

Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François

RAPPORT FINAL

**Marie Larocque
Sylvain Gagné
Diogo Barnetche
Guillaume Meyzonnat
Marie-Hélène Graveline
Marie-Audray Ouellet**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère

31 mars 2015

Équipe de réalisation

Hydrogéologie

Marie Larocque	Coordonnatrice du projet, hydrogéologue, professeure, UQAM
Sylvain Gagné	Agent de recherche, UQAM
Diogo Barnatche	Agent de recherche, UQAM
Guillaume Meyzonnat	Agent de recherche, UQAM
Marie-Hélène Graveline	Agente de recherche, UQAM
Marie-Audray Ouellet	Agente de recherche, UQAM

Collaborateurs

Florent Barbecot	Hydrogéochimiste, professeur, UQAM
Goze Bertin Béné	Géomaticien, professeur, U. Sherbrooke
Hubert Cabana	Ingénieur, professeur, U. Sherbrooke
Michel Lamothe	Géologue quaternariste, professeur, UQAM
Daniele Pinti	Spécialiste des gaz rares, professeur, UQAM
Martin Roy	Géologue quaternariste, professeur, UQAM
Alain Tremblay	Géologue structural, professeur, UQAM

Étudiants MSc et PhD

Olivier Ferland, Floriane Moreira et Marion Saby, MSc Sciences de la Terre, UQAM
Marc-André Bourgault et Pauline Méjean, PhD Sciences de la Terre et de l'atmosphère, UQAM

Stagiaires BSc Sciences de la Terre et de l'atmosphère

Éric Fillion, Maëlle Géry, Luc Richard, Cynthia Leduc, Steven St-Aubin et Marjolaine Roux

Support logistique

Frédéric Toupin	Informaticien, UQAM
Michelle Laithier	Dessinatrice, UQAM
Denise Fontaine	Technicienne de laboratoire, UQAM

Partenaires régionaux au projet

Organisme de bassin versant COGESAF
Organisme de bassin versant COPENIC
Agence de géomatique du centre du Québec
Conférence régionale des élus du Centre-du-Québec
Conférence régionale des élus de l'Estrie
Conférence régionale des élus des Appalaches
MRC d'Acton, des Appalaches, d'Arthabaska, de Bécancour, de Drummond, du Haut-Saint-François, de L'Érable, de Nicolet-Yamaska, de Pierre-de-Saurel, des Sources et du Val-Saint-François

Référence à citer

Larocque, M., Gagné, S., Barnette, D., Meyzonnat, G, Graveline, M. H. et Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport déposé au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 258 p.

AVANT-PROPOS

Ce rapport est le résultat de trois années de travail de caractérisation des eaux souterraines dans la Zone de gestion intégrée de l'eau Nicolet et sur la partie de la Zone de gestion intégrée de l'eau Saint-François incluse dans la région Centre-du-Québec. Ce projet a été financé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines (PACES) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), avec la contribution en argent et/ou en nature de plusieurs partenaires régionaux. Ces derniers sont les organismes de bassin versant COGESAF (rivière Saint-François) et COPERNIC (rivière Nicolet), l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec, les Conférence régionale des élus (CRÉ) Centre-du-Québec, Estrie et Chaudière-Appalaches, les Municipalités régionales de comté (MRC) d'Arthabaska, de Drummond, de l'Érable, du Haut Saint-François (Dudswell), de Nicolet-Yamaska, de Pierre-de-Sorel, des Sources et de Val-Saint-François. 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 doctorat et 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.

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 Nicolet et de la partie basse de la rivière Saint-François* financé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissance des eaux souterraines (PACES) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), avec la contribution en argent et/ou en nature de plusieurs partenaires régionaux, avait pour but d'établir la cartographie hydrogéologique de la Zone de gestion intégrée de l'eau Nicolet et de la partie de la Zone de gestion intégrée de l'eau Saint-François incluse dans la région Centre-du-Québec (superficie totale 4584 km²). Ce projet a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal en collaboration avec les partenaires régionaux suivants: les organismes de bassin versant COGESAF (rivière Saint-François) et COPERNIC (rivière Nicolet), les CRÉ Centre-du-Québec, Estrie et Chaudière-Appalaches, les MRC d'Arthabaska, de Drummond, de l'Érable, du Haut Saint-François (Dudswell), de Nicolet-Yamaska, de Pierre-de-Sorel, des Sources, et de Val-Saint-François, l'Agence de Géomatique du Centre-du-Québec (AGTCQ) et l'Université de Sherbrooke. Les résultats de cette étude montrent que l'aquifère rocheux est dans l'ensemble peu productif bien que les formations géologiques du Bourret et de Saint-Victor puissent fournir des débits importants. Les principaux aquifères granulaires sont constitués par les dépôts fluvio-glaciaires de l'esker Asbestos-Tingwick et par les dépôts quaternaires anciens du secteur aval de la zone d'étude. 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 152 mm/an. Les volumes d'eau souterraine utilisés par les particuliers, les villes, l'agriculture et l'industrie représentent environ 3 % de la recharge de l'aquifère fracturé. Une très faible proportion de la recharge (<1 %) 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 baryum, l'arsenic et le fluor, seraient d'origine naturelle. Les problématiques identifiées concernent certains critères esthétiques et notamment les concentrations en manganèse. Un seul dépassement de la norme pour l'eau potable a été observé pour les nitrates. Elles atteignent toutefois, dans la partie amont de la zone d'étude, des concentrations telles qu'elles peuvent être associées à une source anthropique. L'analyse bactériologique a montré qu'environ 45 % des puits échantillonnés avaient au moins un dépassement de norme. Des pesticides, de la caféine et des produits pharmaceutiques et de soins personnels ont été détectés dans l'eau souterraine. Ces données indiquent qu'il existe un signal anthropique provenant des eaux usées. Les secteurs où l'aquifère rocheux est le plus vulnérable à une contamination provenant de la surface sont situés dans les Appalaches, aux endroits où les dépôts meubles sont minces et en contact direct avec le roc et où la recharge est élevée. 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 du bassin versant la rivière Nicolet et de la partie basse du bassin versant de la rivière Saint-François.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	V
RÉSUMÉ	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES CARTES	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES TABLEAUX.....	XVI
LISTE DES ANNEXES.....	XVIII
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte de réalisation du projet et objectifs	1
1.2 Équipe de réalisation et partenaires	2
1.2.1 Équipe de réalisation	2
1.2.2 Partenaires	2
1.3 Organisation du rapport.....	4
2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	5
2.1 Localisation	5
2.2 Milieu naturel.....	6
2.2.1 Topographie et modèle numérique altimétrique	6
2.2.2 Pente du sol.....	6
2.2.3 Hydrographie et limites des bassins	15
2.2.4 Couverture végétale	21
2.2.5 Milieux humides	27
2.2.6 Pédologie.....	28
2.2.7 Réseau de surveillance et programme de suivi.....	33
2.3 Population, centres urbains et activités	39
2.3.1 Municipalités	39
2.3.2 Occupation du sol	41
2.3.3 Affectation du territoire.....	41
3 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION	47
3.1 Compilation de l'information existante.....	47

3.2	Travaux de caractérisation.....	49
3.2.1	Cartographie géologique.....	49
3.2.2	Géophysique.....	50
3.2.3	Sondages et forages.....	51
3.2.4	Essais hydrauliques sur les puits.....	53
3.2.5	Mesure des niveaux piézométriques	54
3.2.6	Échantillonnage d'eau.....	55
3.2.7	Caractérisation de contextes hydrogéologiques types	60
3.2.8	Mesure des débits de base en période d'étiage	60
3.3	Saisie, validation et archivage des données	63
3.3.1	Inventaire des données (sources et types)	63
3.3.2	Protocoles de saisie, d'archivage et de validation	63
4	CONTEXTES HYDROGÉOLOGIQUES RÉGIONAUX.....	64
4.1	Géologie du socle rocheux	64
4.1.1	Contexte général.....	64
4.1.2	Stratigraphie et lithologies.....	64
4.1.3	Géologie, structure et fracturation.....	68
4.2	Géologie du Quaternaire	73
4.2.1	Histoire du Quaternaire	73
4.2.2	Stratigraphie des dépôts meubles	75
4.2.3	Couverture de dépôts meubles.....	75
4.2.4	Architecture des sédiments.....	83
4.3	Conditions de confinement.....	100
4.4	Contextes hydrogéologiques.....	101
5	CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES	107
5.1	Propriétés hydrauliques	107
5.1.1	Essais hydrauliques	107
5.1.2	Estimation de la conductivité hydraulique de l'aquifère fracturé à partir de la capacité spécifique.....	114
5.2	Piézométrie et écoulement.....	118
5.3	Recharge.....	123
5.3.1	Débits de base mesurés et obtenus par séparation des hydrogrammes.....	123
5.3.2	Recharge par bassin versant simulée avec MOHYSE	125
5.3.3	Recharge spatialisée simulée par bilan hydrique spatialisé	129
5.3.4	Zones de recharge préférentielle et de résurgence	130

