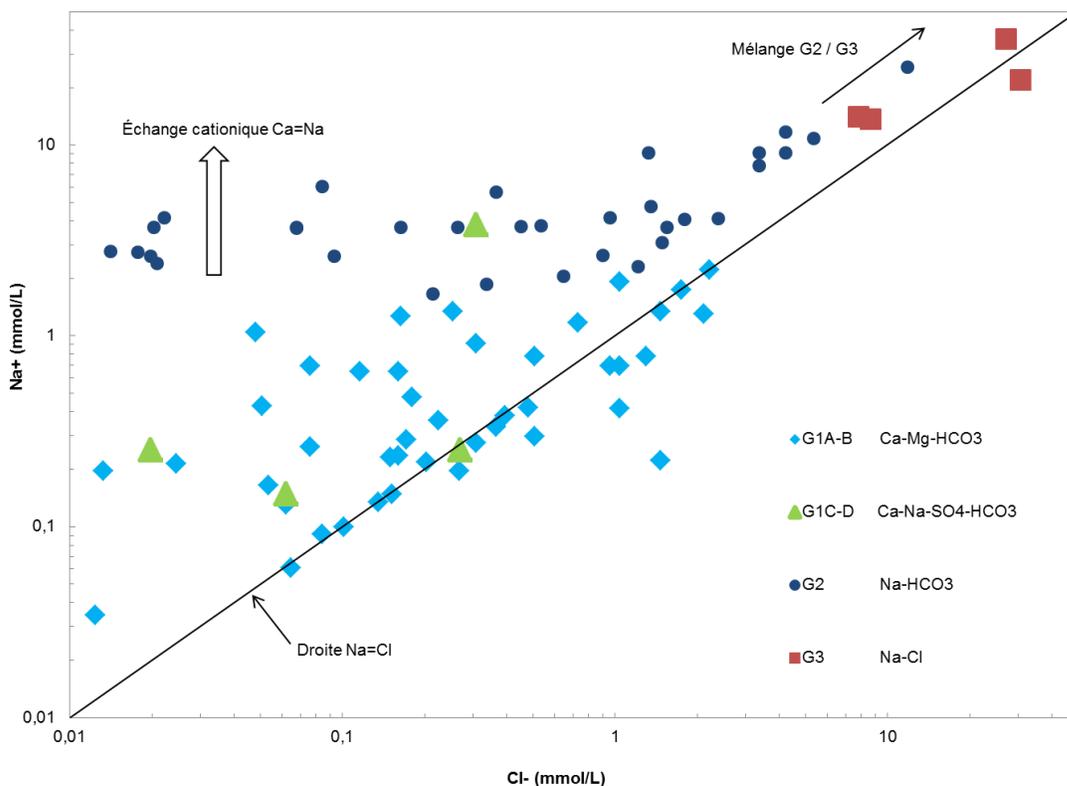
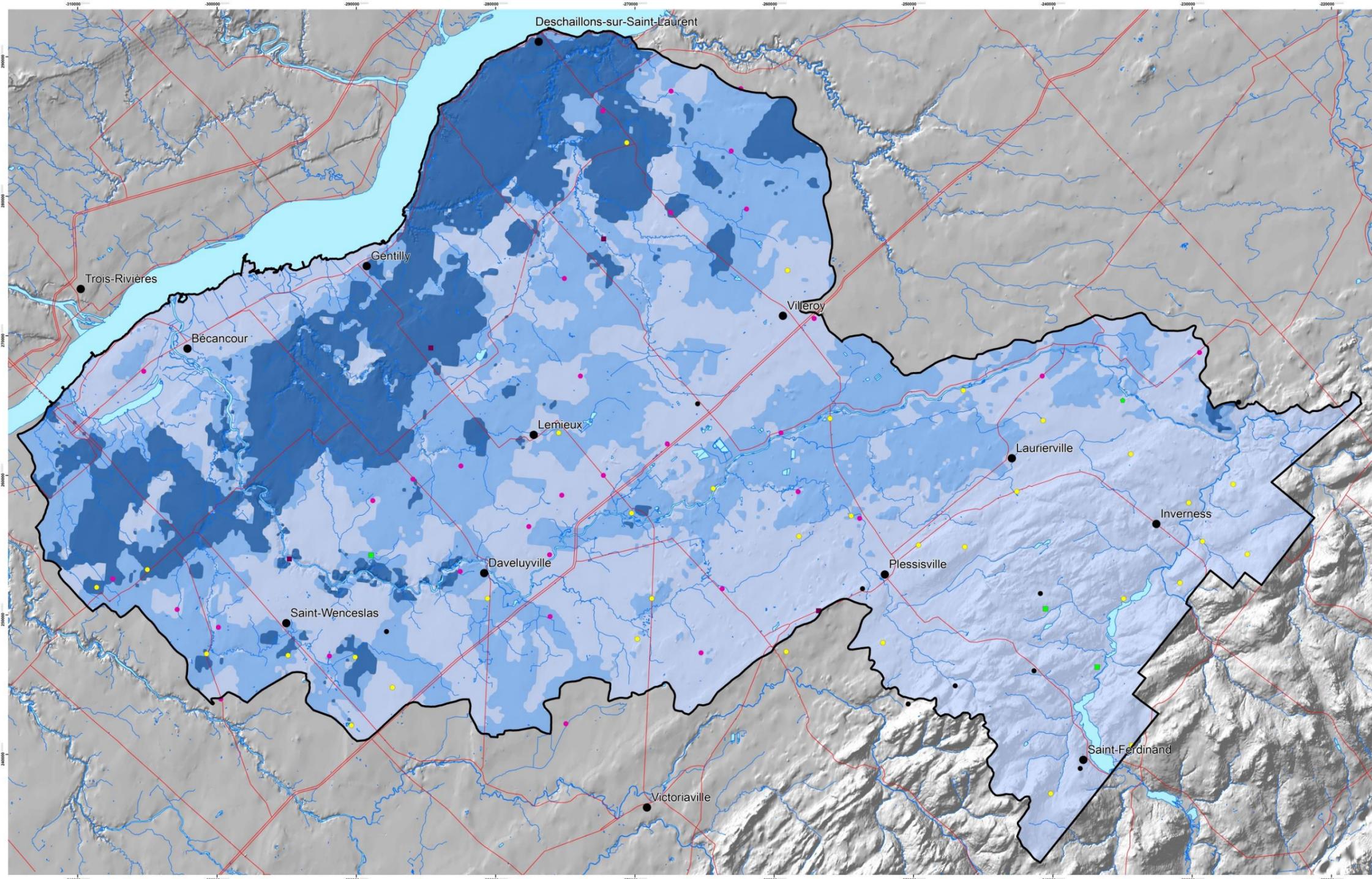


Figure 46 Relation Na^+/Cl^- dans les eaux souterraines au roc

La **figure 47** montre la répartition des groupes d'eau sur le bassin. La région amont du bassin présente exclusivement des eaux du groupe G1 qui est associé à des eaux de recharge marquant la présence d'un aquifère en conditions libres. Le groupe G1B (Ca-HCO_3) est majoritaire dans les Appalaches, mais on observe dans la partie sud une prédominance locale d'eau du groupe G1A (Ca-Mg-HCO_3) marqué par la dissolution de matériaux dolomitiques. Deux échantillons appartiennent aux groupes G1C (Ca-SO_4) et G1D (Ca-SO_4) éventuellement marqués par la présence locale de gypse. La partie centrale du bassin est dominée par la présence d'eaux du groupe G2 (Na-HCO_3) représentant des eaux ayant subi une évolution d'échange cationique. La présence conjointe d'eaux du groupe G1B (Ca-HCO_3) à l'est de la partie médiane ainsi qu'au sud-sud-ouest y est observée, indiquant ainsi qu'on peut trouver çà et là des zones de recharge selon des conditions présumées semi-captives. Enfin des eaux saumâtres du groupe G3 (Na-Cl) sont présentes dans la portion aval du bassin. Elles peuvent être associées à des conditions captives et à une influence saline.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Indice de confinement

- Nappe libre
- Nappe semi-captive
- Nappe captive

Type d'eau

- G1A
- G1B
- G1C
- G1D
- G2
- G3

Figure 47 Types d'eau pour l'aquifère au roc

ZONE BÉCANCOUR

QUÉBEC

MÉTADONNÉES

Protocole 3.17
Section 5.6 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Échelle 1/100 000

Projetion cartographique conforme de Lambert de Québec
NAD83
Système de référence géodésique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'affiliés ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'actualité, ou quant à l'application à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin
versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour -
Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

5.6.1 Isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O)

L'échantillonnage mensuel des précipitations a été réalisé sur une année complète, entre septembre 2010 et septembre 2011 pour les stations de Saint-Ferdinand et Lemieux. Les résultats des échantillonnages mensuels réalisés à ces deux stations sont présentés à la **figure 48**. Des problèmes d'échantillonnage ont fait en sorte que certains échantillons (janvier, août et octobre 2010) ne sont pas présents sur la série de points de la station Saint-Ferdinand. Les résultats montrent que les précipitations les plus appauvries ont lieu en hiver et les plus enrichies en été. Il n'y a pas de différence notable entre les deux séries de données de précipitations.

Les compositions isotopiques obtenues pour l'eau souterraine s'alignent sur une droite parallèle à celle des eaux météoriques. Ceci indique que l'évaporation de l'eau des précipitations préalablement à son infiltration dans les sols est négligeable. La composition isotopique de l'eau souterraine est appauvrie par rapport à la moyenne des précipitations pondérée sur le total mensuel. L'eau souterraine est donc principalement influencée par les périodes de fonte printanières et les pluies automnales qui génèrent des eaux d'infiltration plus appauvries que les précipitations liquides de la période estivale. Une légère différence peut-être observée entre les échantillons prélevés dans l'aquifère au roc fracturé et ceux des aquifères granulaires superficiels qui sont légèrement plus appauvris. L'eau souterraine présente dans les dépôts granulaires semble plus influencée par la recharge printanière.

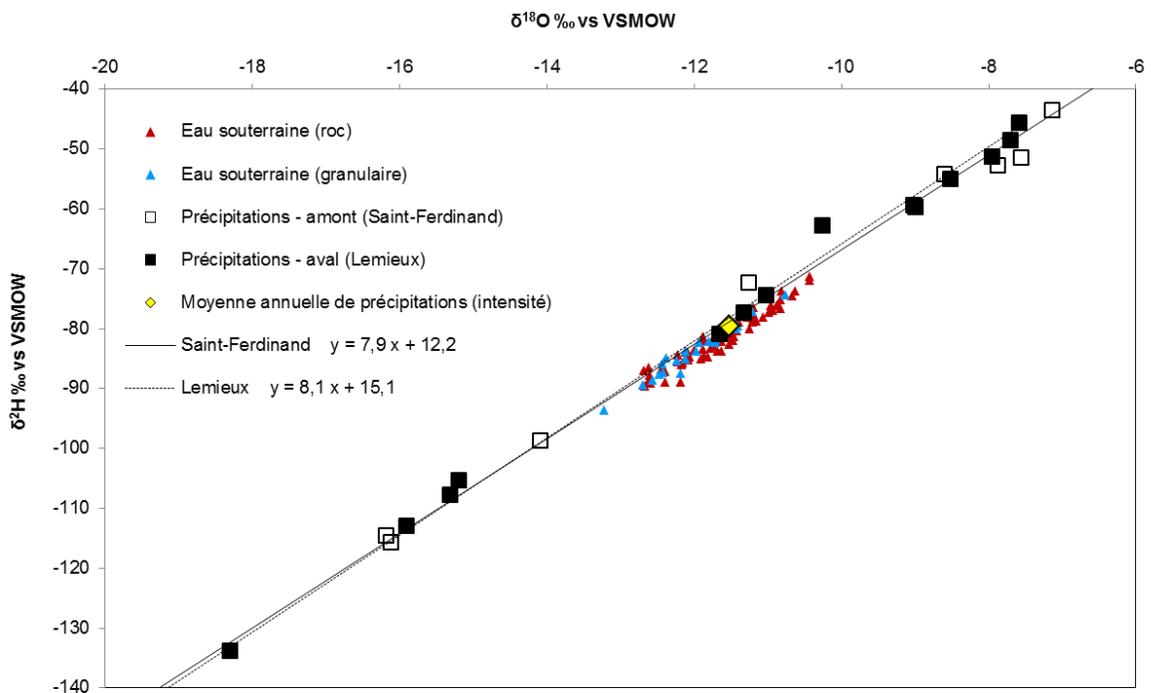


Figure 48 Composition isotopique de l'eau dans la zone d'étude

5.6.2 Isotopes stables des nitrates (^{18}O et ^{15}N)

La composition en isotopes stables des nitrates dans les eaux souterraines permet d'identifier la source de l'azote (fertilisant chimique, amendement organique ou système septique), et de mettre en évidence la présence de dénitrification (Verstraeten et al., 2005). La dénitrification biologique induit une série de fractionnements menant à l'enrichissement des nitrates résiduels en ^{15}N . Des travaux ont montré que les nitrates formés par voie biologique associent un atome d'oxygène en provenance de l'air et les deux autres à partir de l'eau (Hollocher, 1984). La composition isotopique de l'oxygène dans l'ion nitrate peut être appauvrie lorsque celui-ci s'est formé au contact avec de l'eau souterraine ayant une composition appauvrie en ^{18}O . Les nitrates formés par voie de synthèse ont quant à eux trois atomes d'oxygène provenant de l'air, donc ayant une composition isotopique similaire à celle de l'air. Cette différence peut amener un contraste marqué entre les nitrates formés chimiquement et ceux obtenus par voie biologique. Cependant, dans un fertilisant chimique sous forme de nitrate d'ammonium ($\text{NO}_3\text{-NH}_4$), l'ion ammonium (NH_4^+) peut subir de la nitrification dans l'eau souterraine, ce qui peut contribuer à un appauvrissement relatif en ^{18}O des nitrates formés.

La **figure 49** présente la composition isotopique des nitrates détectés pour des concentrations supérieures à 2 mg N- NO_3 /L, ainsi que les gammes typiques des compositions isotopiques concernant différentes sources de nitrates (Clark et Fritz, 1997). Le $\delta^{18}\text{O}$ des nitrates varie en fonction de la composition isotopique de l'eau souterraine, laquelle est dans le cas présent toujours inférieure à -10‰. La composition isotopique des nitrates typiquement définie par Clark et Fritz (1997) pour les fertilisants de synthèse pourraient ainsi avoir des compositions isotopiques en ^{18}O plus basses lorsque des nitrates sont formés dans l'eau souterraine (zone en pointillés à la **figure 49**). Dans ces conditions, les nitrates détectés sur la zone d'étude proviendraient plutôt de fertilisants chimiques ayant au départ une composition en ^{18}O appauvrie. L'enrichissement simultané en ^{18}O et en ^{15}N des nitrates selon la courbe de tendance obtenue sur la **figure 49** semble indiquer la présence de dénitrification dans l'eau souterraine pour les échantillons présentés ici pour les aquifères granulaires et ceux dans le roc. Les isotopes stables de nitrates indiquent également des sources azotées d'origine anthropique (fertilisants chimiques et organiques).

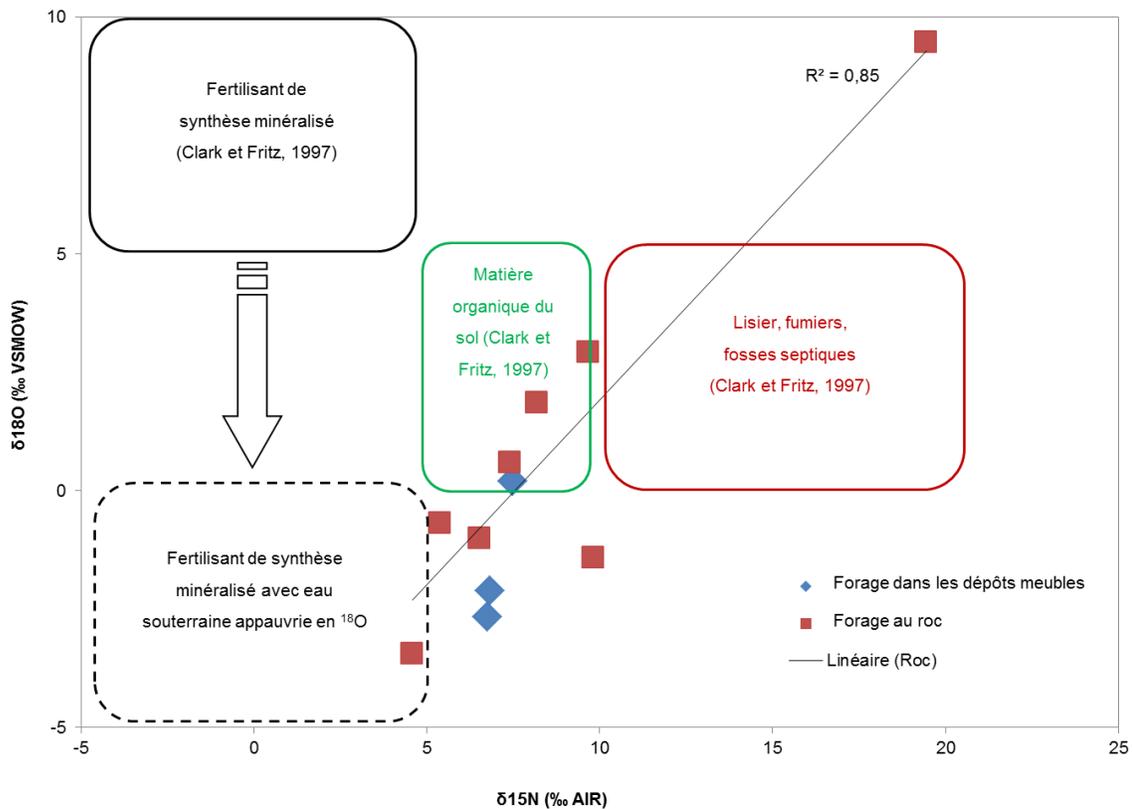


Figure 49 Isotopes des nitrates sur la zone d'étude

5.6.3 ²²²Radon

L'activité du ²²²Rn dans l'eau souterraine et l'eau de surface de la zone d'étude est présentée à la **figure 50** (voir aussi Ferlatte, 2011; **Annexe 16**). L'activité en ²²²Rn dans l'aquifère fracturé varie sur près de deux ordres de grandeur. Mis à part le forage F1 qui est localisé dans les schistes (Groupe de Stanbridge) de la partie amont qui sont une source de radon plus importante que les shales (Gundersen et al. 1991), les forages ayant les activités les plus importantes (F3 et F7) captent l'aquifère rocheux de la zone aval dans des conditions de nappe captive, ce qui limite le dégazage du ²²²Rn et sa dilution par les eaux de recharge.