5.4	Bilan hydrique régional	133
5.5	Vulnérabilité des nappes.....	135
5.6	Géochimie de l'eau souterraine.....	141
5.6.1	Isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O).....	147
5.6.2	Isotopes stables des nitrates (^{18}O et ^{15}N)	148
5.6.3	Radon (^{222}Rn)	149
5.6.4	Géochimie des roches	155
5.6.5	Datation et traçage isotopique	155
5.7	Contextes hydrogéologiques régionaux	158
6	PROJETS PARTICULIERS	167
6.1	Fonctions hydrogéologiques des milieux humides	167
6.1.1	Caractérisation des fonctions hydriques et biologiques des complexes tourbeux	167
6.1.2	Contexte hydrogéomorphologie des complexes tourbeux.....	172
6.1.3	Poursuite des travaux	173
6.2	Modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale.....	175
6.2.1	Résultats.....	178
6.3	Modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle locale	180
6.3.1	Résultats.....	183
6.3.2	Poursuite des travaux	185
7	RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE	187
7.1	Usage de la ressource	187
7.2	Qualité de la ressource	197
7.2.1	Normes de potabilité.....	197
7.2.2	Objectifs esthétiques	207
7.2.3	Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)	211
7.3	Densité des activités anthropiques.....	217
7.4	Gestion durable de la ressource	223
7.4.1	Principes de gestion durable	223
7.4.2	Indicateurs de quantité	224
7.4.3	Indicateurs de qualité.....	226
8	RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS.....	227
8.1	Recommandations.....	227

8.1.1	Recommandations en lien avec la ressource en eau	227
8.1.2	Recommandations sur la réalisation des travaux PACES	228
8.2	Conclusions scientifiques.....	229
RÉFÉRENCES		233

LISTE DES CARTES

Carte 1 Routes, limites municipales et toponymie.....	7
Carte 2 Topographie.....	9
Carte 3 Modèle numérique altimétrique.....	11
Carte 4 Pente du sol.....	13
Carte 5 Hydrographie	17
Carte 6 Limites des bassins versants	19
Carte 7 Couverture végétale – peuplements forestiers	23
Carte 8 Couverture végétale – agriculture.....	25
Carte 9 Milieux humides	29
Carte 10 Pédologie.....	31
Carte 11 Réseau de suivi météorologique, hydrologique et piézométrique	37
Carte 12 Occupation du sol	43
Carte 13 Affectation du territoire.....	45
Carte 14 Localisation de tous les travaux de caractérisation réalisés dans le projet PACES-NSF	61
Carte 15 Géologie du roc.....	69
Carte 16 Géologie du Quaternaire.....	77
Carte 17 Épaisseur des dépôts meubles.....	87
Carte 18 Topographie du roc.....	89
Carte 19 Indice de confinement.....	103
Carte 20 Contextes hydrogéologiques	105
Carte 21 Piézométrie dans le roc	121
Carte 22 Zones préférentielles de recharge et de résurgences	131
Carte 23 Indice DRASTIC de l'aquifère au roc.....	139
Carte 24 Types d'eau pour l'aquifère au roc.....	145
Carte 25 Activités du ²²² Rn dans les eaux souterraines et les eaux de surface	153
Carte 26 Approvisionnements municipaux	191
Carte 27 Consommation d'eau par type de source	193
Carte 28 Consommation d'eau par type d'utilisation	195
Carte 29 Qualité de l'eau souterraine - Critères de potabilité - Éléments inorganiques ..	201
Carte 30 Qualité de l'eau souterraine - Critères de potabilité - Nitrates	203
Carte 31 Qualité de l'eau souterraine - Critères de potabilité - Bactériologie.....	205
Carte 32 Qualité de l'eau souterraine - Critères esthétiques.....	209
Carte 33 Qualité de l'eau souterraine - Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels PPSP)	215
Carte 34 Densité des activités anthropiques	219
Carte 35 Densité des activités agricoles.....	221

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Pourcentage des différents types de peuplements forestiers	21
Figure 2 Pourcentage des différents types de cultures.....	22
Figure 3 Pourcentage des différents types de milieux humides	27
Figure 4 Pourcentage des différents types d'occupation du sol	41
Figure 5 Pourcentage des différents types d'affectation du territoire.....	42
Figure 6 Coupe sismique montrant les différentes structures des formations géologiques de la zone d'étude (haut) et localisation de la coupe (bas) (modifiée de Castonguay et al., 2006).....	71
Figure 7 Localisation des coupes stratigraphiques.....	91
Figure 8 Coupe hydrostratigraphique A-A'.....	95
Figure 9 Coupe hydrostratigraphique B-B'.....	97
Figure 10 Coupe hydrostratigraphique C-C'.....	97
Figure 11 Coupe hydrostratigraphique D-D'.....	98
Figure 12 Coupe hydrostratigraphique Z1.....	99
Figure 13 Coupe hydrostratigraphique Z2.....	99
Figure 14 Coupe hydrostratigraphique Z3.....	100
Figure 15 Comparaison des données de remontée pour trois puits. L'axe Y représente le rapport entre le niveau mesuré et le niveau statique avant le début de l'essai.	110
Figure 16 Comparaison des trois essais à charge variable au puits NSF-R4.....	111
Figure 17 Comparaison des trois essais à charge variable au puits NSF-R8.....	111
Figure 18 Comparaison des essais à charge variable au piézomètre PZ1	112
Figure 19 Distribution des conductivités hydrauliques estimées à partir de la capacité spécifique.....	115
Figure 20 Séries temporelles des niveaux piézométriques dans quatre forages	119
Figure 21 Mesure de débit en étiage	124
Figure 22 Débits modélisés pour la station 30101 – année 1988.....	126
Figure 23 Débits modélisés pour la station 30103 – année 2010.....	127
Figure 24 Flux annuels moyens simulés par MOHYSE sur le bassin 30103 entre 1985 et 2013	128
Figure 25 Recharges mensuelles moyennes obtenues par HydroBilan (moyenne 1989-2009).....	129
Figure 26 Bilan hydrique de la zone d'étude.....	134
Figure 27 Évolution temporelle des flux moyens du bilan hydrique	134
Figure 28 Superficie des classes de vulnérabilité DRASTIC au roc	135
Figure 29 Diagramme de Piper pour les eaux souterraines dans la zone d'étude	142
Figure 30 Relation Na^+/Cl^- dans les eaux souterraines au roc.....	143
Figure 31 Composition isotopique de l'eau dans la zone d'étude.....	147
Figure 32 Isotopes des nitrates sur la zone d'étude	148
Figure 33 Activité en ^{222}Rn a) Appalaches, b) Basses-terres du Saint-Laurent c) Eaux de surface	150
Figure 34 ^{222}Rn et débits mesurés sur le bras amont de la rivière Nicolet le 5 août 2013.	151

Figure 35 Comparaison de l'activité du ^{14}C et du ^3H	156
Figure 36 Datation SF_6 et $^3\text{H}/^3\text{He}$ en fonction de la recharge	157
Figure 37 Schémas des contextes hydrogéologiques	163
Figure 38 Zoom sur le schéma du contexte régional; zone centrale	165
Figure 39 Zones instrumentées à l'aide de piézomètres et l'emplacement des mesures de niveau statique réalisées à l'intérieur (points noirs) et à l'extérieur du complexe tourbeux (points bleus)	168
Figure 40. Pointage OWES pour la fonction biologique (119-185 points) des différents complexes tourbeux (1-7)	169
Figure 41. Pointage WESP pour la fonction amélioration de la qualité de l'eau	171
Figure 42. Pointage WESP pour la fonction capacité d'emmagasinement des milieux humides.	171
Figure 43. Zones instrumentées à l'aide de piézomètres et l'emplacement des mesures de niveau statique réalisées à l'intérieur (points noirs) et à l'extérieur du complexe tourbeux (points bleus)	174
Figure 44 Maillage du modèle	177
Figure 45 Conditions limites du modèle	177
Figure 46 Comparaison des charges hydrauliques mesurées et modélisées	178
Figure 48 Conditions limites pour les zones 1, 2 et 3	182
Figure 49 Niveaux mesurés vs. simulés pour les zones 1, 2 et 3	184

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Équipe de réalisation du projet PACES-Nicolet-Bas-Saint-François	3
Tableau 2 Organismes ayant appuyé le projet PACES-Nicolet-Bas-Saint-François	4
Tableau 3 Informations sur les stations hydrométriques	33
Tableau 4 Informations sur les stations météorologiques.....	34
Tableau 5 Informations sur les stations piézométriques	35
Tableau 6 Populations et superficies par municipalités et par MRC.....	39
Tableau 7 Sources d'information disponibles pour la réalisation du projet.....	48
Tableau 8 Résumé des travaux de caractérisation.....	50
Tableau 9 Détails de construction des forages	52
Tableau 10 Détails de construction des piézomètres dans les dépôts meubles et des sondages CPT et RPSS	53
Tableau 11 Paramètres chimiques analysés	56
Tableau 12 Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels analysés	57
Tableau 13 Synthèse des informations intégrées à la base de données	63
Tableau 14 Stratigraphie des unités géologiques.....	67
Tableau 15 Stratigraphie des dépôts meubles	76
Tableau 16 Synthèse des propriétés hydrauliques obtenues par essai de pompage et essais à charge variable	113
Tableau 17 Conductivités hydrauliques obtenues au moyen des essais avec obturateurs	114
Tableau 18 Conductivité hydraulique moyenne selon la lithologie du roc, tel qu'estimé à l'aide de la capacité spécifique	116
Tableau 19 Résultats de l'analyse ANOVA selon la géologie du roc	117
Tableau 20 Stations de mesure de débit en période d'étiage.....	123
Tableau 21 Statistiques sur les débits de base fournis par le CEHQ 1985-2010	124
Tableau 22 Bilan hydrique simulé avec le modèle MOHYSE	127
Tableau 23 Indices DRASTIC pour différents aquifères granulaires	137
Tableau 24 Géochimie des roches	155
Tableau 25 Contexte hydrostratigraphique des complexes tourbeux étudiés sur la zone Nicolet/Bas Saint-François.....	173
Tableau 26 Bilan hydrologique du modèle.....	179
Tableau 27 Propriétés hydraulique du modèle hydrogéologique régionale.....	179
Tableau 28 Conductivités hydrauliques provenant du régime permanent pour les trois zones	181
Tableau 29 Consommation d'eau par type d'utilisation pour les MRC de la zone d'étude	188
Tableau 30 Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine	189
Tableau 31 Sommaire des dépassements de normes*, **	197
Tableau 32 Dépassements de niveau bactériologique	199
Tableau 33 Sommaire des dépassements esthétiques*, **	207
Tableau 34 Détections d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2013 - Résumé.....	211

Tableau 35 Détections d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2014 - Résumé	211
Tableau 36 Détection de pesticides en 2013 et 2014.....	212
Tableau 37 Détections de PPSP en 2013 et 2014 - Résumé.....	213

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Protocole du calcul de la pente
Annexe 2	Protocole pour la préparation du livrable pédologie
Annexe 3	Publications liées au projet PACES Nicolet-Bas-Saint-François
Annexe 4	Photos terrain
Annexe 5	Levés géophysiques
Annexe 6	Logs de forages, de piézomètres et de sondages stratigraphiques
Annexe 7	Synthèse des propriétés hydrauliques obtenues par essai de pompage et essais à charge variable
Annexe 8	Protocole de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine
Annexe 9	Estimation de l'épaisseur des dépôts meubles et de la topographie du roc
Annexe 10	Tableau des propriétés hydrauliques
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	Application de la méthode DRASTIC sur la zone Nicolet-Bas-Saint-François
Annexe 15	Évaluation des fonctions hydriques et biologiques de complexes tourbeux à l'échelle régionale
Annexe 16	Protocole pour la préparation du livrable utilisation de l'eau
Annexe 17	Protocole de production des livrables qualité de l'eau et objectifs esthétiques
Annexe 18	Protocole de calcul pour l'indice de densité des activités anthropiques
Annexe 19	Mise au point du Système de cartographie dynamique multiéchelle (SCDM) pour la caractérisation des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François

* Les annexes sont présentées dans des documents distincts.

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de réalisation du projet et objectifs

Le Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François financé dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines (PACES) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) avait pour but d'établir la cartographie hydrogéologique du bassin versant de la rivière Nicolet et de la partie basse du bassin de la rivière Saint-François (superficie totale 4 585 km²). Ce projet a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal, qui en est le maître d'œuvre, et par un ensemble de partenaires régionaux. Le projet Nicolet-Bas-Saint-François avec la collaboration scientifique particulière de Goze Bertin Béné et Hubert Cabana de l'Université de Sherbrooke.

Ce rapport final résume les activités réalisées au cours des trois phases de réalisation du projet qui se sont déroulées du 1er avril 2012 au 31 mars 2015 : 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 de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François;
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;
5. estimer la pérennité de la ressource en eau souterraine selon son taux de renouvellement naturel et en fonction des prélèvements anthropiques
6. 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 de ce projet. 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. Cinq agents de recherche ont été impliqués dans le Projet entre 2013 et 2015, Sylvain Gagné, Marie-Hélène Graveline, Diogo Barnetche, Guillaume Meyzonnat et Marie-Audray Ouellet (certains à temps partiel, certains pour une courte période seulement). Les professeurs Goze Bertin Béné (département de géographie) et Hubert Cabana (département de génie civil) de l'Université de Sherbrooke sont également impliqués dans les volets géomatique et chimie de l'eau. Plusieurs professeurs de l'UQAM ont participé au projet en tant que collaborateurs : Florent Barbecot, Michel Lamothe, Daniele Pinti, Martin Roy et Alain Tremblay. Le projet a bénéficié de la mise en commun des expertises, des ressources techniques et des protocoles des membres chercheurs du Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES).

Pauline Méjean et Marc-André Bourgault ont été impliqués dans le projet dans le cadre d'un PhD en sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM. Le projet de Pauline Méjean porte sur la caractérisation des écoulements et des temps de résidence de l'eau souterraine des systèmes aquifères des Basses-Terres du Saint-Laurent en utilisant la géochimie des gaz rares et les isotopes de l'uranium. Le projet de Marc-André Bourgault traite des fonctions hydrologiques des complexes tourbeux. Trois étudiants de maîtrise ont travaillé directement dans le cadre de maîtrises en sciences de la Terre de l'UQAM. La recherche de Marion Saby a porté sur la géochimie et les traceurs naturels des eaux souterraines. Celle de Floriane Moreira a permis d'étudier le traçage des échanges entre eaux de surface et eaux souterraines sur la rivière à la Nicolet à l'aide du ^{222}Rn et de l'argon. Le projet de maîtrise d'Olivier Ferland a porté sur l'étude des écoulements souterrains locaux dans trois contextes géologiques contrastés de la zone d'étude. Quatre étudiants du BSc en sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM se sont joints à l'équipe au cours des étés 2013 et 2014: Éric Fillion, Maëlle Géry, Luc Richard, Cynthia Leduc, Steven St-Aubin et Marjolaine Roux.

1.2.2 *Partenaires*

Les partenaires du projet sont présentés dans le **tableau 2** sont les organismes de bassin versant (OBV) COGESAF et COPENIC et l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec (AGTCQ). La Conférence régionale des élus (CRÉ) du Centre-du-Québec, qui couvre presque tout le territoire étudié, est un partenaire financier important, de même que les Municipalités régionales de comté (MRC) d'Acton, des Appalaches, d'Arthabaska, de Bécancour, de Drummond, de l'Érable, du Haut Saint-François, de Nicolet-Yamaska, de Pierre-de-Saurel, les Sources et de Val Saint-François qui sont des partenaires financiers.

Le comité de suivi du projet est formé de représentants des partenaires régionaux (OBV, AGTCQ, CRÉ et MRC) et a pour mandat d'assurer le lien entre les partenaires régionaux et l'équipe de réalisation du projet. Le comité de suivis s'est réuni à deux reprises soit le 18 avril 2013 et le 23 avril 2014.