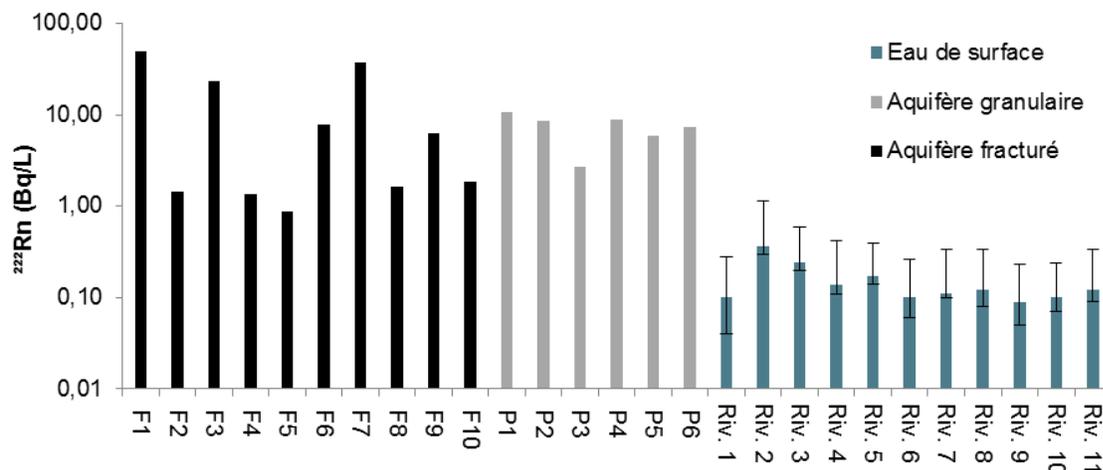


Figure 50 Activités du ^{222}Rn pour l'aquifère fracturé, les aquifères granulaires et la rivière Bécancour en période d'été (les barres d'erreur sur les activités des eaux de surface indiquent les valeurs minimales et maximales mesurées dans les eaux de surface)

Les différents aquifères granulaires échantillonnés à partir des piézomètres P1 à P6 ont une activité en ^{222}Rn relativement semblable. La composition minéralogique (sédiments sableux composés de minéraux du Bouclier canadien ou des Appalaches), ainsi que le régime hydrogéologique de nappe libre superficielle caractérisée par une recharge élevée, expliquent cette similitude entre les six piézomètres. Les activités radon mesurées dans les rivières sont environ un ordre de grandeur plus faibles que celles dans les dépôts meubles et le roc. Les activités les plus élevées ont été mesurées en période de basses eaux (juillet et août) à toutes les stations. Ceci indique une plus faible dilution des apports d'eau souterraine par les eaux de ruissellement en période d'été.

Les activités du ^{222}Rn dans l'eau souterraine et de l'eau de la rivière Bécancour ont permis de réaliser une modélisation de la contribution de l'eau souterraine à la rivière et d'identifier des zones potentielles de résurgence de l'eau souterraine. Le modèle utilisé est celui développé par Cook et al. (2006). Quatre zones de résurgence importante ont ainsi été localisées. Le modèle montre que les flux en eau souterraine les plus importants se situent en amont de la rivière Bécancour (secteur du lac Joseph), atteignant $15 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ dès le début profil. La deuxième zone de résurgence est de $4,5 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ entre 30 et 35 km (secteur de Lyster), la troisième est plus diffuse avec un apport d'eau souterraine de $3,2 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ entre 70 et 90 km (secteur de Saint-Louis-de-Blandford). La quatrième zone est également relativement diffuse, avec $4,4 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ entre 104 et 116 km (secteur de Saint-Wenceslas et Saint-Sylvere). Les détails de la modélisation sont disponibles à l'**Annexe 16**.

5.6.4 Contextes hydrogéologiques régionaux

L'intégration des données stratigraphiques, géochimiques et hydrogéologiques sous forme de coupe conceptuelle permet de mettre en lumière les caractéristiques hydrogéologiques du territoire à l'étude. La **figure 51** reprend la coupe A (**Figure 25**) pour illustrer le modèle conceptuel de l'hydrogéologie de la zone Bécancour. Les flèches verticales bleues pointant vers le bas symbolisent la recharge selon trois classes (recharge faible, moyenne et élevée). Les flèches noires à trait continu symbolisent les directions de l'écoulement souterrain déduites de l'information hydrogéologique et géochimique. Les flèches noires à trait discontinu symbolisent l'écoulement souterrain supposé, mais que les données disponibles n'ont pas permis de confirmer. Les puits illustrés sur la **figure 51** servent simplement à indiquer l'échelle de productivité des différentes unités hydrogéologiques (productivité faible, moyenne et élevée) et ne représentent pas des puits réels. Finalement, les flèches bleues pointant vers le haut indiquent les principales zones de résurgence. À l'échelle régionale, trois zones aux caractéristiques hydrogéologiques distinctes ont été identifiées, les zones amont, centrale et aval.

Zone amont

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

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

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

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

qualité. Les types d'eau Ca-HCO_3 et Mg-HCO_3 sont généralement associés à de l'eau de recharge, i.e. à une eau de pluie qui a faiblement dissous les minéraux carbonatés présents dans le sol et dont le taux de renouvellement est trop court pour que l'eau puisse se minéraliser de manière importante au sein de l'aquifère. L'aquifère fracturé de la zone amont est de vulnérabilité moyenne à élevée.

Zone centrale

La partie centrale du territoire à l'étude est caractérisée par une couverture quasi-continue de till compact d'une épaisseur de 0 à 5 m qui crée localement des conditions de nappe semi-captive, notamment près de la rivière Bécancour, entre les rivières Bourbon et Noire, de même qu'en amont des rivières Gentilly et Petite du Chêne. La majorité des tourbières se retrouve dans ces secteurs, signe de la présence de dépôts meubles peu perméables sous-jacents aux dépôts organiques. Les conditions de nappe libre sont rencontrées de part et d'autre de l'autoroute 20 et dans la zone située au nord-ouest de Princeville et de Plessisville. Les secteurs de nappe libre dans la zone centrale sont généralement recouverts d'une unité de sable et ont une pente faible. Cette unité sableuse est aussi présente dans les secteurs semi-captifs. Des aquifères superficiels sont parfois présents dans ces dépôts sableux, mais ceux-ci sont cependant discontinus dans l'espace et dépassent rarement 10 m d'épaisseur.

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

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

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

Zone aval

La partie aval de la zone d'étude est caractérisée par une couverture importante de dépôts meubles imperméables qui créent des conditions de nappe captive. Des unités perméables sableuses d'épaisseur supérieure à 10 m y sont retrouvées. La recharge de l'aquifère fracturé est donc quasiment nulle. Le niveau piézométrique y est généralement beaucoup plus élevé que le toit du roc. Par exemple, au forage F3, le roc est rencontré à une profondeur de 43 m, et le niveau piézométrique n'est qu'à 3 m de la surface. La même observation peut être faite pour le forage F7 où le roc se trouve à 15 m de profondeur et le niveau piézométrique est au niveau du sol. L'aquifère du roc est donc en conditions de nappe captive.

Les roches de la partie centrale sont relativement peu fracturées et peu productives. La conductivité hydraulique y est faible. Cependant, des conductivités hydrauliques supérieures à la moyenne ont été mesurées dans la partie nord-est près de Fortierville, probablement en raison d'une fracturation plus importante localement. La conductivité hydraulique des unités sableuses de surface est élevée.

L'eau s'infiltré donc dans les zones de recharge à nappe libre et semi-captive (dans une moindre mesure), situées dans le secteur de l'autoroute 20, pour ensuite circuler dans l'aquifère fracturé sous le couvert de dépôts imperméables. Les directions d'écoulement de l'eau souterraine y sont généralement horizontales. Cependant, si la couverture de dépôts imperméables s'amincit ou devient inexistante, comme c'est le cas dans le lit des rivières Bécancour et Gentilly, il y a présence d'un écoulement vertical et résurgence d'eau souterraine dans les rivières. La zone aval héberge également l'aquifère granulaire des sables des Vieilles Forges. Celui-ci couvre une grande partie de la zone aval et l'eau souterraine y circule en conditions semi-captives et libres. Il est supposé que cette unité est en contact dans sa portion amont avec l'aquifère du roc fracturé. Sa limite nord-ouest est constituée par une crête topographique importante où le relief diminue rapidement et où se trouve l'approvisionnement municipal des sources de Gentilly. Les zones de recharge de cet aquifère ainsi que ses limites latérales sont cependant encore mal connues.

Peu d'information géochimique a pu être obtenue dans la zone aval en raison de la quasi-absence de puits de particuliers dans cette région. En effet, la partie aval est alimentée depuis longtemps par des réseaux d'aqueduc qui puisent leur eau dans le réseau hydrographique de surface ou dans les aquifères granulaires. La zone aval est caractérisée par des types d'eau Na-Cl et Na-HCO₃. Ces eaux parfois saumâtres indiquent un très faible taux de renouvellement, des temps de résidence longs et un aquifère fracturé peu dynamique en profondeur. L'eau des zones de recharges n'atteint la zone aval qu'en très faible quantité, ce qui limite l'écoulement des eaux saumâtres minéralisées vers le fleuve. La vulnérabilité de l'aquifère fracturé de cette partie du territoire à l'étude est généralement faible en raison de l'importante couverture de dépôts imperméables combinée à de faibles taux de recharge.

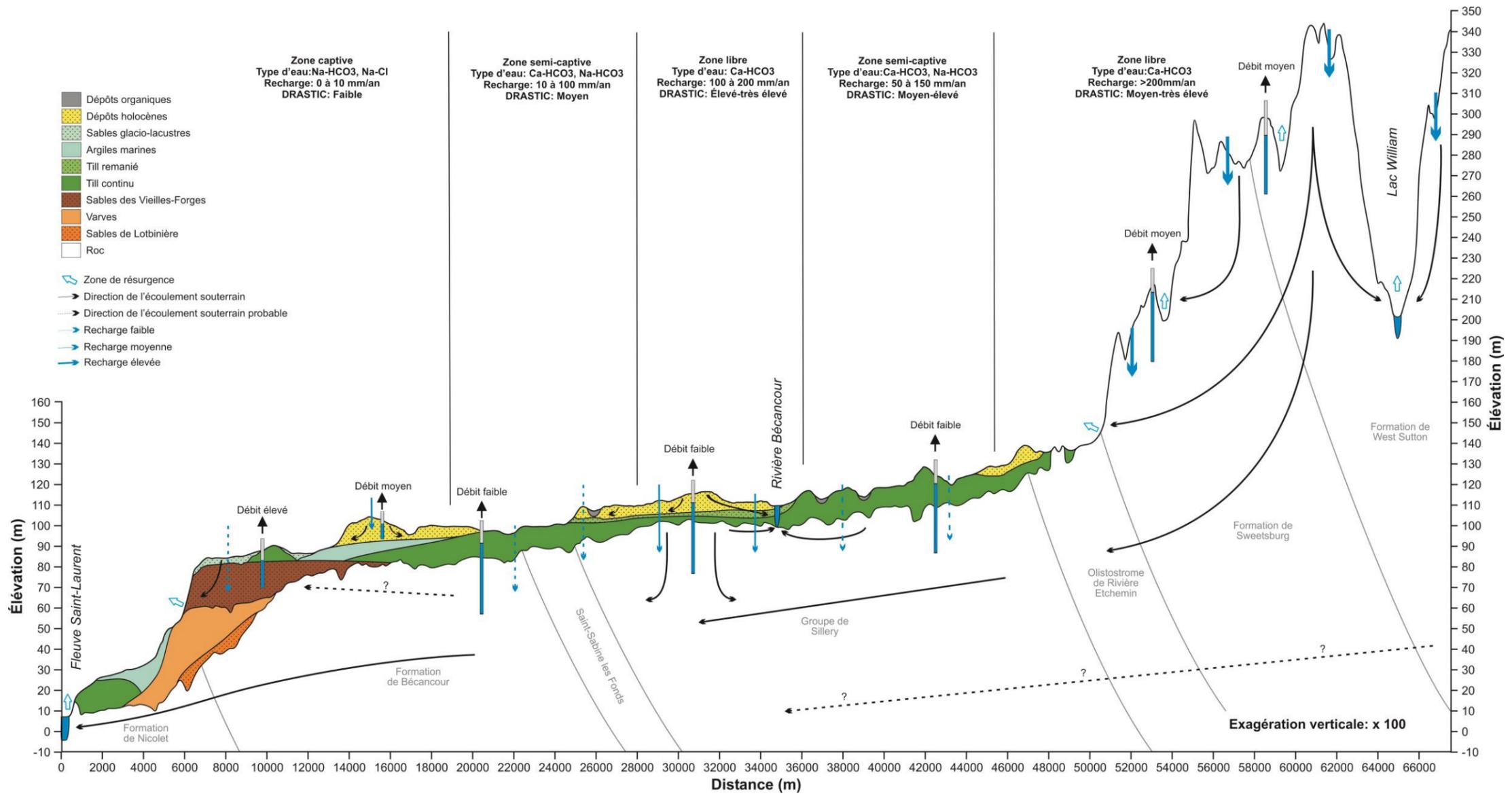


Figure 51 Schémas des contextes hydrogéologiques

6 MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

6.1 Objectifs de la modélisation hydrogéologique

La modélisation des écoulements souterrains avait pour objectif de vérifier différentes hypothèses posées au cours de ce projet et de confronter le modèle hydrostratigraphique 3D, les propriétés hydrauliques, la recharge et les charges mesurés à l'intégration dans un environnement numérique. Le modèle a été construit à l'aide du modèle en différences finies MODFLOW2005 (Harbaugh, 2005) dans l'environnement GMS9.0. Ce modèle intègre une représentation 3D de l'aquifère, basée sur le modèle hydrostratigraphique présenté à la **section 4.2.2**, et simule les écoulements souterrains en régime permanent. Les résultats de la modélisation des écoulements souterrains seront présentés au colloque annuel de la section canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues qui se tiendra à Montréal en septembre 2013 (Gagné et Larocque, 2013).

6.2 Structure du modèle hydrogéologique

La zone simulée couvre toute la zone Bécancour, soit une superficie de 3845 km² (**Figure 52**). Le modèle s'étend ainsi à l'extérieur du secteur étudié dans le projet PACES-Bécancour et atteint la limite amont de la Zone de gestion intégrée de l'eau Bécancour. Il est limité latéralement et au sud par les crêtes topographiques de la zone Bécancour, et à l'aval par le fleuve Saint-Laurent.

Les cellules sont de forme carrée et ont une superficie constante de 250 m x 250 m. Le modèle est composé de 25 couches avec une base plane d'élévation -300 m. Les 13 premières couches sont parallèles et ont une épaisseur de 2,5 m. L'épaisseur des couches suivantes augmente d'un facteur de 1,5 jusqu'à la 24^e couche. La dernière couche a une épaisseur maximale de 600 m et une épaisseur minimale de 70 m afin d'assurer une base plane au modèle. L'épaisseur maximale du modèle est de 880 m dans la partie appalachienne et de 307 m au niveau du fleuve Saint-Laurent. Toutes les couches sont définies de type captif afin de faciliter la convergence du modèle. La géologie des dépôts quaternaires a été incluse dans le modèle à partir des solides préalablement générés dans GMS lors de la construction du modèle hydrostratigraphique. La géologie du roc a été discrétisée en cinq zones distinctes. Premièrement, les dix premiers mètres du modèle ont été associés au roc fracturé. Ensuite deux zones distinctes ont été établies selon la partie des formations géologiques des Basses-Terres du Saint-Laurent et la partie des Appalaches. Au sein de ces zones, une discrétisation verticale a été faite selon deux zones; le roc profond (deux dernières couches) et le roc peu profond. Le modèle comporte un total de 1 549 250 cellules.

Les limites latérales et sud (partie amont du modèle) sont des conditions à flux nul. À l'aval, le fleuve Saint-Laurent est une limite à charge imposée à 7 m. Les principales

rivières sont représentées à l'aide du module River de MODLOW (écoulement possible de l'aquifère vers les rivières et des rivières vers l'aquifère). Le module a été associé à la première couche du modèle, i.e. les deux premiers mètres et demi. Les charges des rivières ont été définies égales à la topographie pour tout le modèle. Le lit de la rivière a été posé égal à l'élévation de la base de la première couche. Les valeurs de conductance utilisées pour la calibration varient de 0 à 1×10^{-2} m²/s. Les petits cours d'eau sont représentés à l'aide du module Drain (écoulement possible seulement de l'aquifère vers le cours d'eau). Ces petits cours d'eau ont été ajoutés au modèle dans la zone amont où le relief est très accidenté. Ils sont principalement situés dans le fond des vallées. La base des drains a été posée égale à l'élévation de la base de la première couche. Les conductances varient de 0 à 1×10^{-2} m²/s.

Les tourbières sont représentées comme des charges constantes d'élévation 1 m sous la surface, sur la première couche uniquement. Cette charge constante a été imposée aux polygones des tourbières identifiées comme intactes à la **section 2.2.5**. Une charge constante a été utilisée pour simuler le lac Saint-Paul dans la partie aval du modèle. Les autres types de milieux humides ne sont pas représentés.

Les résultats des essais hydrauliques présentés à la **section 5.1.2** indiquent que la gamme des conductivités hydrauliques pour le roc fracturé varie de $3,7 \times 10^{-9}$ et $1,4 \times 10^{-4}$ m/s. Pour les dépôts granulaires, les conductivités mesurées varient de $1,2 \times 10^{-6}$ m/s à $1,7 \times 10^{-3}$ m/s. Des conductivités hydrauliques inférieures à $1,0 \times 10^{-9}$ m/s ont été utilisées pour les unités imperméables (argile et till compact) dans le processus de calibration.

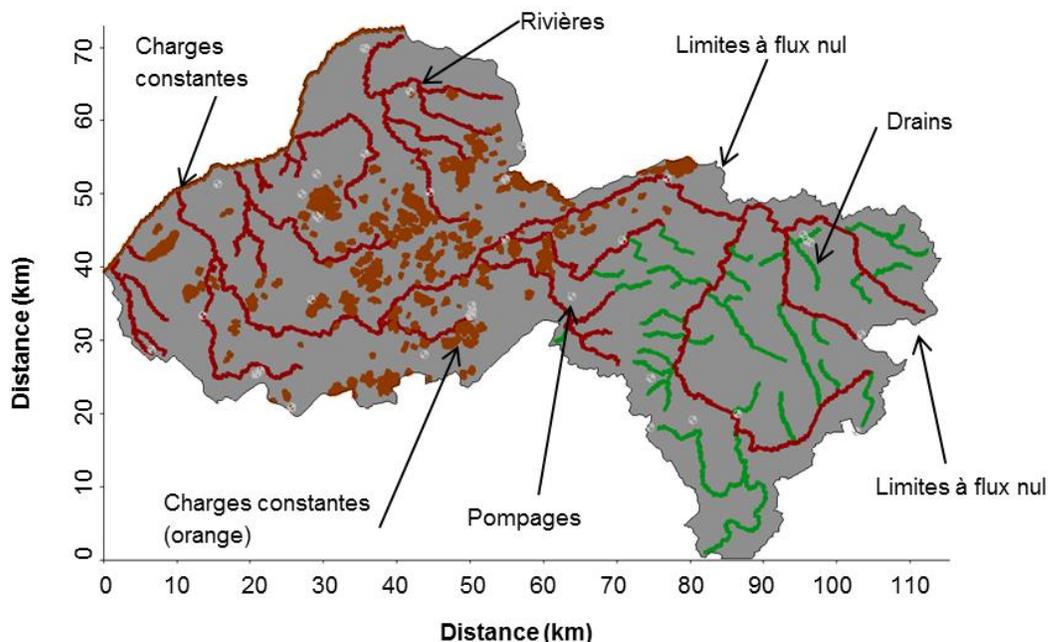


Figure 52 Conditions utilisées dans le modèle hydrogéologique

La recharge potentielle spatialisée, dont les détails sont donnés à la **section 5.3.3**, a été intégrée directement dans le module Recharge de MODFLOW. Cette recharge correspond à 244 mm/an, soit plus que la recharge de 159 mm/an à l'aquifère rocheux. Ceci s'explique par le fait que le modèle utilise la recharge potentielle arrivant à la surface, i.e. sur des dépôts perméables ou imperméables. Le modèle 3D permet ensuite de répartir cette recharge vers les couches l'aquifère plus profond ou vers les cours d'eau. Les débits pompés dans l'aquifère rocheux et dans les dépôts meubles par les grands préleveurs (ces données fournies par le MDDEFP sont décrites à la **section 7.1**) ont été utilisés pour simuler les pompages sur la zone d'étude. Le débit total pompé par les grands préleveurs correspond à 0,04 m³/s, soit l'équivalent de 0,3 mm/an.

6.3 Calage du modèle

Le modèle a été calé manuellement par essai-erreur avec pour objectif de minimiser la différence entre les charges mesurées et simulées. Au total, 127 charges ont été utilisées pour le calage, soit l'ensemble des charges mesurées dans le PACES-Bécancour. Des charges hydrauliques provenant du SIH ont été utilisées pour couvrir la zone amont du bassin versant située à l'extérieur de la zone d'étude qui n'a pas été couverte par la campagne de levé piézométrique de l'été 2010.

Les débits de base disponibles (stations hydrométriques : 024003, 024007, 023902, 024012 et 023701) ont également été utilisés pour raffiner le calage du modèle. Les débits de base fournis par le CEHQ (Poirier, 2012) ainsi que les débits de base mesurés en période d'étiage (rivières Blanche, Noire, Bourbon, aux Glaises et aux Orignaux) ont été utilisés dans le calage. Les conductivités hydrauliques calées (**Tableau 24**) sont incluses dans les intervalles des valeurs mesurées sur le terrain pour les différentes formations géologiques représentées dans le modèle. Cependant, des valeurs élevées de conductivité hydraulique ont été utilisées pour les 10 premiers mètres du roc fracturé. Même si ceci n'a pas été observé explicitement lors des essais hydrauliques réalisés au cours du projet, les conductivités hydrauliques utilisées dans le modèle diminuent avec la profondeur de manière exponentielle. Les conductivités hydrauliques varient spatialement selon les types de dépôts meubles et selon les cinq zones décrites plus haut pour le roc. Aucune anisotropie horizontale n'a été intégrée dans modèle. Une anisotropie verticale de 1 à 4 a été utilisée pour les dépôts meubles et de 2 à 1000 pour le roc. Dans le processus de calage, la recharge potentielle a été modifiée dans un intervalle correspondant à 80% à 100% de la valeur calculée avec le bilan hydrique spatialisé. Les variations spatiales de la recharge potentielle n'ont pas été modifiées.

Tableau 24 Conductivités hydrauliques calées

| Unité hydrogéologique | Kh (m/s) | Kv (m/s) |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Sables récents | $1,27 \times 10^{-3}$ | $1,27 \times 10^{-3}$ |
| Sables marins | $1,27 \times 10^{-3}$ | $1,27 \times 10^{-3}$ |
| Argiles marines | $3,17 \times 10^{-8}$ | $3,17 \times 10^{-8}$ |
| Till remanié | $9,51 \times 10^{-4}$ | $9,51 \times 10^{-4}$ |
| Till compact | $1,59 \times 10^{-5}$ | $1,59 \times 10^{-5}$ |
| Sables des Vieilles Forges | $6,34 \times 10^{-4}$ | $3,17 \times 10^{-4}$ |
| Sédiments Saint-Pierre, Till, varves | $3,17 \times 10^{-8}$ | $3,17 \times 10^{-8}$ |
| Sables de Lotbinière | $6,34 \times 10^{-4}$ | $1,59 \times 10^{-4}$ |
| Varves, Till de Bécancour | $3,17 \times 10^{-8}$ | $3,17 \times 10^{-8}$ |
| Roc fracturé | $1,59 \times 10^{-5}$ | $9,51 \times 10^{-6}$ |
| Roc peu profond partie aval | $9,51 \times 10^{-7}$ | $3,17 \times 10^{-8}$ |
| Roc zone profonde partie aval | $1,59 \times 10^{-7}$ | $1,59 \times 10^{-10}$ |
| Roc peu profond partie amont | $1,50 \times 10^{-6}$ | $3,17 \times 10^{-7}$ |
| Roc zone profonde amont | $1,59 \times 10^{-7}$ | $1,59 \times 10^{-10}$ |

6.4 Résultats de la simulation de l'écoulement souterrain

La **figure 53** illustre le digramme de dispersion des charges mesurées et simulées sur la zone Bécancour. Les points suivent de près la droite 1:1, indiquant qu'il n'y a pas d'erreur systématique dans un secteur ou l'autre de la zone d'étude. L'erreur moyenne (-4,9 m), l'erreur moyenne absolue (9,9 m) et la RMSE (13,8 m) sont relativement faibles compte tenu de la gamme des charges hydrauliques mesurées (de 9 à 500 m en élévation). Néanmoins, le modèle surestime légèrement les charges hydrauliques dans la partie basse de la zone modélisée, là où la majorité des charges ont été mesurées. Dans la partie amont du modèle, les fortes variations du relief expliquent en partie l'erreur plus importante dans ce secteur. De plus, les données du SIH utilisées dans cette zone comportent une plus grande marge d'erreur.

Le **tableau 26** présente les débits de base simulés par le modèle, en comparaison avec les débits de base mesurés ou dérivés des hydrogrammes de crue. Les débits de base simulés illustrés dans ce tableau correspondent à la somme de tous les débits drainés par les rivières en amont des stations de mesure (i.e. total des flux provenant du module River et du module Drain de MODFLOW). L'erreur sur les débits de base simulés est inférieure à 50% pour toutes les stations de mesure à l'exception du site de la section centrale de la rivière Bécancour (donnée CEHQ, station no 024007) et pour celle de la rivière Bourbon (mesure manuelle en étiage). Il est à noter que l'incertitude sur les débits de base est très grande. La recharge calée correspond à 90% de la recharge calculée avec le bilan hydrique spatialisé (220 mm/an).

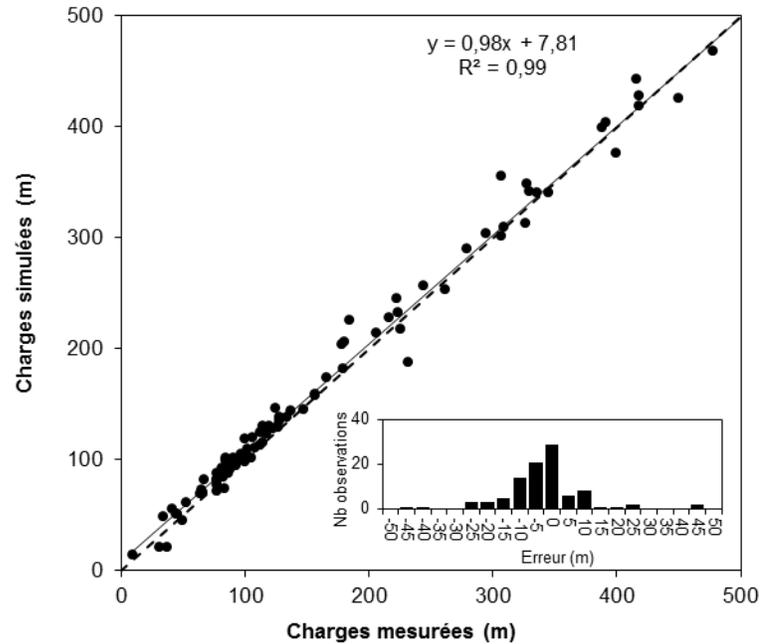


Figure 53 Charges mesurées et simulées sur la zone d'étude et distribution des erreurs

Tableau 25 Débits de base disponibles et simulés sur la zone d'étude

| Site | Type de donnée | Débit de base disponible (m ³ /s) | Débit de base simulé (m ³ /s) |
|------------------------|---------------------------|--|--|
| 024003 | CEHQ | 6,57 | 6,20 |
| 024007* | CEHQ | 14,12 | 1,79 |
| 024902 | CEHQ | 1,81 | 1,43 |
| 024012 | CEHQ | 1,59 | 3,40 |
| 023701 | CEHQ | 2,23 | 3,07 |
| Rivière Blanche - aval | Mesure manuelle en étiage | 0,63 | 0,94 |
| Rivière Noire | Mesure manuelle en étiage | 0,35 | 0,67 |
| Rivière Bourbon | Mesure manuelle en étiage | 0,48 | 0,79 |
| Rivière aux Glaises | Mesure manuelle en étiage | 0,11 | 0,21 |
| Rivière aux Orignaux | Mesure manuelle en étiage | 0,63 | 0,87 |

*Ce débit de base correspond à celui du tronçon de rivière compris entre la station 024003 (Bécancour amont) et la station 024007 (Bécancour centre).

Le modèle d'écoulements souterrains permet de calculer un bilan hydrique de l'ensemble de la zone modélisée (Tableau 26). Ce bilan hydrique présente la recharge (220 mm/an) ainsi que les pompages des grands préleveurs (0,3 mm/an). Comme pour les observations terrain, le modèle calé représente un système hydrogéologique très dynamique dans la partie superficielle de l'aquifère fracturé, avec un débit de base total (somme des conditions limites Rivers et Drains) légèrement inférieur à la recharge.

Les tourbières incluses dans le modèle reçoivent un débit équivalent à $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui de la recharge calée (moins de 1%). Cette valeur est du même ordre de grandeur que les valeurs suggérées par Avard (2013) grâce à un calcul basé sur l'équation de Darcy. Toutefois, Avard (2013) identifie des zones où les flux sont de l'aquifère vers la tourbière et d'autres où ce sont les tourbières qui alimentent la nappe. Il est probable que le modèle numérique de terrain utilisé dans le modèle d'écoulement souterrain ne soit pas suffisamment précis pour simuler de manière réaliste la topographie entourant les tourbières et donc les flux échangés. Il est probable (mais non démontré dans ce projet) que les tourbières permettent à l'aquifère superficiel situé dans les dépôts meubles de conserver un niveau relativement constant dans le temps. Même si les volumes sont relativement faibles à l'échelle régionale, ils sont significatifs dans la zone où se concentrent les tourbières et jouent un rôle primordial dans leur environnement immédiat.

Le modèle a également permis de quantifier les flux d'eau qui se déchargent dans le fleuve Saint-Laurent à $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$, soit environ $7 \text{ mm}/\text{an}$ ou 3% de la recharge annuelle. Cette valeur appuie les observations géochimiques et hydrogéologiques faites au cours du projet selon lesquelles une faible proportion de la recharge sur la zone d'étude atteint la nappe (voir **section 5.6**). Finalement, le modèle quantifie à $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit drainé par le lac Saint-Paul, soit l'équivalent de $2 \text{ mm}/\text{an}$.

Tableau 26 Bilan hydrique régional simulé

| Composante du bilan | Bilan (m^3/s) | Bilan (mm/an) |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Sortie au Fleuve | -0,87 | -7 |
| Tourbières | -0,16 | -1 |
| Drains (Q base) | -7,09 | -58 |
| Rivières (Q base) | -18,41 | -151 |
| Recharge | 26,82 | 220 |
| Pompages | -0,04 | -0,3 |
| Charges constantes (Lac St-Paul) | -0,26 | -2 |

Même s'il reflète relativement bien l'état actuel des connaissances sur la zone d'étude, le modèle développé est relativement simple. Des travaux complémentaires devront être réalisés avec le modèle afin de quantifier les temps de séjour de l'eau souterraine, de raffiner le calage des débits aquifère-tourbière et de simuler l'impact des changements climatiques ou d'une augmentation des débits pompés.

7 RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

7.1 Usage de la ressource

Les besoins en eau d'une population peuvent être comblés par différentes sources, selon la nature des usages, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. Au Québec, 20% de la population s'alimente à partir d'eau souterraine (MDDEFP, 2013b). Certains ont accès à un réseau alimenté par des forages municipaux, tandis qu'en milieu rural un nombre important de personnes dépendent de puits privés. Dans le cadre de ce projet, les données provenant d'organismes gouvernementaux (MDDEFP, MAMROT, Statistiques Canada) ont été compilées par municipalité. La méthode utilisée pour analyser les données peut être consultée à l'**Annexe 17**. Les villes où l'utilisation d'eau à des fins résidentielles est la plus importante sont également les plus peuplées: Bécancour (approvisionnement mixte à partir du fleuve Saint-Laurent et de la source de Gentilly), Plessisville (approvisionnement de surface à partir de la rivière Bécancour) et Princeville (approvisionnement souterrain à partir de puits tubulaires).

Les MRC de l'Érable et d'Arthabaska sont celles où la consommation d'eau est la plus importante, avec 43,3% et 42,7% de toute l'eau consommée sur la zone d'étude, respectivement (**Figure 54; Tableau 28**). La MRC de Bécancour consomme 12,4% de toute l'eau consommée sur la zone d'étude. En raison du petit nombre de personnes qui habitent les MRC de Lotbinière et de Nicolet-Yamaska sur la zone d'étude, la consommation de celles-ci est faible (Nicolet-Yamaska, 1,4% et Lotbinière 0,1% de toute l'eau consommée sur la zone d'étude).

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la consommation d'eau par type d'utilisation se répartie de la manière suivante : 87,7% pour l'utilisation agricole, 9,4% pour l'utilisation résidentielle, 2,9% pour les utilisations industrielle, commerciale et institutionnelle (ICI, incluant les pertes dans le réseau de distribution) (**Figure 55**). L'utilisation de l'eau pour des fins agricoles sur la zone d'étude est presque exclusivement dédiée à la culture de la canneberge (95,2%) et à l'élevage (4,7%). L'utilisation de l'eau pour la culture de la canneberge provient de systèmes de bassins qui captent l'eau de ruissellement par un réseau de canaux généralement situé près des milieux humides. Les municipalités où la consommation d'eau pour une utilisation agricole est la plus importante sont Saint-Louis-de-Blandford (17 945 708 m³), Notre-Dame-de-Lourdes (7 864 419 m³), Villeroy (3 622 225 m³) et Laurierville (3 401 059 m³). Dans ces quatre municipalités, une proportion significative des volumes d'eau utilisés à des fins agricoles sont alloués à la culture de la canneberge et proviennent des eaux de surface.

Les volumes d'eau souterraine puisés à des fins agricoles sont souvent alloués à l'élevage. Les plus importants volumes d'eau souterraine utilisés à cette fin sont pompés dans les municipalités de Bécancour (253 319 m³), Lyster (175 621 m³) et Princeville (155 790 m³). L'eau utilisée pour l'élevage provient de puits privés, mais aussi de réseaux

publics quand la ferme se trouve dans une municipalité munie d'un réseau d'aqueduc étendu.