Une journée d'atelier de formation sur les notions de base sur les eaux souterraines et les livrables du PACES-Nicolet-Bas Saint-François a été organisée le 8 décembre 2014 à la Place 2413 à Victoriaville. Trente-quatre personnes provenant du MDDELCC, des MRC, des municipalités et des OBV ont participé à cet événement.

Tableau 1 Équipe de réalisation du projet PACES-Nicolet-Bas-Saint-François

Noms	Rôle
Marie Larocque	Coordonnatrice du projet; professeure UQAM
Florent Barbecot	Hydrogéochimie; professeur UQAM
Goze Bertin Béné	Analyse données spatiales; professeur U. Sherbrooke
Hubert Cabana	Analyse des pesticides; professeur U. Sherbrooke
Michel Lamothe	Géologie du Quaternaire; professeur UQAM
Daniele Pinti	Traçage des eaux souterraines; professeur UQAM
Martin Roy	Géologie du Quaternaire; professeur UQAM
Alain Tremblay	Géologie structurale; professeur UQAM
Sylvain Gagné	Hydrogéologie; agent de recherche UQAM
Diogo Barnetche	Hydrogéologie; agent de recherche UQAM
Marie-Hélène Graveline	Géomatique; agente de recherche UQAM
Guillaume Meyzonnat	Hydrogéologie; agent de recherche UQAM
Marie-Audray Ouellet	Géomatique; agente de recherche UQAM
Olivier Ferland Floriane Moreira Marion Saby	Hydrostratigraphie (OF), ²²² Rn et interactions nappe-rivière (FM) et hydrogéochimie (MS); étudiants à la maîtrise en sciences de la Terre de l'UQAM
Marc-André Bourgault Pauline Méjean	Milieus humides (MAB), temps de résidence des eaux souterraines (PM); étudiants au doctorat en sciences de la Terre de l'UQAM
Éric Fillion, Maëlle Géry, Luc Richard, Cynthia Leduc, Steven St-Aubin, Marjolaine Roux	Support aux activités de terrain et d'analyse des résultats, étudiants de BSc en Géologie (UQAM)

Tableau 2 Organismes ayant appuyé le projet PACES-Nicolet-Bas-Saint-François

Organisme	Participant au comité de suivi	Contribution
CRÉ Centre-du-Québec	Michel Côté	Argent et nature (temps-personne)
MRC d'Arthabaska	Pascale Désilet	Argent et nature (temps-personne)
MRC de l'Érable	Carl Plante	Argent et nature (temps-personne)
MRC de Drummond	Lucien Lampron	Argent et nature (temps-personne)
MRC de Nicolet-Yamaska	Jean-François Albert	Argent et nature (temps-personne)
MRC des Sources	Frédéric Marcotte	Argent et nature (temps-personne)
COPERNIC	Karine Dauphin	Nature (temps-personne)
COGESAF	Julie Grenier	Nature (temps-personne)
AGTCQ	Olga Dupont, coordonnatrice	Nature (temps-personne)

1.3 Organisation du rapport

Ce rapport présente tous les résultats obtenus au cours du projet PACES-Nicolet-Saint-François. Afin de présenter 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 projets particuliers, et entre eux les fonctions hydrogéologiques des milieux humides et 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 0. Les conclusions et recommandations pouvant être apportées à la lumière des travaux effectués dans les trois dernières années font l'objet du chapitre 8.

2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

2.1 Localisation

Le territoire visé par l'étude couvre une superficie totale de 4 585 km² et se situe au sud du fleuve Saint-Laurent à la hauteur du lac Saint-Pierre (**Carte 1**). Il couvre toute la zone de gestion intégrée de l'eau Nicolet, incluant les bassins versants des rivières Nicolet (3 408 km²), Colbert (39 km²), Landroche (28 km²), Brielle (20 km²), David-Houle (18 km²), des Frères (11 km²), Lemire (9 km²) et d'autres bassins versants mineurs qui s'écoulent directement au fleuve (102 km²), ainsi que la portion aval du bassin versant de la rivière Saint-François (906 km²) et la baie Saint-François (44 km²). L'inclusion des petits bassins versants connexes est naturelle puisqu'elle assure la continuité hydraulique des écoulements souterrains de l'amont vers l'aval.

Le territoire d'étude touche en totalité ou en partie à 84 municipalités : 21 dans la MRC de Nicolet-Yamaska, 20 dans la MRC d'Arthabaska, 16 dans la MRC de Drummond, sept dans la MRC des Sources, cinq dans la MRC du Val-Saint-François, quatre dans la MRC de l'Érable, trois dans la MRC des Appalaches, trois dans la MRC de Pierre-De-Saurel, deux dans la MRC de Acton, deux dans la MRC du Haut-Saint-François et une dans la MRC de Bécancour (**Figure 1**). La zone d'étude couvre une partie de la région du Centre-du-Québec et de l'Estrie ainsi que de petites superficies des régions de Chaudière-Appalaches et de la Montérégie. La population du secteur d'étude est estimée à environ 192 000 habitants. Les principales villes sont Drummondville (71 852 hab.), Victoriaville (43 462 hab.), Nicolet (7 828 hab.), Asbestos (7 096 hab.) et Warwick (4 766 hab.).

La zone d'étude est répartie sur les feuillets 21E12, 21E13, 21L4, 31I01, 31I02, 31I07, 31H09, 31H15 et 31H16. Elle est parcourue par les autoroutes Jean-Lesage (20), de l'Énergie (55), l'autoroute 955 et par plusieurs routes nationales (116, 132, 139, 143, 161) et régionales (226, 249, 255, 263).

2.2 Milieu naturel

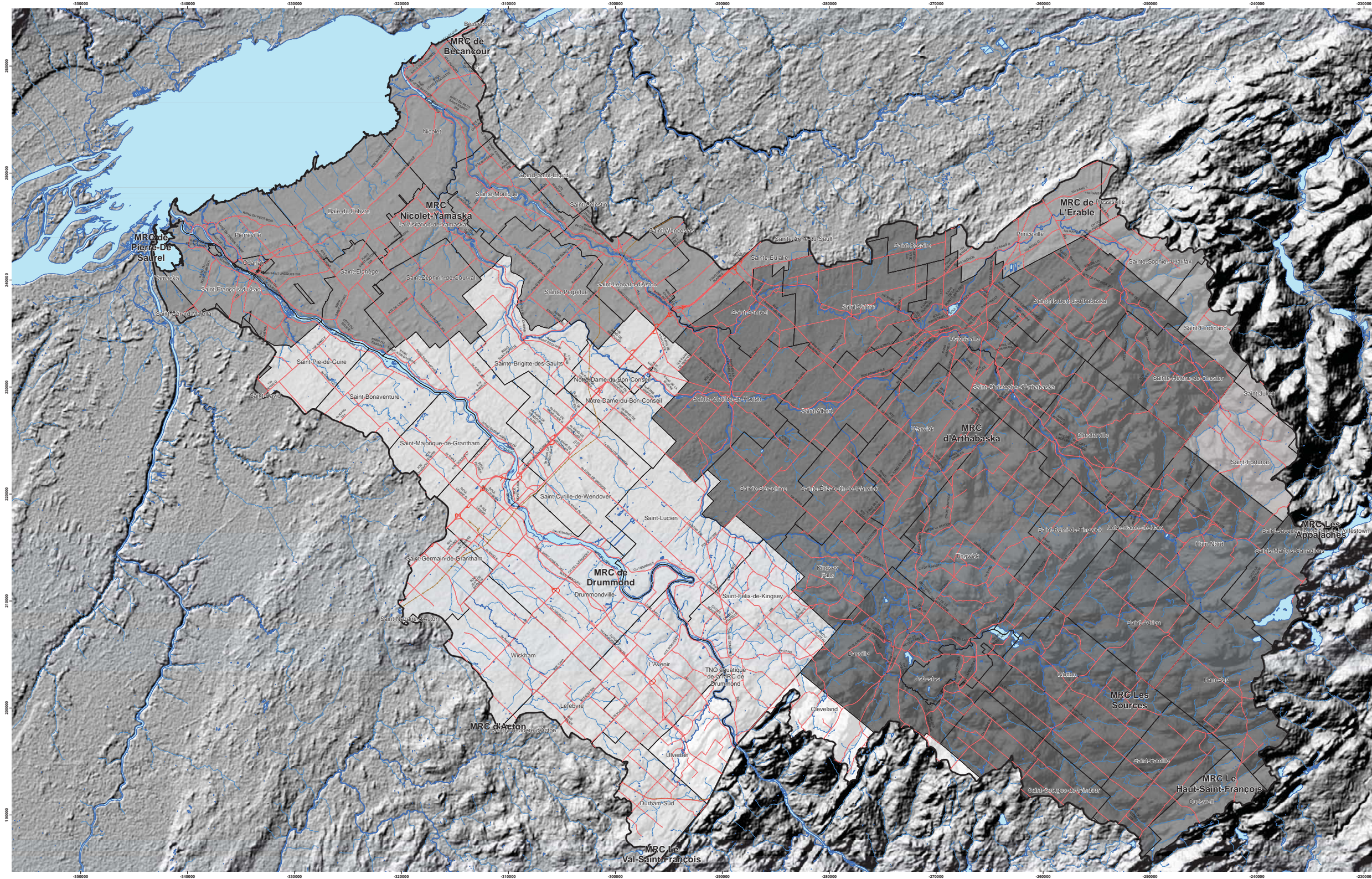
2.2.1 *Topographie et modèle numérique altimétrique*