Les volumes d'eau les plus importants prélevés pour des usages ICI sont dans les municipalités de Bécancour (414 612 m³), Plessisville (218 560 m³) et Princeville (138 752 m³) où les usages industriels sont principalement retrouvés.

Sur la zone d'étude, 11,2% de l'eau consommée est de l'eau souterraine (**Figure 56** et **Tableau 28**). Ce pourcentage correspond à un prélèvement de 1,8 mm/an, tandis que la consommation totale d'eau sur la zone d'étude correspond à 16,5 mm/an. Le pourcentage d'utilisation de l'eau souterraine est inférieur au 20% proposé pour l'ensemble de la province par le MDDEFP (2013b). Ceci traduit probablement le fait que l'aquifère de roc fracturé est généralement peu productif et que les aquifères de dépôts granulaires sont limités. Le pourcentage d'alimentation à partir d'eau souterraine est toutefois très variable sur la zone d'étude : 2,6% dans la MRC d'Arthabaska, 26% dans la MRC de Bécancour (même si plusieurs réseaux d'alimentation municipaux s'approvisionnent complètement ou partiellement dans la rivière Bécancour et le fleuve Saint-Laurent), 11,6% dans la MRC de l'Érable, 100% dans la MRC de Lotbinière (portion incluse dans la zone d'étude) et 99,6% dans la MRC de Nicolet-Yamaska (portion incluse dans la zone d'étude). Dans les MRC de Lotbinière et de Nicolet-Yamaska, la consommation est presque exclusivement souterraine en raison de l'éloignement des grands centres.

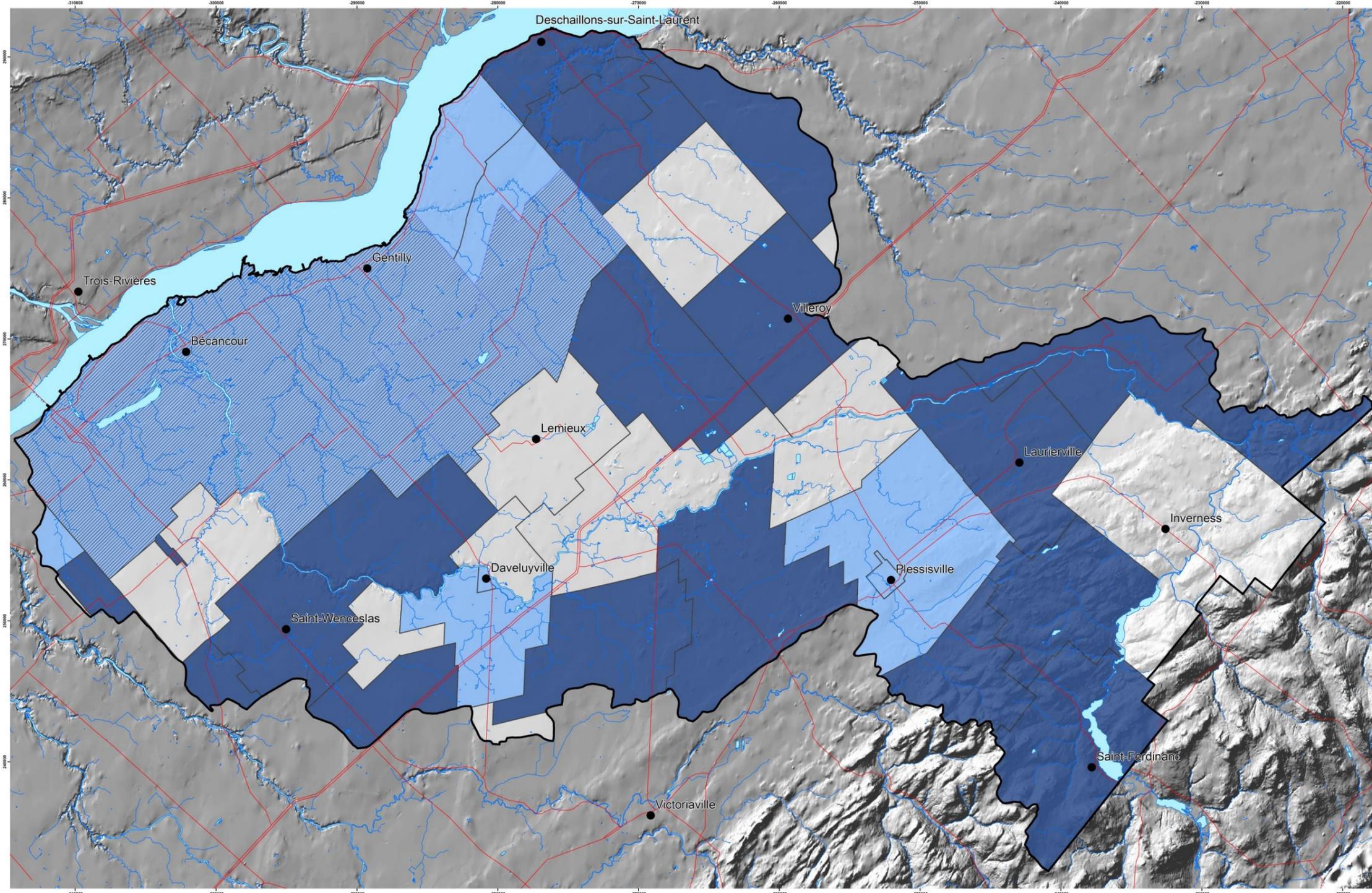
Tableau 27 Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine

| MRC | Municipalité | Utilisation de l'eau [milliers de m ³] | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--|-----------------|----------------|
| | | Totale | Eau souterraine | Eau de surface |
| Arthabaska | - | 20537,4 | 530,9 | 20006,5 |
| | Daveluyville | 114,0 | 0,0 | 114,0 |
| | Maddington | 63,4 | 63,4 | 0,0 |
| | Sainte-Anne-du-Sault | 244,8 | 165,5 | 79,3 |
| | Saint-Louis-de-Blandford | 18069,1 | 135,0 | 17934,1 |
| | Saint-Rosaire* | 2029,2 | 150,1 | 1879,1 |
| | Saint-Valère* | 16,9 | 16,9 | 0,0 |
| Bécancour (incluant Wôlinak) - | - | 6048,2 | 1737,9 | 4310,3 |
| | Bécancour | 1828,6 | 644,2 | 1184,4 |
| | Deschaillons-sur-Saint-Laurent | 141,8 | 141,8 | 0,0 |
| | Fortierville | 118,5 | 118,5 | 0,0 |
| | Lemieux | 919,5 | 66,8 | 852,7 |
| | Manseau | 996,3 | 142,4 | 853,9 |
| | Parisville | 88,7 | 88,7 | 0,0 |
| | Saint-Pierre-les-Becquets | 164,5 | 0,0 | 164,5 |

* Le tableau se poursuit à la page suivante

| MRC | Municipalité | Utilisation de l'eau [milliers de m ³] | | |
|------------------------|-------------------------------|--|-----------------|-----------------|
| | | Totale | Eau souterraine | Eau de surface |
| | Saint-Sylvère | 404,8 | 162,7 | 242,1 |
| | Sainte-Cécile-de-Lévrard | 75,5 | 0,0 | 75,5 |
| | Sainte-Françoise | 167,9 | 167,9 | 0,0 |
| | Sainte-Marie-de-Blandford | 970,8 | 57,2 | 913,6 |
| | Sainte-Sophie-de-Lévrard | 151,6 | 147,7 | 3,9 |
| | Wôlinak (hors MRC) | 19,7 | 0,0 | 19,7 |
| L'Érable | - | 20856,5 | 2421,7 | 18434,8 |
| | Inverness | 188,3 | 188,3 | 0,0 |
| | Laurierville* | 3551,5 | 284,1 | 3267,4 |
| | Lyster* | 251,5 | 251,5 | 0,0 |
| | Notre-Dame-de-Lourdes* | 7960,3 | 107,3 | 7853,0 |
| | Plessisville (paroisse)* | 799,6 | 364,2 | 435,4 |
| | Plessisville (ville) | 841,9 | 0,0 | 841,9 |
| | Princeville* | 3073,3 | 650,7 | 2422,6 |
| | Saint-Ferdinand* | 304,9 | 304,9 | 0,0 |
| | Saint-Pierre-Baptiste | 99,0 | 99,0 | 0,0 |
| | Sainte-Sophie-d'Halifax* | 87,1 | 87,1 | 0,0 |
| | Villeroy* | 3699,1 | 84,6 | 3614,5 |
| Lotbinière | - | 39,7 | 39,7 | 0,0 |
| | Leclercville* | 5,2 | 5,2 | 0,0 |
| | Sainte-Agathe-de-Lotbinière* | 34,0 | 34,0 | 0,0 |
| | Val-Alain* | 0,5 | 0,5 | 0,0 |
| Nicolet-Yamaska | - | 669,0 | 666,0 | 3,0 |
| | Aston-Jonction | 67,6 | 67,6 | 0,0 |
| | Grand-Saint-Esprit* | 49,0 | 49,0 | 0,0 |
| | Nicolet* | 14,3 | 11,3 | 3,0 |
| | Saint-Célestin (municipalité) | 107,2 | 107,2 | 0,0 |
| | Saint-Célestin (village) | 90,0 | 90,0 | 0,0 |
| | Saint-Léonard-d'Aston* | 31,7 | 31,7 | 0,0 |
| | Saint-Wenceslas* | 221,6 | 221,6 | 0,0 |
| | Sainte-Eulalie* | 87,6 | 87,6 | 0,0 |
| TOTAL | | 42 754,6 | 5396,2 | 48 150,8 |

*Les volumes d'eau calculés pour ces municipalités correspondent à la portion se trouvant dans la zone d'étude



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ☒ Zone d'étude

Type de réseau d'approvisionnement

- Aucun réseau
- ▨ Approvisionnement mixte
- Eau souterraine
- Eau de surface

Figure 54 Approvisionnements municipaux

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



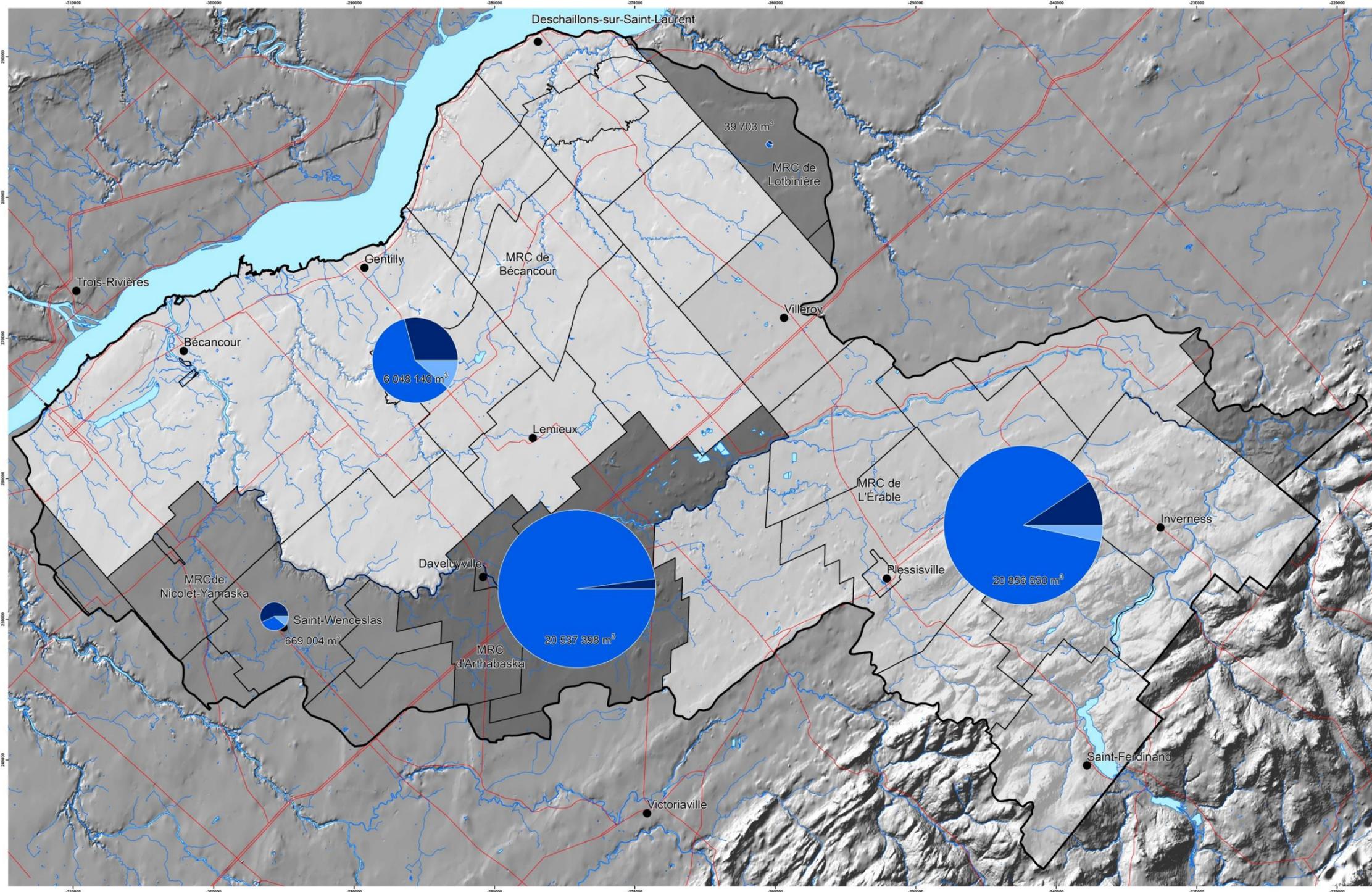
MÉTADONNÉES
Protocole livrable 26
Section 7.1 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Informations sur la consommation d'eau:
MDDEF, Statistiques Canada, MAPAQ
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'égard des données disponibles. Le porteur régional en déclinant pouvoir bénéficier à l'échelle locale ne saurait être tenu responsable de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adaptation à une fin particulière de toute œuvre dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des données y étant reliées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myronowicz, G. 2013. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEF.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude
- ⊞ Municipalité

Consommation d'eau par type d'usage (m³)

- 210 000
- Résidentielle
- Agricole
- Industrielle, commerciale et institutionnelle

Figure 55 Consommation d'eau par type d'utilisation

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



MÉTADONNÉES
Protocole 26
Section 7.1 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

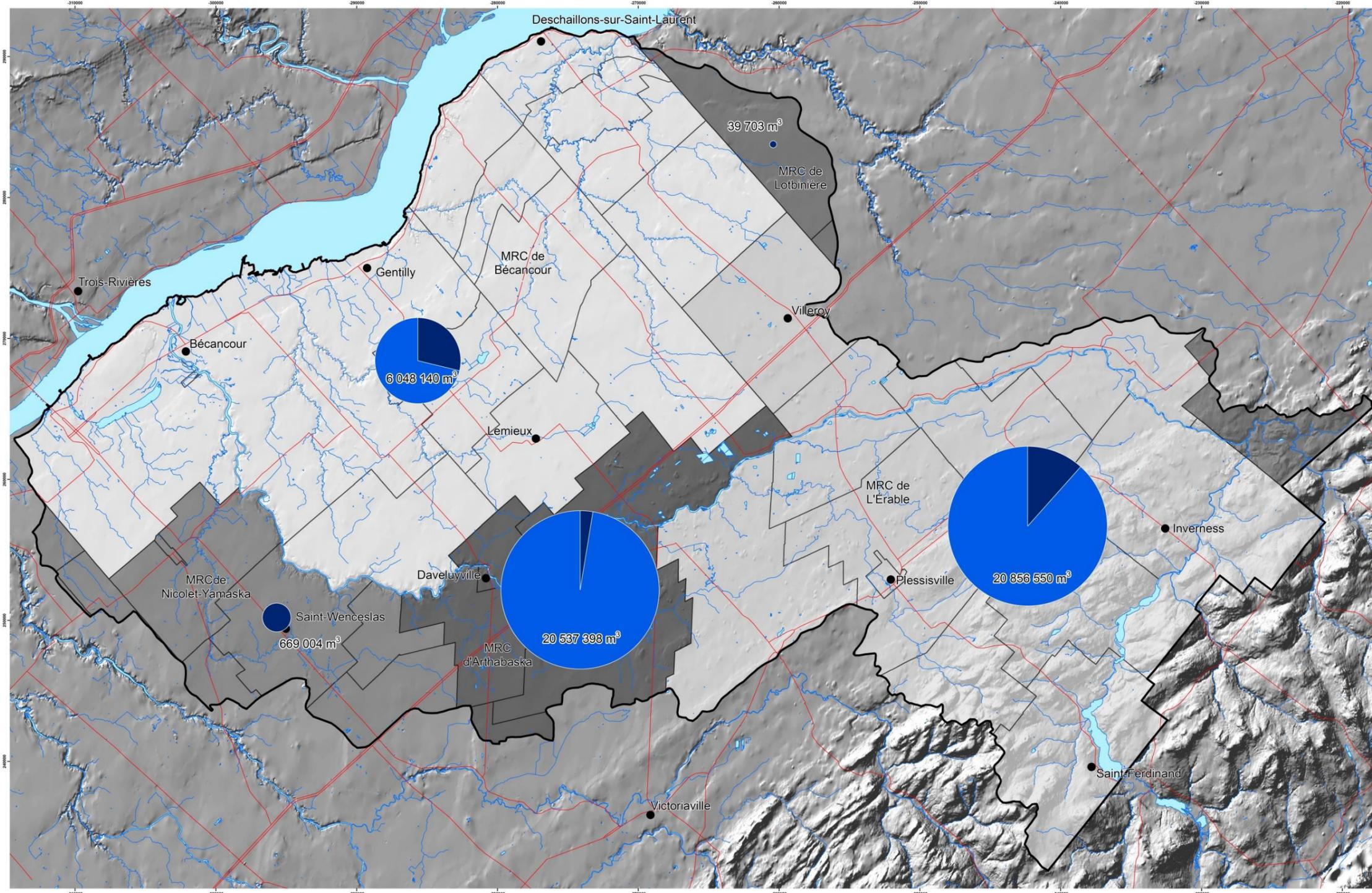


SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Estimation de la consommation d'eau: MDDEFP,
Statistique Canada, MAPAQ
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ou organismes affiliés ne donnent aucune garantie, quant à la fiabilité, ou quant à l'adéquation à une fin particulière de toute donnée dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de consommation des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude
- ⊞ Municipalité

Consommation d'eau par type de source (m³)

- 210 000
- Eau souterraine
- Eau de surface

Figure 56 Consommation d'eau par type de source

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



MÉTADONNÉES
Protocole livrable 26
Section 7.1 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)



SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K
Estimation de la consommation d'eau: MDDEFP,
Statistique Canada, MAPAQ
Réalisation:
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'édition ne donnent aucune garantie, qu'elle soit explicite ou implicite, en ce qui concerne l'exactitude ou l'intégrité des données et des conditions présentées, ou pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles œuvres dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de consommation des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Rapport présenté au MDDEFP.