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) (**Carte 2 et 3**). Le modèle fournit une valeur d'élévation avec une précision de +/- 5 m 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. Une couverture LIDAR a aussi été obtenue auprès du MDELCC. Cette dernière couvrait la région des Basses-Terres jusqu'au piémont des Appalaches. Ces données ont été utilisées de manière ponctuelle dans le projet, afin de préciser les altitudes dans des régions précises (e.g. tourbières).

La zone à l'étude est marquée par une topographie plane sur sa partie nord-ouest entre le fleuve Saint-Laurent et le piémont des Appalaches. L'altitude varie ainsi de quelques mètres vis-à-vis du fleuve à environ 130 m d'altitude en marquant le piémont des Appalaches (Victoriaville, Warwick et Kingsey Falls) sur une distance de près de 60 km. Dans la partie sud-est de la zone d'étude qui est située dans le piémont et les Appalaches, la topographie devient irrégulière et l'altitude passe de 140 m à Warwick à 559 m vers Saint-Fortunat sur une distance de 25 km. L'élévation maximale est de 701 m.

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 80 ° et est en moyenne de 2,3 ° (**Carte 4**). La pente est faible dans toute la portion aval de la zone d'étude. Dans cette section du territoire, les pentes les plus élevées se situent aux endroits où l'encaissement des rivières dans les dépôts meubles est la plus prononcée. Mis à part ces secteurs, les pentes de la portion aval du territoire sont de moins de 5 °. La portion amont présente une plus grande diversité de pentes, représentant un relief plus accidenté.



- ### LÉGENDE
- Hydrographie linéaire
 - Hydrographie surfacique
 - Zone d'étude
 - Municipalité
- #### Réseau routier
- Réseau routier pavé (classification MTQ)
 - Réseau routier non pavé (classification MTQ)
 - Bretelle
 - Pont
 - Pont couvert
 - Pont d'étagement
 - Passerelle
 - Mur de soutènement
 - Voie ferrée
 - Traverse
 - Gué



MÉTADONNÉES
Section 2.1 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

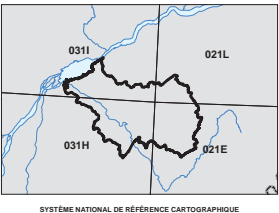
Carte 1 Routes, limites municipales et toponymie ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

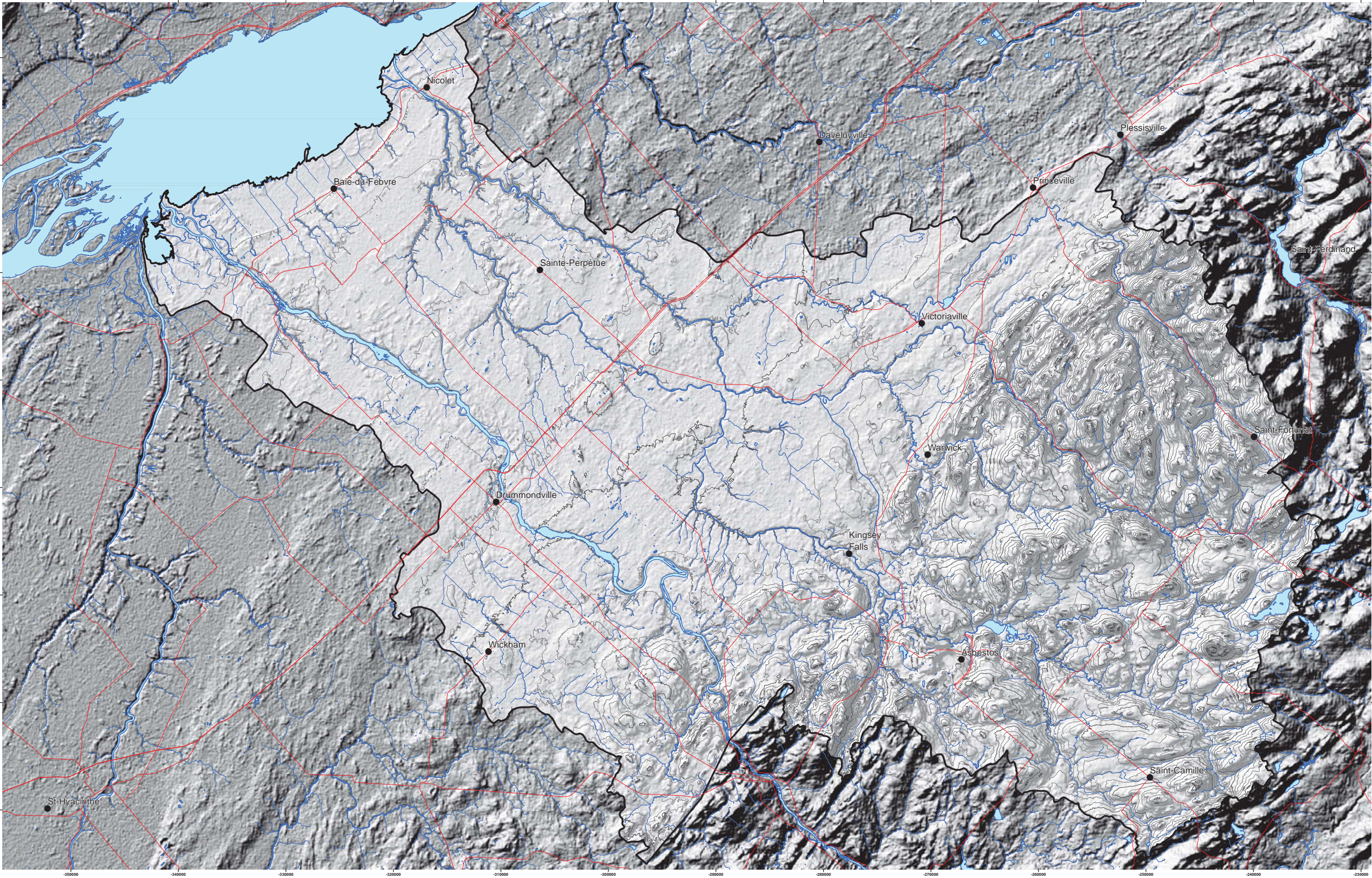
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Limites municipales : MAMROT, SDA 20K
Réseau routier: BDTQ 20K

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 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 données requises pour évaluer 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 et leurs institutions ou organismes d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Révision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barthelette, D., Meyconnat, G., Gravelle, M.-H., Côté, M. A. 2015. Profil de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.