7.2 Qualité de la ressource

Les données de qualité de l'eau ont été analysées suivant le protocole de traitement et de représentation des données géochimiques (voir **Annexe 18**). Douze dépassements de normes de potabilité ont été relevés sur les 119 forages échantillonnés (**Tableau 29** et **Figure 57**). Sept de ces dépassements concernent le fluor, trois le baryum, un l'antimoine et un l'arsenic. Les dépassements concernant le fluor, le baryum et l'antimoine proviennent de puits qui captent l'aquifère de roc fracturé. L'occurrence du fluor et du baryum est observée sur la partie aval du bassin lorsque le degré de confinement de l'aquifère au roc devient important. Les plus fortes concentrations en fluor et en baryum seraient donc d'origine naturelle, dépendantes de la géologie et de conditions captives pour l'aquifère au roc, qui favorisent la dissolution de minéraux et de métaux présents naturellement dans le roc. Le dépassement en arsenic se retrouve à l'emplacement d'un aquifère granulaire de surface. L'origine de l'arsenic pour ce dépassement serait vraisemblablement d'origine anthropique et pourrait être associée à une source de contamination par des produits de traitement du bois utilisés pour les poteaux électriques. Dans certaines conditions, l'occurrence de l'arsenic peut être d'origine naturelle, principalement par l'altération des minéraux contenant de l'arsenic, mais ceci ne semble pas être le cas ici puisqu'aucun autre dépassement de norme n'a été observé dans les dépôts granulaires.

Tableau 28 Sommaire des dépassements de normes*, **

| Paramètres | Nb | Statistiques (mg/L) | | | | Critères de potabilité (mg/L) | Fréquence | Proportion (%) |
|---|-----|---------------------|---------|------------|---------|-------------------------------|-----------|----------------|
| | | Min | Médiane | Écart-type | Max | | | |
| Arsenic (As) | 119 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 1 | 0,8 |
| Bore (B) | 119 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 1,7 | 5,0 | 0 | 0,0 |
| Barium (Ba) | 119 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 2,3 | 1,0 | 3 | 2,5 |
| Cadmium (Cd) | 119 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0 | 0,0 |
| Chrome (Cr) | 119 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0 | 0,0 |
| Fluor (F) | 110 | 0,1 | 0,1 | 1,2 | 12,0 | 1,5 | 7 | 6,4 |
| Nitrite/Nitrate (NO ₂ -NO ₃ , mg N/L) | 119 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 7,1 | 10,0 | 0 | 0,0 |
| Plomb (Pb) | 119 | 0,00010 | 0,00013 | 0,00048 | 0,00290 | 0,01 | 0 | 0,0 |
| Antimoine (Sb) | 119 | 0,001 | 0,001 | 0,00049 | 0,006 | 0,006 | 1 | 0,8 |
| Sélénium (Se) | 119 | 0,001 | 0,001 | 0,000018 | 0,0012 | 0,01 | 0 | 0,0 |
| Uranium (U) | 119 | 0,001 | 0,001 | 0,0016 | 0,016 | 0,02 | 0 | 0,0 |

*Le tableau montre seulement les paramètres normés qui ont été analysés dans le cadre du projet

**Les paramètres normés sont basés sur le Règlement sur la qualité de l'eau potable (2008)

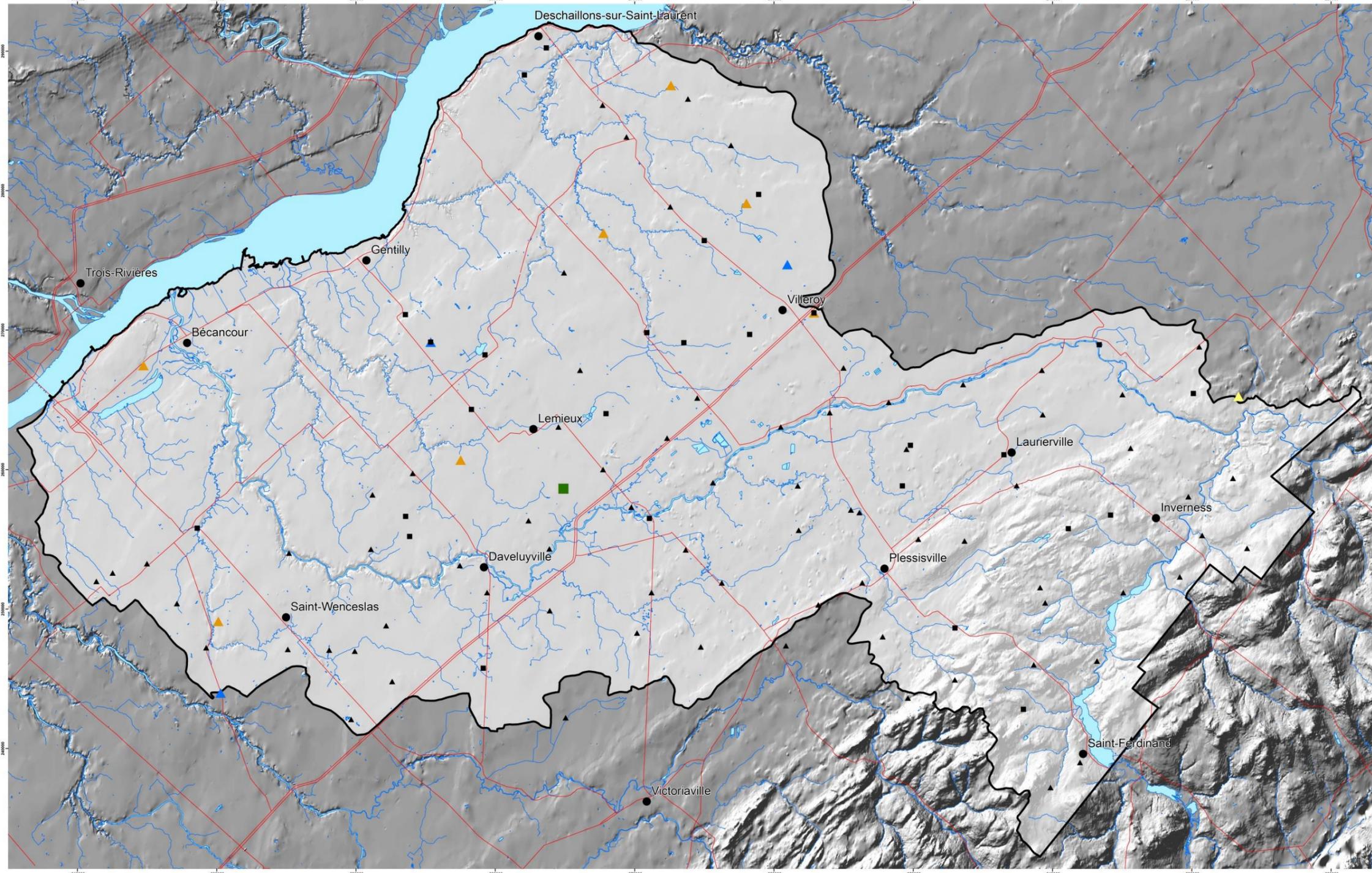
Les objectifs esthétiques ne font pas l'objet de normes puisqu'ils n'ont pas d'incidence sur la santé. Ils sont plutôt des recommandations remédier à des concentrations élevées peut améliorer le goût et l'apparence de l'eau, limiter la formation de bactéries dans l'eau et diminuer les dépôts dans la plomberie par exemple. Les dépassements d'objectifs esthétiques les plus souvent observés concernent le pH (54) et le manganèse (54) (**Tableau 30** et **Figure 58**). Dans le cas du manganèse, un lien entre des concentrations élevées de manganèse et une diminution du quotient intellectuel chez les enfants en bas âge ont récemment été découverts (Bouchard et al., 2011). Il est donc probable que ce paramètre devienne bientôt normé. L'occurrence du manganèse dans l'eau souterraine est vraisemblablement d'origine naturelle. À titre d'exemple, le rapport de compilation de la géologie du roc de Globensky (1987) mentionne que l'intervalle supérieur de la Formation de Nicolet (Groupe de Lorraine) est riche en manganèse. Cependant, les concentrations en manganèse relevées dans l'eau souterraine pour ce projet sont réparties sur l'ensemble de la zone d'étude et ne permettent pas d'associer l'occurrence particulière du manganèse pour un certain type de roc ou selon certaines conditions de confinement de l'eau souterraine. Les autres dépassements les plus souvent observés sur la zone d'étude sont les matières dissoutes totales (25), le fer (17), la dureté totale (15), le sodium (10), le chlore (5), les sulfures (3) et l'aluminium (1). Les dépassements en sodium se retrouvent plus vers l'aval du bassin ou les conditions de confinement pour l'aquifère sont marquées, mais aucune tendance amont-aval n'est observable pour les autres dépassements du critère esthétique.

Tableau 29 Sommaire des dépassements esthétiques

| Paramètres | Nb | Statistiques (mg/L) | | | | Objectifs esthétiques | Fréquence | Proportion (%) |
|---|-----|---------------------|---------|------------|--------|-----------------------|-----------|----------------|
| | | Min | Médiane | Écart-type | Max | | | |
| Aluminium (Al) | 119 | 0,001 | 0,004 | 0,38 | 4,1 | 0,1 | 1 | 0,8 |
| Chlore (Cl) | 119 | 0,18 | 8,90 | 140 | 1100 | 250 | 5 | 4,2 |
| Cuivre (Cu) | 119 | 0,0005 | 0,0005 | 0,020 | 0,18 | 1 | 0 | 0,0 |
| Dureté totale (mg CaCO ₃ /l) | 107 | 0,28 | 92,67 | 110 | 676,99 | 200-500 | 15 | 14,0 |
| Fer (Fe) | 119 | 0,03 | 0,03 | 1,8 | 14,00 | 0,3 | 17 | 14,3 |
| Matière dissoute totale (MDT) | 107 | 59 | 310 | 37 | 2362 | 500 | 25 | 23,4 |
| Manganèse (Mn) | 119 | 0,0004 | 0,042 | 0,16 | 0,97 | 0,05 | 54 | 45,4 |
| Sodium (Na) | 119 | 0,79 | 16 | 120 | 820 | 200 | 10 | 8,4 |
| pH | 119 | 4,37 | 7,5 | 1,2 | 9,73 | 6.5 - 8.5 | 54 | 45,4 |
| Sulfate (SO ₄) | 119 | 0,5 | 17 | 25 | 180 | 500 | 0 | 0,0 |
| Sulfure (S, mg H ₂ S/l) | 119 | 0,02 | 0,02 | 15 | 1,4 | 0,05 | 3 | 2,5 |
| T (°C) | 119 | 0,34 | 9,4 | 2,6 | 19,8 | 15 | 0 | 0,0 |
| Zinc (Zn) | 119 | 0,001 | 0,0068 | 0,095 | 1 | 5 | 0 | 0,0 |

*Le tableau montre seulement les paramètres normés qui ont été analysés dans le cadre du projet

**Les paramètres normés sont basés sur le Règlement sur la qualité de l'eau potable (2008)



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬭ Zone d'étude

Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable

Aquifère - Dépassement

- ▲ Roc - aucun dépassement
- Granulaire - aucun dépassement
- ▲ Roc - barium
- ▲ Roc - fluor
- ▲ Roc - antimoine
- Granulaire - arsenic

Figure 57 Critères de qualité de l'eau potable

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC

Échelle 1/100 000



Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Métres central de 5
Système de référence géographique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MRN 20K

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



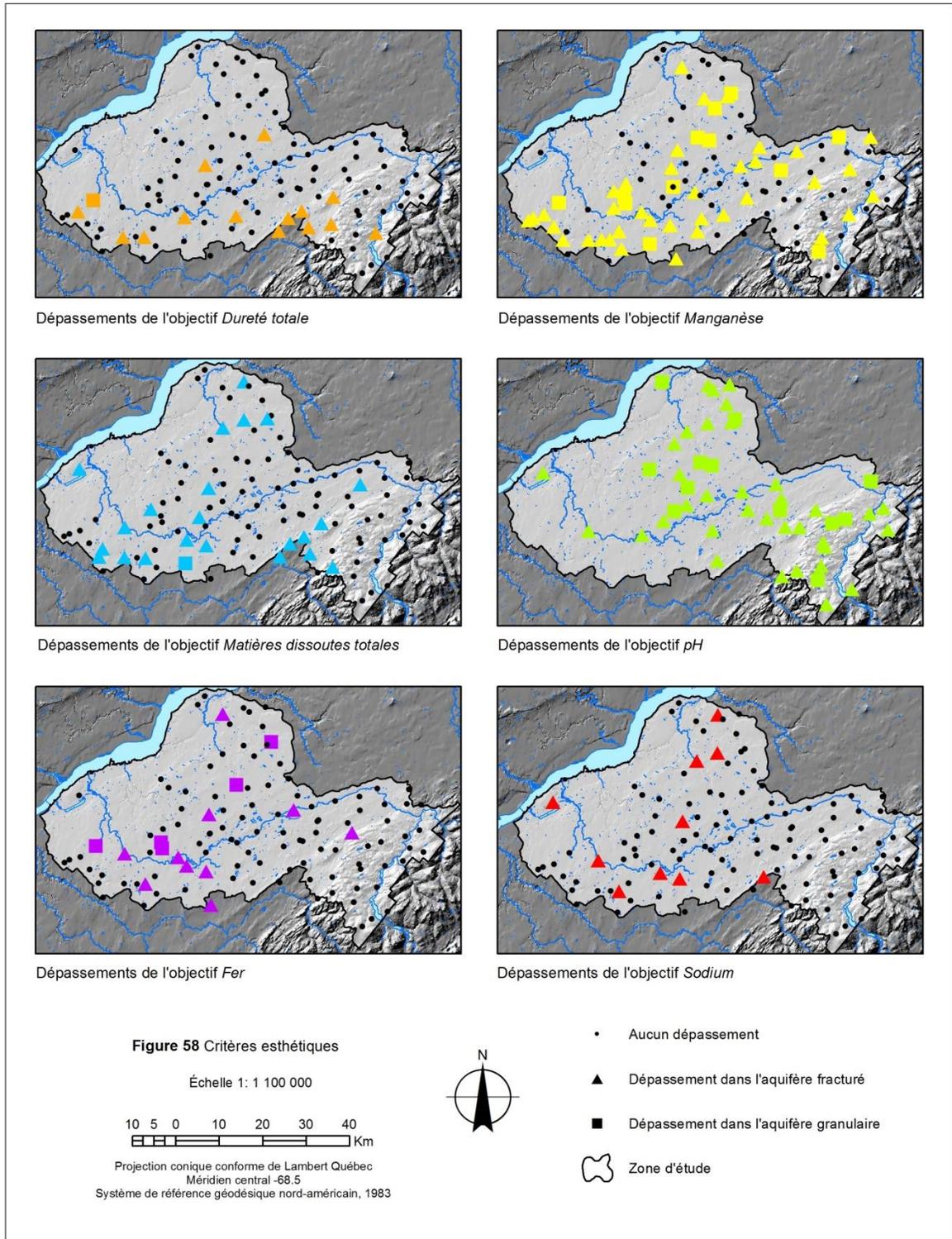
SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES

Protocole livrables 24/25
Section 7.2 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)



7.3 Densité des activités anthropiques

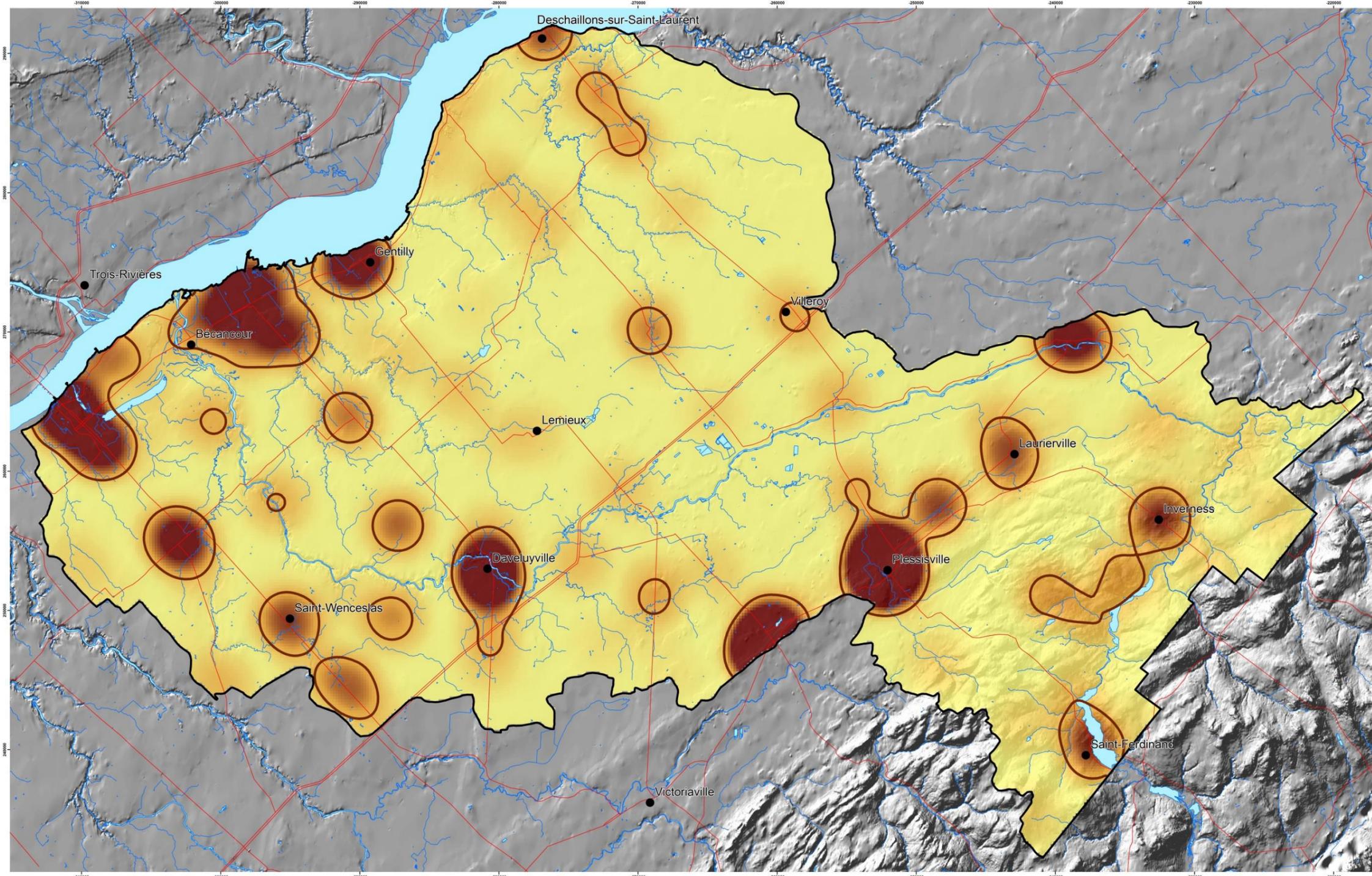
L'estimation de la densité des activités anthropiques sur la zone d'étude vise à évaluer l'impact potentiel des activités en termes de risque appréhendé sur la qualité de la ressource en eau souterraine. Cet indice vise à fournir les tendances régionales en termes de pressions des activités anthropiques sur l'eau souterraine. Les activités anthropiques présentant des sources de contamination potentielles ponctuelles ou diffuses ont été séparées en deux indices distincts.

Le premier indice vise à évaluer l'impact potentiel des activités anthropiques ponctuelles provenant des centres urbains et des activités commerciales et industrielles. Cet indice a été établi en suivant le protocole présenté à l'**Annexe 19**. Selon ce protocole, l'emplacement des activités est localisé grâce au système de classification des codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF), auxquels est associé un risque de contamination de l'eau souterraine. Le risque de contamination a été établi selon le système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) pour chaque activité du CUBF, permettant d'estimer la nature et les contaminants potentiels utilisés. Une pondération des risques associés à chaque activité anthropique a été calculée en utilisant quatre critères : la toxicité des contaminants potentiels, leur quantité, la zone d'impact possible et la fréquence des rejets. L'indice considère ainsi de nombreuses activités (agroalimentaire, chimique, bois et pâtes papier, métallurgie, etc.) et polluants potentiels associés. Dans cet indice, les sources de contaminations diffuses référencées au CUBF telles que les installations septiques, les activités agricoles et les autoroutes ont été exclues. Il est important de mentionner que l'évaluation globale de l'impact ou du risque potentiel lié à chaque activité demeure qualitative. Cette évaluation vise à attribuer à chaque activité un poids relatif afin de permettre la préparation d'un portrait régional de la pression des activités anthropiques, en termes de risque appréhendé, sur la qualité des ressources en eau souterraine. Cet outil est destiné à une analyse régionale et ne peut remplacer la nécessité d'évaluer l'impact ponctuel de chaque activité.

L'indice de densité d'activités anthropiques varie de 0 à 41,3 activités/km². Parmi les zones où l'indice de densité d'activités anthropiques est le plus élevé se trouvent la zone portuaire et industrielle de Bécancour, le croisement des autoroutes 55 et 30 près du village de Saint-Grégoire, ainsi que les villes de Plessisville, Princeville et Daveluyville (**Figure 59**). Puisque le risque évalué est associé à des activités industrielles ou commerciales, il est nul en dehors des centres urbains ou industriels.

Le deuxième indice calculé estime la densité des sources de contamination potentielles diffuses, qui sont typiquement d'origine agricole et qui concernent l'utilisation de fertilisants et de pesticides. Cet indice considère ainsi le nombre de fermes/km². Il est important de mentionner que le niveau de risque calculé dans ce livrable ne prend pas en compte la vulnérabilité de l'aquifère au roc. L'impact des activités agricoles est représenté séparément sous forme de densité spatiale des fermes, mais sans risque associé.

La densité des activités agricoles varie de 0 à 4,4 fermes/km². La plus grande densité d'activités agricole se retrouve dans la zone longeant le fleuve Saint-Laurent entre Bécancour et le secteur de Saint-Grégoire et s'étendant jusqu'à Sainte-Eulalie au sud (**Figure 60**). Mis à part la tourbière du Lac Rose et la zone portuaire et industrielle de Bécancour, ces secteurs renferment la plus forte concentration d'activités agricoles de la zone d'étude. Il est intéressant de souligner que ces secteurs ont un indice DRASTIC de l'aquifère au roc parmi les plus bas de la zone d'étude. Le secteur central et le secteur des Appalaches en amont de la zone d'étude montrent une faible densité d'activités agricoles. Il est important de rappeler que ces zones ont été identifiées comme vulnérables avec l'indice DRASTIC. C'est également dans ces zones que les plus hautes concentrations en nitrates ont été observées dans l'eau souterraine.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⬮ Zone d'étude

Pondération du risque (/km²)

Maximum : 41,3
Minimum : 0

— Contour 75^e percentile

Figure 59 Densité des activités anthropiques

ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Sources des données utilisée:
CUBF 2010

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



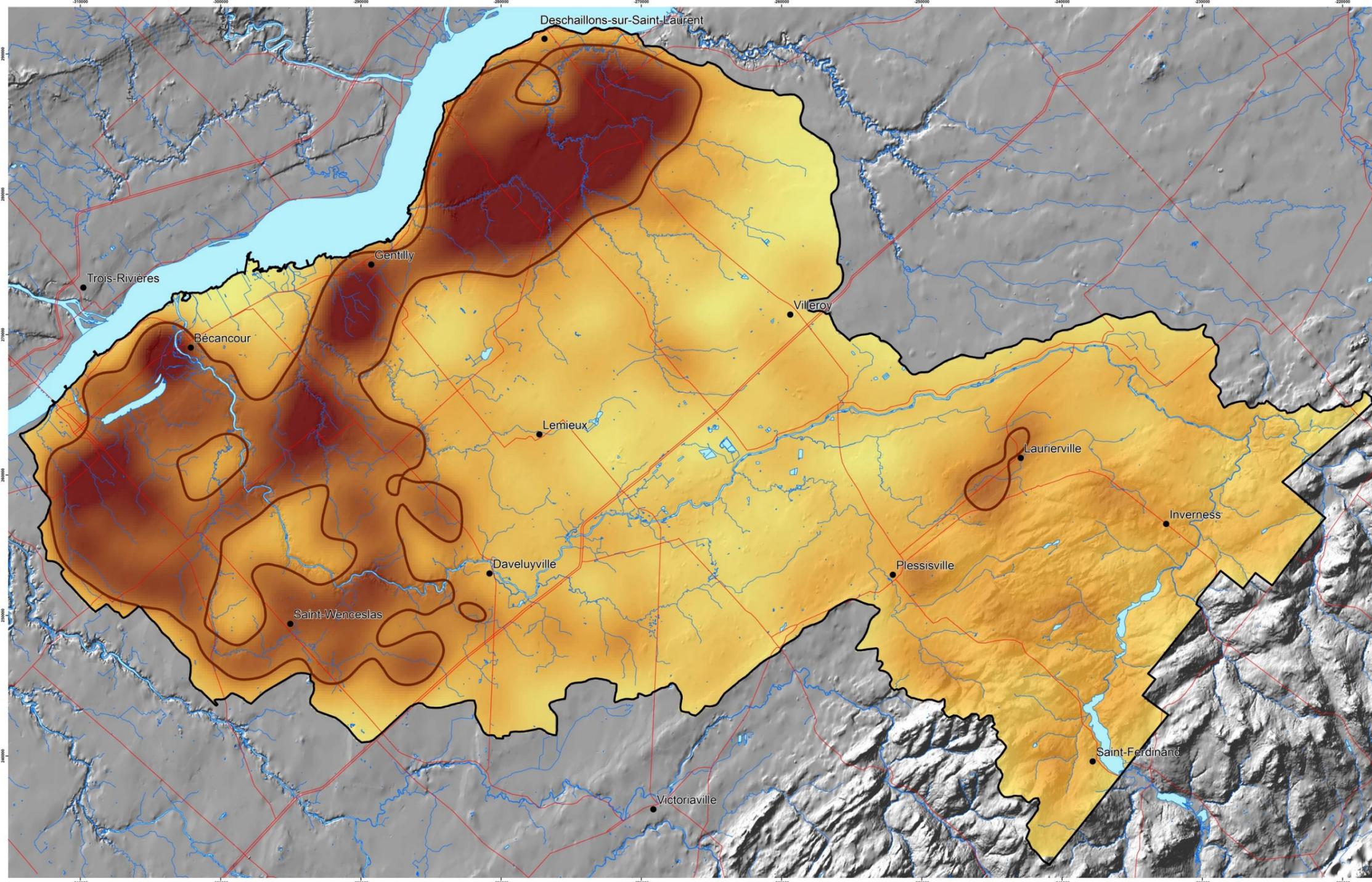
SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE



MÉTADONNÉES
Protocole livrable 23
Section 7.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégralité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ne garantissent aucune responsabilité quant à l'utilisation ou aux fins particulières de toute donnée dérivée de cette carte et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou les données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013.
Projet de conservation des zones extérieures du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Présenté au MDDEFP.



LÉGENDE

- Ville
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- ⊞ Zone d'étude

Densité des activités agricoles (ferme/km²)

Maximum: 4,4
Minimum: 0

— Contour 75^e percentile



MÉTADONNÉES
Section 7.3 du Rapport d'Étape Phase III
(Larocque et al., 2013)

Figure 60 Densité des activités agricoles

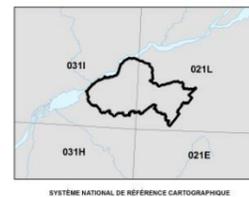
ZONE BÉCANCOUR
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Sources des données utilisées: CUBF 2010

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1:100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées pour réaliser la carte, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données. Par conséquent, cette carte ne peut remplacer les études réalisées pour définir les conditions réelles à l'échelle locale et n'offre aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentes. Les auteurs et leurs institutions ne prennent aucune responsabilité quant à l'exactitude, ou quant à l'adéquation à une fin particulière de toute donnée dérivée de cette carte, et n'assument aucune responsabilité pour les dommages découlant de la création et de l'utilisation de telles données dérivées, ou pour des décisions basées sur l'utilisation de cette carte, des conditions présentées par la carte ou les données y étant rattachées.

Relation bibliographique consultée : Larocque, M., Gagnon, S., Tremblay, L. et Myroniuk, G. 2013. Projet de cartographie des zones extérieures du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport final. Présenté au MDDEFP.

7.4 Gestion durable de la ressource

7.4.1 *Principes de gestion durable*

La gestion durable des ressources eau est basée sur le principe du développement durable selon lequel les ressources doivent être utilisées de manière à répondre aux besoins de la société tout en préservant leur pérennité à long terme. La gestion durable des ressources en eau, comme celle de tous les types de ressources, est le résultat d'un ensemble de compromis acceptés par la société.

Les ressources en eau sont exposées à un ensemble de pressions parmi lesquelles certaines concernent plus spécifiquement les eaux souterraines. La liste suivante présente des exemples, sans être toutefois exhaustive.

- Changements dans l'aménagement du territoire (e.g. urbanisation, développement de l'agriculture, etc.);
- Augmentation des prélèvements d'eau souterraine pour l'alimentation en eau potable (e.g. en raison d'une augmentation de la population ou d'un transfert des sources de surface vers les sources souterraines en raison d'une dégradation de la qualité des eaux de surface), pour l'agriculture (e.g. nouvelles cultures nécessitant de l'irrigation) ou pour l'industrie.
- Augmentation de la pollution d'origine diffuse par l'intensification des pratiques agricoles;
- Pollutions ponctuelles accidentelles et prolongées (e.g. déversements, sites d'enfouissement illicites);
- Nouvelles activités ayant un potentiel de contamination de l'eau souterraine encore mal quantifié (e.g. exploitation des gaz de shales);
- Changements dans la dynamique de la recharge entraînée par les changements climatiques.

La gestion durable des eaux souterraines doit être basée sur une connaissance adéquate des ressources disponibles. Le programme PACES joue un rôle majeur pour développer ces connaissances. Le projet PACES-Bécancour a permis de construire une base de données fiable et complète des connaissances actuelles sur les eaux souterraines pour une région où très peu de données étaient jusqu'ici disponibles. Les cartes développées ainsi que l'ensemble des travaux complémentaires réalisés dans le présent projet procurent une compréhension des eaux souterraines qui forme une base solide pour la gestion durable de la ressource en eau.

Cette gestion doit maintenant être réalisée avec le support des intervenants locaux. Plusieurs ont d'ailleurs été partenaires du projet PACES-Bécancour, ce qui témoigne de leur grand intérêt pour la question. Pour y parvenir, ceux-ci doivent toutefois disposer d'indicateurs de quantité et de qualité qui traduisent l'état actuel de la ressource dans la

région. Afin de permettre une gestion à long terme, ces indicateurs devront faire l'objet d'un suivi sur plusieurs années, voire sur des décennies.

7.4.2 Indicateurs de quantité

La zone d'étude ne présente pas de déficit en eau. Comme ailleurs dans le Québec méridional, les précipitations sont abondantes et l'évapotranspiration est limitée. De plus, en raison de la présence de formations rocheuses peu productives et de la faible étendue des formations granulaires, les prélèvements en eau souterraine sont très limités. Il n'y a donc pas de pénurie d'eau à prévoir sur la zone d'étude. Néanmoins, justement parce que l'aquifère rocheux est peu productif, l'augmentation des débits pompés, qui pourraient résulter d'une intensification des activités agricoles ou industrielles, pourrait poser des contraintes sur les ressources en eau et entraîner des conflits d'usage.

Une baisse des niveaux de nappe qui résulterait par exemple d'une diminution de la recharge en raison de l'imperméabilisation des surfaces, des changements climatiques, ou de la perte de milieux humides pourrait avoir pour effet de réduire les écoulements souterrains qui ont lieu dans la zone superficielle de l'aquifère. Ceci pourrait avoir un impact global sur le cycle de l'eau dans l'ensemble de la zone d'étude, notamment par l'augmentation du ruissellement de surface et la diminution des débits de base des cours d'eau. Les effets de tels changements pourraient être de réduire les volumes d'eau souterraine disponibles pour les municipalités, d'altérer la qualité de l'eau en rivière et de modifier les écosystèmes de la région.

Pour assurer le maintien des conditions actuelles qui sont assez avantageuses au niveau de la quantité d'eau disponible, une gestion durable de la ressource en eau doit être mise en place. Une telle gestion implique le suivi d'indicateurs de quantité. Ceux-ci doivent refléter la connaissance des flux actuels et être susceptibles de mettre en évidence des changements dans les quantités d'eau disponibles ou des changements dans la nature des flux rencontrés.

Le Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec mis en place par le MDDEFP est un moyen important pour assurer le suivi des niveaux d'eau dans les aquifères et une source d'information cruciale pour la région. L'extension du réseau dans le Centre-du-Québec dans le cadre du projet PACES-Bécancour est certainement un atout pour la région. Toutefois, en raison des fluctuations intra et interannuelles naturelles de la recharge, les données acquises par ces piézomètres ne seront pleinement utiles pour détecter des tendances que dans une ou deux décennies.

Le réseau existant de stations de mesure des débits en rivière, opéré par le CEHQ, est un autre outil important pour suivre les flux d'eau souterraine. Dans le Québec méridional, les débits en rivière intègrent en général une proportion importante d'écoulements souterrains et hypodermiques. Ceci est particulièrement vrai dans la zone d'étude où une très grande partie de la recharge est drainée par les cours d'eau et très peu d'eau souterraine rejoint

le fleuve Saint-Laurent. Le suivi des débits, particulièrement en période d'étiage, est donc un outil important pour indiquer les quantités d'eaux souterraines qui s'écoulent dans la portion la plus dynamique de l'aquifère.