LÉGENDE

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

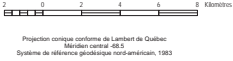
Courbes de niveau [équidistance 20 m]

- Courbe de niveau intermédiaire
- Courbe de niveau maîtresse



MÉTADONNÉES
Section 2.2.1 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 2 Topographie
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

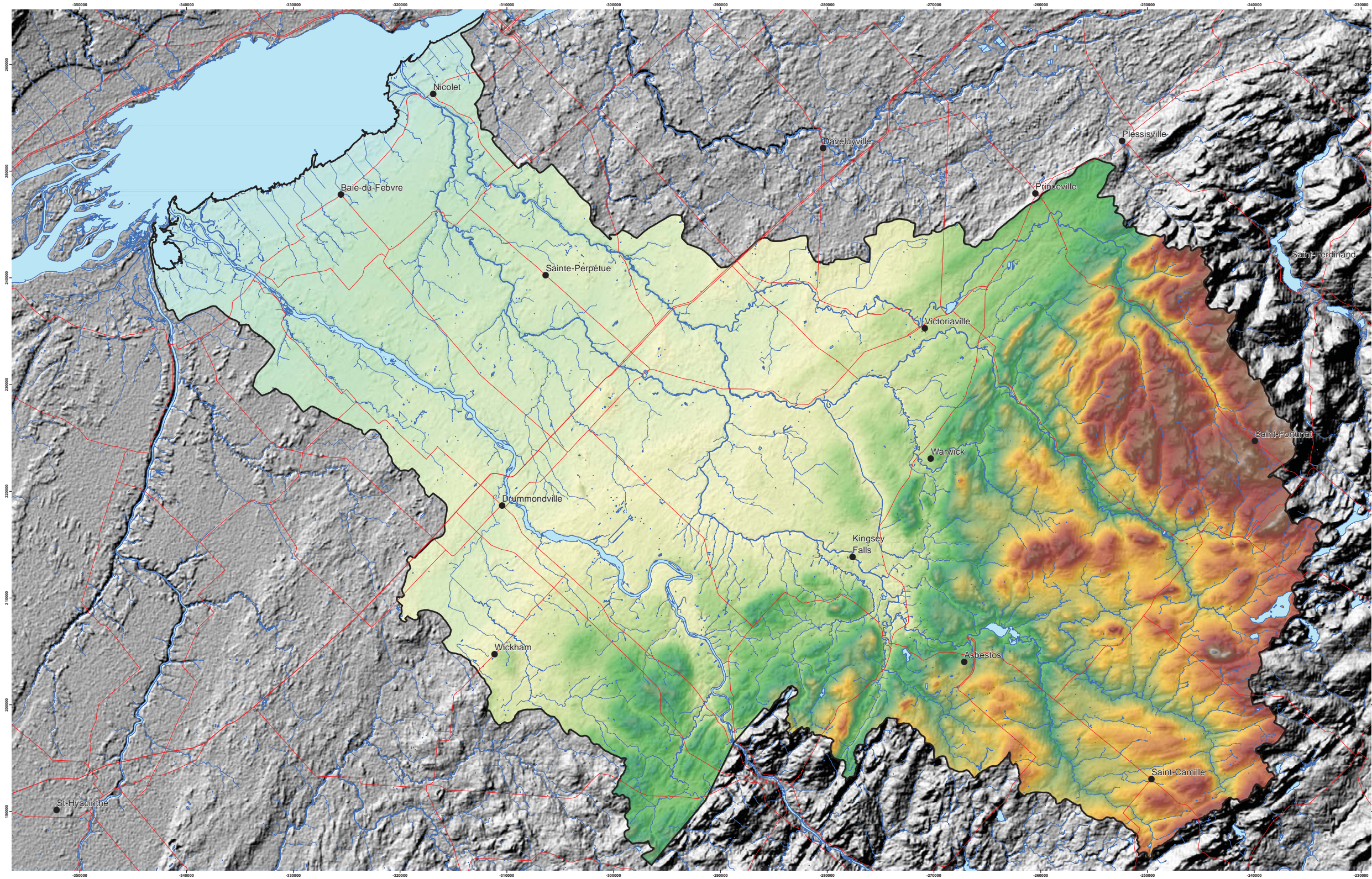
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Topographie : BDTQ 20K

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 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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Revue bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Barmette, D., Meyzonnet, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de consultation des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.



LÉGENDE

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

Élévation (m)

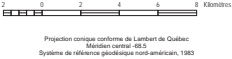
Maximum : 701

Minimum : 0



MÉTADONNÉES
Section 2.2.1 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 3 Modèle numérique altimétrique
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

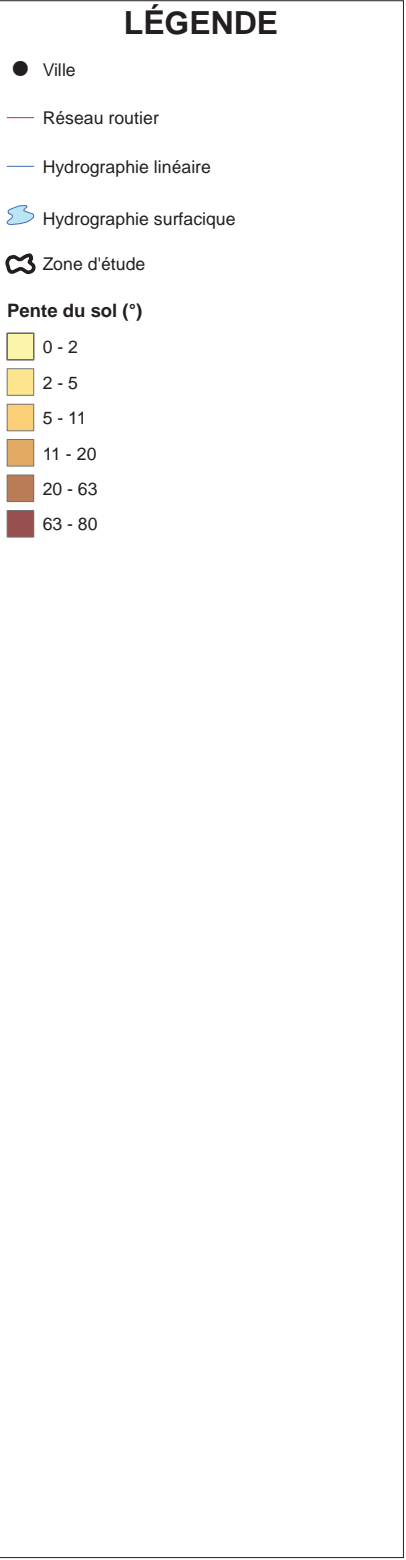
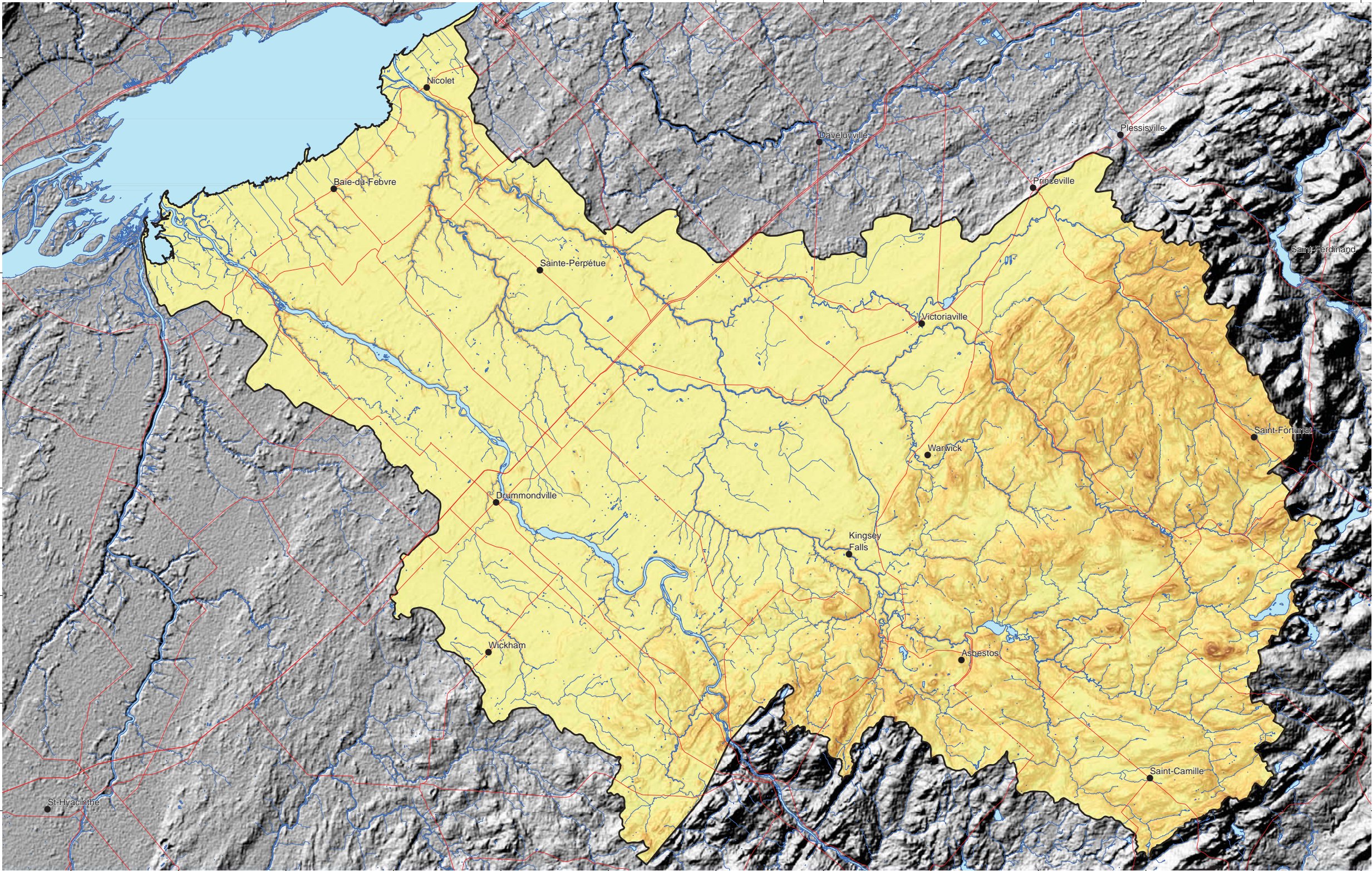
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Modèle numérique altimétrique : MERN 20K

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 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 données 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'attaché 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.

Revue bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Barmette, D., Meyzonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.



MÉTADONNÉES
Section 2.2.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

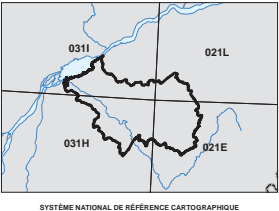
Carte 4 Pente du sol
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Pente du sol : UQAM

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



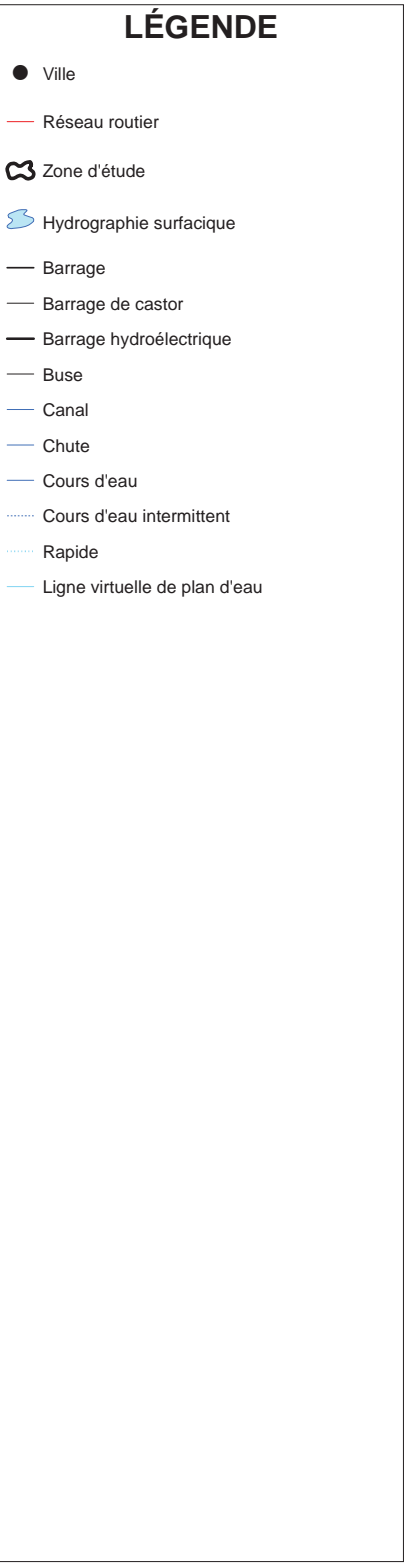
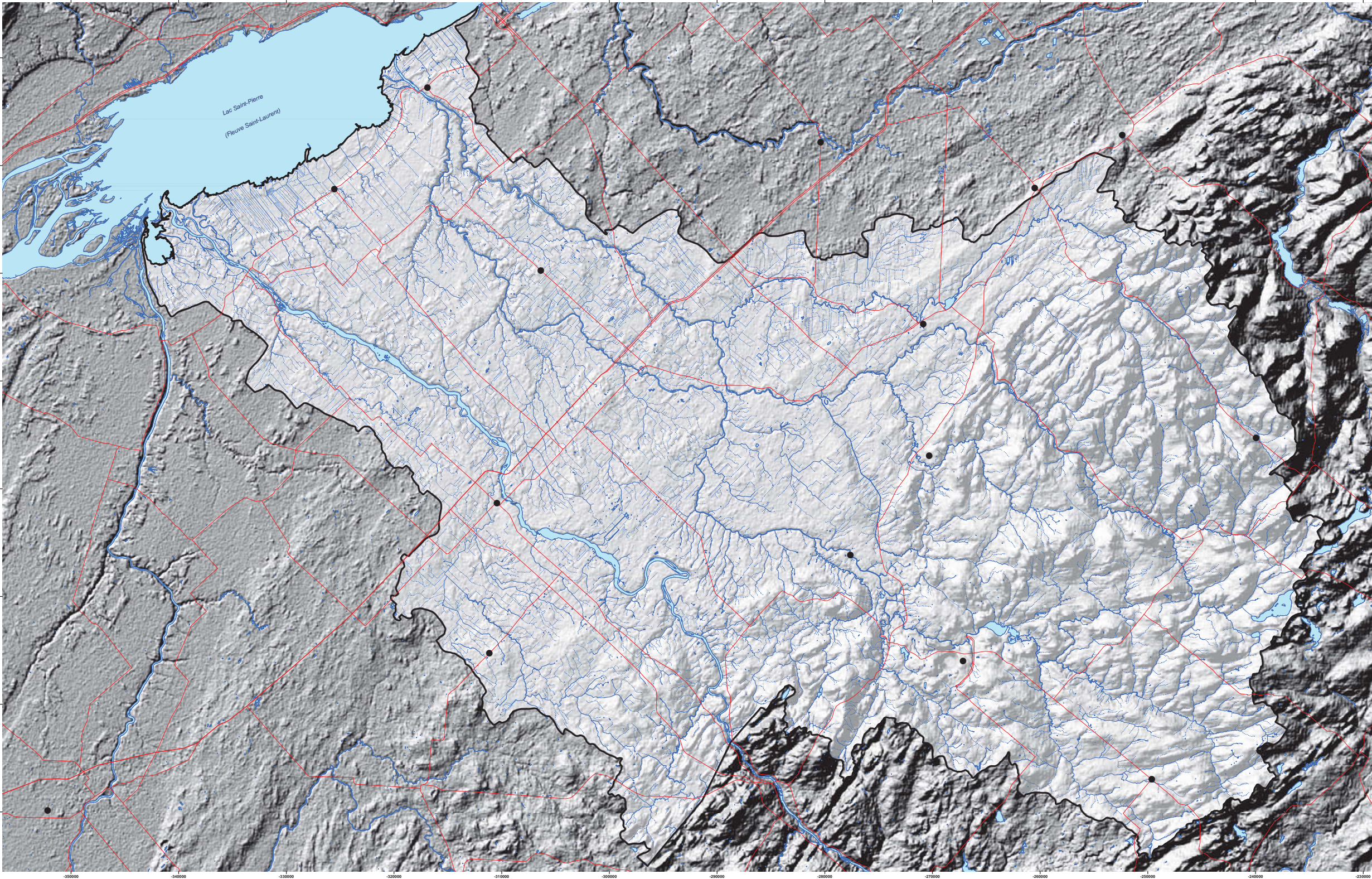
Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et 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 données 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Version bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meyzonnat, G., Gervais, M. L., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.

2.2.3 Hydrographie et limites des bassins

Les principales rivières ainsi que les bassins et sous-bassins de la zone d'étude sont illustrés aux **cartes 5** et **6**. La partie aval de la zone d'étude adjacente au fleuve Saint-Laurent (285 km²) est caractérisée par la présence de 18 petits bassins versants dont la superficie ne dépasse pas 40 km², et qui ont des exutoires directs au fleuve.