Les milieux humides occupent une superficie importante du territoire de la zone d'étude. Dans ce projet, il a été démontré que les tourbières ont des échanges non négligeables avec l'aquifère. De par leur rôle tampon, ces milieux humides ralentissent les écoulements, favorisent le maintien des débits d'étiage en rivière, contribuent à maintenir des niveaux élevés dans les aquifères granulaires superficiels et participent probablement à la recharge de l'aquifère au roc. Le nombre et l'état des tourbières sont donc des bons indicateurs de la quantité d'eau qui est stockée dans les réservoirs superficiels. Leur suivi est important pour la gestion durable de l'eau dans la zone d'étude.

7.4.3 Indicateurs de qualité

La zone d'étude ne présente aucun problème majeur au niveau de la qualité de l'eau souterraine. Seuls quelques dépassements de normes ont été observés, la plupart étant causés par des échanges naturels entre les formations géologiques et l'eau souterraine qui circule dans les aquifères. Afin d'assurer une eau souterraine de qualité, la gestion durable de la ressource en eau doit néanmoins inclure le suivi d'indicateurs de qualité. Un suivi régulier de la qualité de l'eau dans les forages du Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec permettrait d'identifier l'émergence de nouvelles problématiques liées à la qualité de la ressource. Une telle couverture de la qualité de l'eau ne serait pas représentative de l'ensemble du territoire dû au nombre limité de stations suivies.

Les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines font partie des problématiques qui doivent être suivies plus particulièrement. Même si les concentrations en nitrates n'excèdent nulle part le critère pour l'eau potable, celles observées dans les zones de recharge sont nettement supérieures au seuil d'impact anthropique. L'origine de ces concentrations en nitrates n'a pas été étudiée en détail dans ce projet, mais les sources agricoles en sont probablement responsables en grande partie. Il est donc particulièrement important d'assurer un suivi des concentrations en nitrates, mais également d'évaluer la situation pour d'autres contaminants d'origine agricole (i.e. pesticides, bactéries) qui n'ont pas été étudiés dans ce projet, mais qui pourraient migrer des mêmes sources agricoles vers l'aquifère.

Les teneurs en manganèse ont également été identifiées comme étant problématiques en regard du critère esthétique. Ces concentrations sont le résultat du contact entre les formations géologiques et l'eau souterraine et ne sont pas de source anthropique. Même si elles peuvent être problématiques en termes de santé publique (Bouchard et al., 2011), les concentrations en manganèse pourraient rester stables dans l'aquifère si les conditions d'écoulement souterrain demeurent les mêmes. Un suivi de ces concentrations serait néanmoins souhaitable.

8 RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

8.1 Recommandations

8.1.1 *Recommandations en lien avec la ressource en eau*

Quantités d'eau disponible

- Il est recommandé de réaliser des études complémentaires à l'échelle locale avant tout nouveau projet d'exploitation de l'eau souterraine. L'aquifère au roc fracturé est dans l'ensemble peu productif et pourrait localement ne pas permettre des pompages importants.
- Il est recommandé de poursuivre la caractérisation des aquifères de dépôts meubles à l'échelle locale. Par exemple, l'aquifère des sables des Vieilles Forges doit être mieux caractérisé, notamment pour définir plus précisément son étendue spatiale et sa transmissivité, de même que sa zone de recharge et son taux de renouvellement. D'autres aquifères granulaires d'étendue moins exhaustive existent probablement dans la région, mais n'ont pas été ciblés par le projet. Certains, qui pourraient devenir des sources potentielles d'alimentation en eau potable pour les municipalités, devront faire l'objet d'études spécifiques.
- Il est recommandé de poursuivre le suivi des niveaux piézométriques dans tous les nouveaux forages intégrés dans le Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec mis en place par le MDDEFP, incluant les forages au roc et les piézomètres dans les dépôts de surface. Ce suivi à long terme est absolument nécessaire pour identifier d'éventuelles variations à long terme des volumes d'eau disponibles. Il est également recommandé de maintenir et si possible étendre le suivi à long terme des débits en rivières.

Qualité de l'eau

- Il est recommandé de contrôler les activités à fort potentiel de pollution dans toutes les zones de vulnérabilité élevée ayant été identifiées dans ce projet. Ces formations correspondent souvent à des zones de recharge de l'aquifère au roc et elles sont toutes hautement vulnérables. Toute exploitation de l'eau souterraine dans ces formations devra être réalisée en limitant au maximum les sources potentielles de contamination. Il est également recommandé de planifier le développement urbain afin de limiter l'imperméabilisation des surfaces ou le drainage, dans le but de favoriser la recharge.
- Il est recommandé de réaliser un suivi à long terme des forages où des dépassements de normes ont été observés, de même qu'un suivi à long terme des secteurs où les concentrations en nitrates les plus élevées ont été observées. Une étude sur le transfert des nutriments à l'échelle des bassins versants serait utile pour comprendre

l'origine de cette contamination. Des analyses pesticides et un suivi bactériologique dans les forages individuels permettraient de cibler les secteurs à risque de contamination par ces polluants d'origine agricole. Également, un suivi du manganèse dans l'ensemble de la région devrait être mis en œuvre afin d'assurer le respect des critères esthétiques.

Milieux humides

- Ce projet a montré que les tourbières pourraient échanger des volumes d'eau non négligeables avec les dépôts granulaires superficiels. Même si ces volumes doivent encore être confirmés sur le terrain, il est recommandé de limiter le plus possible les perturbations dans l'environnement immédiat des tourbières. Il est également recommandé d'augmenter autant que possible les zones de conservation des milieux humides sur la zone d'étude.

8.1.2 Recommandations sur la réalisation des travaux PACES

La collaboration avec les partenaires du milieu s'est avérée un atout important tout au long du déroulement du projet. Les rencontres du comité de suivi ont permis d'informer les partenaires de l'avancement des travaux et d'identifier des problématiques spécifiques au déroulement du projet. La participation des partenaires régionaux à la réalisation des projets PACES paraît donc essentielle pour le bon déroulement des travaux. Il est recommandé de conserver cette formule gagnante dans les appels d'offre futurs.

Le programme PACES a permis de concerter la recherche universitaire pour développer une connaissance régionale des eaux souterraines qui dépasse le cadre des livrables présentés dans ce rapport. Les équipes de recherche en place dans les différentes universités ont travaillé en collaboration étroite pour réaliser une caractérisation des eaux souterraines de manière concertée et homogène dans différentes régions du Québec. Il en résulte une meilleure compréhension des aquifères locaux, mais également des développements très significatifs au niveau des méthodes de caractérisation, la mise en place d'une synergie interuniversitaire sur la question des eaux souterraines menant à plusieurs initiatives financées par d'autres sources (e.g. RQES, projets de recherche FRQNT, etc.), une compréhension des ressources en eaux souterraines qui commence à se dessiner à l'échelle du territoire et la formation de plusieurs hydrogéologues qui trouveront rapidement leur place sur le marché du travail. Il est recommandé de poursuivre le programme PACES pour réaliser la caractérisation des eaux souterraines dans les régions encore non étudiées.

Bien que le transfert des connaissances ait eu lieu de manière ponctuelle tout au long du projet, il débutera de manière concrète à la fin du projet, avec le présent rapport et avec transfert de toutes les données acquises. Le futur Portail de l'eau du MDDEFP sera un outil majeur pour faciliter le transfert des connaissances et la mise à disposition des

données acquises. Il est recommandé d'intégrer la diffusion des données via le Portail de l'eau dans les prochains projets PACES.

8.2 Conclusions scientifiques

Le projet PACES-Bécancour a permis de caractériser les eaux souterraines de la partie basse de la Zone de gestion intégrée de l'eau de Bécancour. Ce projet avait deux grands objectifs généraux:

1) dresser un portrait de la ressource en eaux souterraines sur la partie basse du bassin versant de la rivière Bécancour et de huit bassins versants connexes situés près du fleuve Saint-Laurent;

2) favoriser une saine gestion de la ressource en développant des partenariats entre les acteurs de l'eau et les gestionnaires du territoire dans l'acquisition des connaissances sur la ressource en eaux souterraines.

Les travaux réalisés ont permis d'atteindre les objectifs spécifiques du projet : 1) comprendre la nature des formations aquifères; 2) connaître l'origine et les directions d'écoulement de l'eau souterraine; 3) décrire la qualité de l'eau souterraine; 4) quantifier le bilan hydrique de l'aquifère et les volumes d'eau exploitables de façon durable; 5) déterminer la vulnérabilité de l'eau souterraine aux activités humaines.

Nature des formations aquifères

L'aquifère au roc dans la partie basse de la zone Bécancour est peu transmissif dans l'ensemble, même si certains secteurs ont été identifiés comme plus productifs, notamment la zone amont et la zone la plus en aval. Les formations superficielles granulaires sont peu épaisses et d'étendue limitée, à l'exception de l'aquifère des sables des Vieilles Forges qui pourrait représenter une source importante d'eau potable.

Origine et directions d'écoulement de l'eau souterraine

L'eau souterraine s'écoule généralement du sud vers le nord, à partir du secteur des Appalaches vers le fleuve Saint-Laurent. Les écoulements souterrains suivent la topographie et sont fortement influencés par les cours d'eau. Une partie importante de l'écoulement souterrain est intercepté par les nombreuses rivières présentes dans la région. L'aquifère apporte une contribution importante aux débits en rivière toute l'année, et cette contribution devient cruciale en période estivale.

Qualité de l'eau souterraine

L'eau souterraine de la zone d'étude est de bonne qualité de manière générale. Peu de dépassements des normes pour la qualité de l'eau potable ont été identifiés. Parmi ceux-ci, des dépassements de la norme pour le fluor et le baryum d'origine naturelle ont été

observés dans la partie aval du bassin lorsque le degré de confinement de l'aquifère au roc devient important. Les concentrations en nitrates observées ne dépassent pas la norme pour l'eau potable, mais dépassent parfois significativement le seuil d'impact anthropique. Ces concentrations sont préoccupantes dans le secteur amont de la zone d'étude. Une problématique importante dans la région concerne les concentrations en manganèse qui dépassent le critère esthétique et pourraient être une préoccupation pour la santé des enfants.

Bilan hydrique de l'aquifère

Le bilan hydrique de l'aquifère fracturé montre que la recharge moyenne de l'aquifère représente 15% des précipitations tandis que le ruissellement représente 57% des précipitations. La plupart des rivières importantes sont alimentées toute l'année par les eaux souterraines. Les volumes d'eau souterraine utilisés par les particuliers, les villes, l'agriculture et l'industrie représentent environ 1% de la recharge de l'aquifère fracturé. Une très faible proportion de la recharge (3%) atteint le fleuve Saint-Laurent en aval de la zone d'étude. Ces résultats traduisent un écoulement plus facile dans les couches superficielles de l'aquifère et reflètent le fait que les formations géologiques en profondeur sont relativement peu perméables.

La modélisation a montré que les tourbières pourraient échanger des volumes d'eau non négligeables avec les dépôts granulaires superficiels. Le rôle tampon des tourbières semble important pour les aquifères superficiels, comme il l'est sans doute également pour régulariser les débits des cours d'eau. Les tourbières de la zone d'étude ont subi une perte de 25% de leur superficie entre 1966 et 2010. Les pressions anthropiques importantes s'exercent encore sur ces milieux humides qui doivent être pris en compte dans la gestion de l'eau de la région.

Vulnérabilité de l'aquifère

Les secteurs où l'aquifère du roc fracturé est le plus vulnérable sont localisés dans la portion centrale de la zone d'étude, entre le piémont et l'autoroute 20, où la recharge est élevée et les dépôts sableux sont en contact direct avec le roc. Dans la zone amont, plusieurs secteurs sont ont une vulnérabilité significative. Les dépassements du seuil anthropique pour les concentrations en nitrates dans ce secteur reflètent bien cette vulnérabilité. L'aquifère fracturé de la partie aval comporte une zone ayant une vulnérabilité faible avec de part et d'autre des vulnérabilités plus élevées.

8.3 Conclusion générale

Les résultats présentés dans ce rapport sont le fruit de quatre années de travail avec la collaboration logistique et financière de plusieurs partenaires de la région: l'organisme de bassin versant GROBEC, l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec, la CRÉ Centre-du-Québec, les MRC d'Arthabaska, de Bécancour, de l'Érable et de Nicolet-Yamaska, ainsi que le cégep de Thetford. Le projet a été réalisé en collaboration avec le Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines et ses institutions affiliées (INRS-ETE, UQAC, UQAM, UQAT, UQTR et Université Laval), avec le financement et l'assistance technique du MDDEFP.

Le projet PACES-Bécancour apporte des connaissances très importantes pour la région au sujet des eaux souterraines. Les données acquises, les cartes produites et les analyses qui en découlent seront directement utiles pour la gestion de la ressource en eau à l'échelle de la Zone de gestion intégrée de l'eau Bécancour. La disponibilité d'une aussi grande quantité de nouvelles données soulève maintenant le défi de la poursuite des suivis initiés dans le projet, de la mise à jour des informations au fur et à mesure qu'elles deviendront disponibles et de la mise à disposition de toutes les données à la région. Un autre défi majeur consistera à assurer le transfert des connaissances acquises et le maintien de la concertation région-université. Une approche proactive pour relever ces défis permettra de maximiser les retombées des projets PACES et d'assurer la pleine utilisation des données disponibles dans les plans de gestion du territoire et des ressources en eau existants.

RÉFÉRENCES

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. et Hackett, G. 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. Rapport du US EPA EPA-600/2-87-035.
- Avard, K. 2013. *Rôle régional des tourbières sur les eaux souterraines de la partie basse de la zone Bécancour*. Mémoire de maîtrise en Sciences de la Terre, UQAM, 129 p.
- Avard, K., M. Larocque et S. Pellerin. 2013. Perturbations des tourbières de la région de Bécancour, Centre-du-Québec, entre 1966 et 2010. *Le Naturaliste Canadien*, Hiver 2013:8-15.
- Avard, K. et M. Larocque. 2011. *Rôle hydrogéologique régional des tourbières sur l'aquifère du bassin de la rivière Bécancour*. Comptes-rendus de conférence, colloque GéoHydro2011, août 2011, Québec, 7 p.
- Babineau, P. 1980. *Aménagement d'un puits et essai de pompage*. Rapport rédigé par Tek Eau. Inc. Manseau, Victoriaville, 28 p.
- Beaulieu, J., S. Murray et C. Villeneuve. 2012. *Cartographie détaillée des milieux humides du territoire du Centre-du-Québec - rapport synthèse*. Canards Illimités et Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec, 44 p.
- Béland, Y. 1979. *Supplément à l'étude hydrogéologique et addenda no.1 au plan d'aménagement et devis d'opération*. Rapport rédigé par les Consultants BMJ. Inc. Saint-Rosaire d'Arthabaska, Québec, 17 p.
- Bilodeau, D. 2007. *Étude hydrogéologique - Mise aux normes de l'ouvrage de captage*. Saint-Célestin, Brossard, Québec, 34 p.
- Bilodeau, C. 1981. *Levé hydrogéologique à Saint-Louis de Blandford, comté d'Arthabaska, Domaine Baril*. Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec. Saint-Louis de Blandford, Québec, Québec, 7 p.
- Bilodeau, C. 1980. *Levé hydrogéologique à Saint-Cyrille de Wendover, comté de Drummond*. Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec. Saint-Cyrille-de-Wendover, Québec, 5 p.
- Bouchard M.F., S. Sauvé, B. Barbeau, M. Legrand, M. E. Brodeur, T. Bouffard, E. Limoges, D. C. Bellinger et D. Mergler. 2011 Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 119(1):138-43.

- Bower, H. et R.C. Rice. 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12:423-28.
- BPR, 2006. *Municipalité de Sainte-Eulalie. Étude hydrogéologique - Mise aux normes des deux ouvrages de captage municipaux*. Trois-Rivières, Québec, 56 p.
- Burnett W.C., N.R. Peterson, I.R. Santos et R.W. Hicks. 2010. Use of automated radon measurements for rapid assessment of groundwater flow into Florida streams. *Journal of Hydrology*, 380:298–304.
- Cable, J. E., W.C. Burnett, J.P. Chanton, et G.L. Weatherly. 1996. Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon-222. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(3):591-604.
- Caron, M. 1985. *Recherche en eau souterraine Phase III, Saint-Wenceslas*. Rapport rédigé par Consultants HGE. Québec, Québec, 20 p.
- Castonguay, S., J. Dietrich, Shinduke et J.Y. Laliberté. 2006. *Nouveau regard sur l'architecture de la Plate-Forme du Saint-Laurent et des Appalaches du sud du Québec par le retraitement des profils de sismiques réflexion M-2002 et M-2003*. Commission géologique du Canada, dossier public 5328, 2 feuillets, 19 p.
- Castonguay, S., J.R. Dietrich, C. Morin et J.Y. Laliberté. 2001. *Structural architecture of the St. Lawrence platform and Quebec Appalachians: insights from reprocessed (MNRQ) seismic reflection data*. Commission géologique du Canada, dossier public 4028, 1 feuillet, doi :10.4095/212973.
- Chapleau, S. X. 1976. *Analyses d'eau*. Rapport rédigé par Geolab Inc. Deschaillons, Québec, 12 p.
- Chauvin, L. 1979. Géologie des dépôts meubles, région d'Asbestos-Disraeli. DPV-716, Ministère de l'Énergie et des Ressources, direction générale de la recherche géologique et minérale, Québec, Québec.
- Clark, I.D. et P. Fritz. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328 p.
- Cloutier, V., R. Lefebvre, R. Therrien et M.M.Savard. 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353:294-313.

- Consultants HGE. 1999. *Municipalité de Saint-Wenceslas. Essai de pompage au puits P-7*. Québec, Québec, 46 p.
- Consultants HGE, 1997. *Rapport préliminaire relatif au potentiel en eau souterraine commerciale de la propriété PHIGA inc., à Sainte-Marie-de-Blandford*. Québec, Québec, 16 p.
- Consultants HGE. 1989. *Municipalité de Saint-Wenceslas. Étude hydrogéologique*. Québec, Québec, 53 p.
- Consultants HGE. 1985. *Municipalité de Saint-Wenceslas. Recherche en eau souterraine : Phase III*. Québec, Québec, 63 p.
- Consultants HGE. 1985. *Étude hydrogéologique (réalisation de deux puits d'essai) à Sainte-Marie-de-Blandford*. Québec, Québec, 90 p.
- Cooper, H.H. et C.E. Jacob. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transaction, American Geophysical Union*, 27:526-34.
- Cook, P. G., C. Wood, T. White, C.T. Simmons, T. Fass et P. Brunner. 2008. Groundwater inflow to a shallow, poorly-mixed wetland estimated from a mass balance of radon. *Journal of Hydrology*, 354(1–4):213-226.
- Cook, P. G., S. Lamontagne, D. Berhane et J.F. Clark. 2006. Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers ^{222}Rn and SF_6 . *Water Resources Research*, 42(10):W10411.
- Cook, P.G., G. Favreau, J.C. Dighton et S. Tickell. 2003. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. *Journal of Hydrology*, 277:74–88.
- 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 en Sciences de la Terre, INRS-ETE, 311 p.
- Dessureault, R. 1976. *Aménagement d'un puits filtrant à Saint-Eulalie, comté de Nicolet*. Rapport rédigé par Services techniques en eau souterraine Inc. Dorval, Québec, 11 p.
- Dessureault, R. 1974. *Aménagement d'un puits filtrant à Saint-Eulalie comté de Nicolet*. Rapport rédigé par Services techniques en eau souterraine Inc. Dorval, Québec, 25 p.
- Dessureault, R. 1974. *Forages de reconnaissance à Saint-Célestin, comté de Nicolet*. Rapport rédigé par Services techniques en eau souterraine Inc., Dorval, Québec, 4 p.

- Dubé, J.C. 1971. *Géologie des dépôts meubles, région de Lyster*. 1:63 360 MRN, RP-596, Carte 1732.
- Eckhardt, K. 2005. How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrological Processes*, 19(2):507-515.
- Envir'eau. 2008. Municipalité de Fortierville. *Caractérisation hydrogéologique d'un ouvrage de captage d'eau souterraine*. Saint-Nicolas, Québec, 126 p.
- Ferlatte, M. 2011. *Quantification des flux d'eau souterraine dans la rivière Bécancour à partir des concentrations en ^{222}Rn , à l'aide du modèle Radin14*. Activité de synthèse, UQAM, département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère, 24 p.
- Filion, L. 1987. Holocene development of parabolic dunes in the central St. Lawrence Lowland, Québec. *Quaternary Research*, 28(2):196-209.
- Financière Agricole du Québec (FADQ). 2009. *Base de données des cultures assurées (BDCA)*. En ligne. < http://www.fadq.qc.ca/geomatique/professionnels_en_geomatique/base_de_donnees_de_cultures_assurees.html>.
- Fortin, V. et R. Turcotte. 2007. *Le modèle hydrologique MOHYSE*. Rapport de recherche, Environnement Canada, Ottawa, Ontario. 18 p.
- Fréchette LGL, 2006. *Municipalité de Laurierville. Alimentation en eau potable, rapport technique*. Thetford-Mines, Québec, 462 p.
- Gadd, N.R., 1978. *Surficial geology of Saint-Sylvestre map-area, Quebec*. Commission géologique du Canada, rapport 77-16.
- Gadd, N.R. 1971. *Pleistocene geology of the St. Lawrence with selected passage from an unpublished manuscript: The St. Lawrence Lowland by J.W. Goldthwaith*. Commission géologique du Canada, Mémoire 359, 153 p.
- Gadd, N.R., 1964. Moraines in the Appalachian region of Quebec. *Geological Society of America Bulletin*, 75:1249-1254.
- Gadd, N.R. 1960. *Surficial geology of the Bécancour map-area, Quebec (31108)*. Commission géologique du Canada, 59(8), 31 p.
- Gadd, N.R. 1955. *Pleistocene geology of the Bécancour map-area, Quebec*. Thèse de doctorat, Université de l'Illinois, Urbana, USA, 191 p.

- Gagné, S. Larocque, M. 2013. *3D groundwater modeling of the Bécancour Area*. Affiche présentée dans le cadre de la conférence GéoMontréal 2013. Montréal, Québec. 1 affiche.
- Gendron, P. 1978. *Étude hydrogéologique sur les lots No.26A-26B et partie du lot No.25 du rang 3 du Canton de Stanfold dans la municipalité de Saint-Rosaire d'Arthabaska*. Rapport rédigé par Gendron, Fafard et associés. Saint-Rosaire d'Arthabaska, Québec, 39p.
- Gleeson, T., K. Novakowski, P.G. Cook et T.K. Kyser. 2009. Constraining groundwater discharge in a large watershed: Integrated isotopic, hydraulic, and thermal data from the Canadian shield. *Water Resources Research*, 45(8).
- Globensky, Y. 1987. *Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent*. Rapport MM 85-02, Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Québec, 43 p.
- Godbout, P.M. 2013. *Géologie du Quaternaire et hydrostratigraphie sur les bassins de la zone Bécancour, Québec*. Mémoire de maîtrise en Sciences de la Terre, UQAM, 217 p.
- Godbout, P.M. 2012. *Validation empirique des conductivités hydrauliques obtenues à l'aide d'un perméamètre de Guelph sur les bassins versants de la zone Bécancour*. Rapport d'activité de synthèse dans le cadre de 2^e cycle. UQAM, 22 p.
- Godbout, P.M., M. Lamothe et M. Larocque. 2011a. *Hydrostratigraphy and Quaternary geology on the Bécancour area watersheds, Québec*. Comptes-rendus de conférence, colloque GéoHydro2011, août 2011, Québec, 7 p.
- Godbout, P.M., M. Lamothe, V. Horoi et O. Caron. 2011b. *Synthèse stratigraphique, cartographie des dépôts quaternaires et modèle hydrostratigraphique régional, secteur de Bécancour, Québec. Rapport final*. Montréal, Québec, 37 p.
- Godbout, P.M., S. Ouimet, G. Meyzonnat, S. Gagné, L. Tremblay, M. Larocque, M. Lamothe et D. Pinti. 2011c. *Quaternary geology and hydrogeology of the Bécancour area, Québec*. Livret-guide d'excursion, Colloque GéoHydro2011, août 2011, 73 p.
- Gouvernement du Québec. 2013. *Règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES), Loi sur la qualité de l'environnement. Q-2, r.6*. En ligne. <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R6.htm>.
- Gundersen, L.C.S. et R.B. Wanty (éditeurs). 1991. *Field studies of radon in rocks, soils, and water*. U.S. Geological Survey Bulletin 1971, 334 p.

- Grenier, C. 1986. *Levé hydrogéologique à Deschaillons MRC de Bécancour, division de recensement de Lotbinière*. Rapport No 1307, Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec, Direction des eaux souterraines et de consommation, Québec, Québec, 68 p.
- Groupe de travail national sur les terres humides (GTNTH). 1997. *Le système de classification des terres humides du Canada, 2e édition*. Édité par B.G. Warner et C.D.A. Rubec. Centre de recherche sur les terres humides, Université de Waterloo, Waterloo, Ontario, 68 p.
- Harbaugh A.W. 2005. *MODFLOW-2005: The U.S. Geological Survey modular ground-water model, the ground-water flow process. Book 6 : Modeling techniques, Section A. Ground-water*. 6-A16, Reston, Virginia, USA, 253 p.
- Hollocher, T.C. 1984. Source of oxygen atoms in nitrate in the oxidation of nitrite by Nitrobacter Agilis and evidence against a P-0-N anhydrite mechanism in oxidative phosphorylation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 233:721-727.
- Hvorslev, M.J. 1951. *Time lag and soilpermeability in groundwater observations*. U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, Bulletin 36, Vicksburg, Mississippi, USA, 50 p.
- INRS-ETE et CGC. 2012. *Protocole pour la préparation du Livrable 22 - Vulnérabilité de l'aquifère de roc régional. Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec*. Québec, Québec, 18 p.
- International Safety Research Inc. (ISR). 2003. *Qualité des eaux souterraines dans l'environnement de la centrale nucléaire de Gentilly-2 (modélisation de l'impact de contaminations)*. Rapport ISR R1115-04 Version1.0, Rapport soumis à Hydro-Québec Production, Ottawa, Ontario, 32 p.
- James, M. 1982. *Aménagement d'un nouveau puits*. Rapport rédigé par Hydroconsultant Ltée. Sainte-Foy, Québec, 62 p.
- Jolicoeur, M. 1987. *Rapport d'étude hydrogéologique. Phiga Inc. Sainte-Marie de Blandford. Saint-Augustin de Mirabel, Québec, 61 p.*
- Laboratoire de matériaux de Québec. 1996. *Réseau d'alimentation et de distribution en eau potable Sainte-Marie-de-Blandford*. Shawinigan, Québec, 58 p.
- Laforest. 2003. *Recherche en eau souterraine, phase 1. Fortierville*. Cap-Rouge, Québec, 32 p.

- Lamothe M. et G. Allard. 2009. *Inventaire, analyse et bilan des travaux cartographiques de la couverture quaternaire du Québec municipalisé*. Montréal, Québec, 116 p.
- Lamothe, M. 1985. *Lithostratigraphy and geochronology of the Quaternary deposits of the Pierreville and St. Pierre les Becquets areas, Quebec*. Thèse de doctorat, Université de Western Ontario, London, Ontario, 227 p.
- Larocque, M., K. Avar, S. Pellerin, L. Tremblay et M. Ferlatte. 2012. *Peatland hydrogeological function at the regional scale*. Poster présenté à la rencontre annuelle de l'American Geophysical Union, San Francisco, 3-7 décembre 2012.
- Larocque, M., Gagné, S., Tremblay L. 2010. *Caractérisation hydrogéologique de la zone Bécancour. Rapport PHASE I Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du Québec*. Rapport remis au MDDEFP. Montréal, Québec. 72 p.
- Lavigne M.A. 2006. *Modélisation numérique de l'écoulement régional de l'eau souterraine dans le bassin versant de la rivière Châteauquay*. Mémoire de maîtrise en Sciences de la Terre, INRS-ETE, 98 p.
- Lortie, G., 1976. *Les écoulements glaciaires wisconsinien dans les Cantons de l'Est et de la Beauce, Québec*. Mémoire de maîtrise, Université McGill, Montréal, Québec, 219 p.
- Mailhot, M. 1980. *Expertise du puits à drain horizontal de Manseau*. Rapport rédigé par Tek Eau Inc. Victoriaville, Québec, 28 p.
- McCormack, R. 1984. *Étude hydrogéologique sur une partie de la rive sud du Saint-Laurent*. Service des eaux souterraines, Québec, 162 p.
- McCormack, R. 1979. *Étude hydrogéologique bassin versant de la Saint-François*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Québec, Québec, 73 p.
- MDDEFP. 2013a. *Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec*. En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/piezo/>>.
- MDDEFP. 2013b. *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines*. En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/acquisition-connaissance.htm>>.
- MDDEFP. 2012. *Réseaux municipaux de distribution d'eau potable*. En ligne. <<http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution/resultats.asp>>.

- Meyzonnat, G., M. Larocque et S. Gagné. 2013. *Development of a tool for the estimation of spatially distributed recharge - Application to the Bécancour watershed (Centre-du-Québec)*. Résumé présenté au colloque GéoMontréal2013, septembre 2013, Montréal, Québec.
- Meyzonnat, G. 2012. *Estimation de la vulnérabilité de l'aquifère au roc de la zone Bécancour (Centre-du-Québec)*. Mémoire de maîtrise en sciences de la Terre, UQAM, 129 p.
- Meyzonnat, G. et M. Larocque. 2011. *Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec)*. Comptes-rendus de conférence, colloque GéoHydro2011, août 2011, Québec, 7 p.
- J.E. Nash, J.V. Sutcliffe, *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*, Journal of Hydrology, Volume 10, Issue 3, April 1970, Pages 282-290.
- Nastev, M., M.M. Savard, P. Lapcevic, R. Lefebvre et R. Martel. 2004. Hydraulic properties and scale effects investigation in regional rock aquifers, south-western. Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal* 12(3):257-269.
- Ouimet, S., M.Lamothe et M. Barré. 2011. An IRSL investigation of Early Holocene Lake Lampsilis sediments, St. Lawrence Lowlands, Québec. *Quaternary Geochronology*, LED 2011 special issue.
- Paré, D. 1981a. *Étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Bécancour*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement, Québec, Québec, 80 p.
- Paré, D. 1981b. *Étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Nicolet*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement, Québec, Québec, 114 p.
- Paré, D. 1972. *Levé hydrogéologique dans la région de Sainte-Anastasia de Lyster, comté de Mégantic*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles. Saint-Anastasia de Lyster, Québec, 24 p.
- Parent, M. 1987. *Late Pleistocene stratigraphy and events in the Asbestos-Valcourt region, Southeastern Québec*. Thèse de doctorat, Université Western Ontario, London, Ontario, 320 p.
- Pelletier, M. 2010. *Étude géophysique par résistivité 2D, bassin versant de la rivière Bécancour*. Activité de synthèse I – STM5000, département des Sciences de la Terre, UQAM, 17 p.

- Poirier, C. 2012. *Estimation préliminaire des débits de base à des sites de stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Contribution au Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Présentation power point faite aux équipes PACES, 2012-10-30. Données numériques identifiées sous la version beta_v2 2012-10-02, déposés sur le site ftp du PACES.*
- Poirier, C., T.C. Fortier Filion, R. Turcotte et P. Lacombe. 2012. *Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 – version 2012. Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Rapport rédigé par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, Québec, Québec, 112 p.*
- Prévôt, J. M. 1972. *Carte hydrogéologique des basses-terres du St-Laurent.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Québec, Québec, 1 carte.
- Rochette, F. 1978. *Étude hydrogéologique complémentaire sur le terrain de monsieur Jacques Gaudreau. L.* Rapport rédigé par Leroux, Nantel, Papin et Associés. Saint-Rosaire d'Arthabaska, Québec, 16 p.
- Roy, R. 1965. *Levé hydrogéologique à Daveluyville, comté d'Arthabaska.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles. Québec, Québec, 13p.
- Saby, M. G. Vautour, É. Roulleau, D. Pinti, M. Larocque et C. Castro. 2013. *Dating shallow groundwater using $^3\text{H}/^3\text{He}$ method on the Bécancour river basin (Québec, Canada).* Résumé présenté au colloque GéoMontréal2013, septembre 2013, Montréal, Québec.
- Santos, I. R. et B.D. Eyre. 2011. Radon tracing of groundwater discharge into an Australian estuary surrounded by coastal acid sulphate soils. *Journal of Hydrology*, 396(3):246-257.
- Schmidt A. et M. Schubert. 2007. Using radon-222 for tracing groundwater discharge into an open-pit lignite mining lake – a case study, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 43(4):387-400.
- Services techniques en eau souterraine Inc. 1976. *Étude hydrogéologique de la région de Deschaillons.* Dorval, Québec, 15 p.
- Simard, G. et R. Desrosiers. 1979. *Qualité des eaux souterraines du Québec.* Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Québec, Québec, 171 p.

- Slivitzky A., Saint-Julien P. 1987. Compilation géologique de la région Estrie-Beauce. Rapport MM85-04, Ministère des Ressources naturelles. Québec, Québec. 51 p.
- Stellato L., E. Petrella, F. Terrasi, P. Belloni, M. Belli, U. Sansone et F. Celico. 2008. Some limitations in using ^{222}Rn to assess river-groundwater interactions: the case of Castel diSangro alluvial plain (central Italy). *Hydrogeology Journal*, 16:701-712.
- St-Julien, P. et C. Hubert. 1975. Evolution of the Taconian Orogen in the Quebec Appalachians. *American Journal of Science*, 274-A:337-362.
- Technorem. 2004a. *Municipalité de Laurierville. Détermination de l'aire d'alimentation et des aires de protection bactériologiques et virologiques des ouvrages de captage d'eau souterraine de Laurierville*. Laval, Québec, 73 p.
- Technorem. 2004b. *Municipalité de Villeroy. Détermination de l'aire d'alimentation et des aires de protection bactériologiques et virologiques du puits de captage d'eau souterraine de Villeroy*. Laval, Québec, 118 p.
- Technorem. 2003. *Détermination de l'aire d'alimentation et des aires de protection bactériologique et virologique du champ de captage d'eau souterraine à Lyster*. Laval, Québec, 123 p.
- TekEau. 1980. *Municipalité de Manseau. Aménagement d'un puits et essai de pompage*. Victoriaville, Québec, 28p.
- Theis, C.V. 1963. *Estimating the transmissivity of a water table aquifer from the specific capacity of a well*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1536-I:332-36.
- Theis, C.V., 1940. *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*, American Geophysical Union Trans., vol. 16, pp. 519-524.
- Tremblay, J.J. 1975. *Puits d'essai et épreuve de pompage à Saint-Pierre Baptiste*. Rapport rédigé par Services techniques en eau souterraine Inc., Dorval, Québec, 25 p.
- Tremblay, J. J., 1964. *Levé hydrogéologique à Laurierville, comté de Mégantic*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources Naturelles, Québec, Québec, 11 p.
- Vautour, G., G. Meyzonnat, D.L Pinti, M.C. Castro, F. Barbecot, M. Larocque et C.M. Hall. 2011. Dating and tracing groundwater resources in central Québec with noble gases, ^{14}C and water chemistry. Poster présenté à la rencontre annuelle de l'American Geophysical Union, San Francisco, 5-9 décembre 2011.

Verstraeten, LM., G.S. Fetterman, M. T. Meyer, T. Bullen, et S. K. Sebree. 2005. Use of tracers and isotopes to evaluate vulnerability of water in domestic wells to septic waste. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 25(2):107-117.

Williams, H. 1979. Appalachian Orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 16: 92-807.