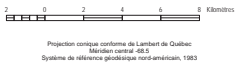
Le bassin de la rivière Nicolet occupe 74 % de la zone d'étude (3 404 km²) et s'étend du fleuve jusqu'aux Appalaches où la rivière Nicolet prend sa source, dans la bande de crêtes situées entre Saint-Camille et Saint-Fortunat. La rivière Nicolet Sud-Ouest est le principal affluent de la rivière Nicolet et représente 50 % (1 685 km²) de la superficie du bassin de la rivière Nicolet. Les autres bassins versants de la rivière Nicolet sont ceux des rivières Bulstrode (522 km²), Des Pins (180 km²) et Des Rosiers (141 km²). Les principaux affluents de la rivière Nicolet Sud-Ouest sont les rivières des Saults (150 km²), Landry (123 km²) et Francoeur (122 km²). Le bas du bassin versant de la rivière Saint-François représente 20 % de la superficie de la présente étude (907 km²). Les principaux affluents de la rivière Saint-François sont les rivières Saint-Germain (284 km²) et aux Vaches (117 km²).



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES
Section 2.2.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 5 Hydrographie
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

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

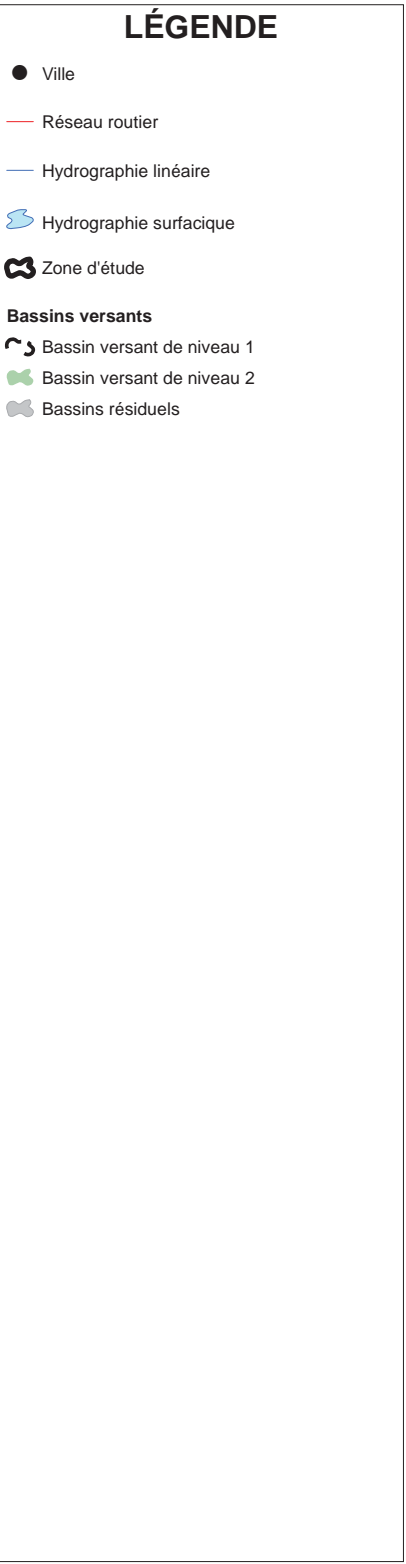
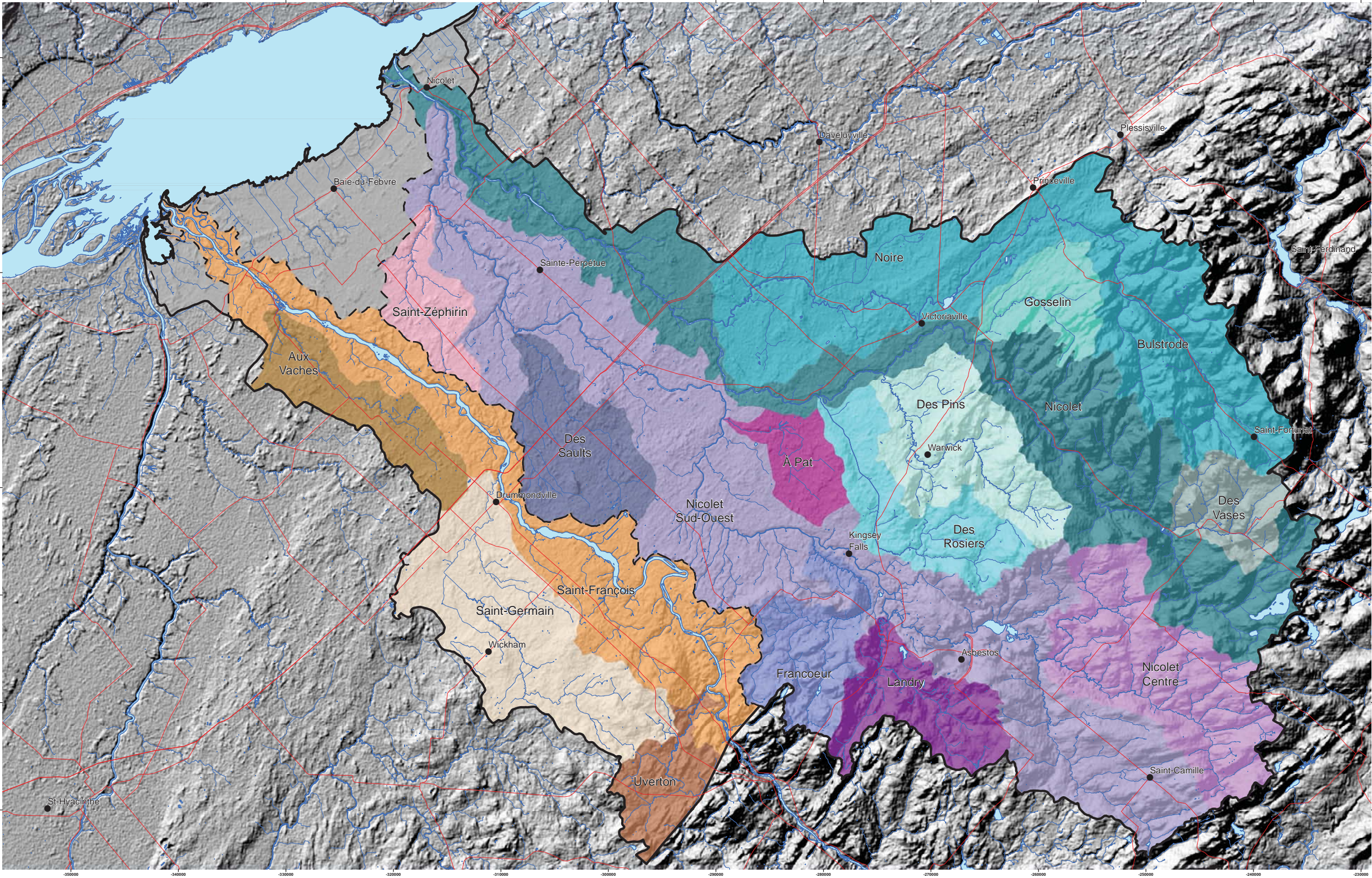
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE

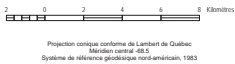
Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et 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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Révision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barthelemy, D., Meyconnai, G., Gravelle, M. H., Côté, M. A. 2015. Profil de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDELC.



MÉTADONNÉES
Section 2.2.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 6 Limites des bassins versants
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Bassins versants : CEHQ 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 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 données requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale ou à l'échelle régionale des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attaché 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.

Révision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barmette, D., Meyzonnet, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.

2.2.4 Couverture végétale

Deux couches d'informations complémentaires ont été utilisées pour décrire la couverture végétale sur la zone d'étude. La première, une carte de couverture forestière (**Carte 7**), a été créée à partir des cartes du 4^e programme d'inventaire du Système d'information écoforestière (SIEF) du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Ces données ont été fournies par l'AGTCQ. Selon les données du SIEF, la forêt couvre une superficie de 2171 km² ce qui représente 47 % de la zone d'étude. Ce pourcentage est différent de celui défini à partir de la carte d'utilisation du sol en raison des différentes méthodes utilisées. La carte d'utilisation du sol provient d'un traitement d'images Landsat et pourrait être moins précise que la carte du SIEF concernant la couverture végétale. La forêt recouvre davantage la partie amont et le secteur sud-ouest de la zone d'étude. Les feuillus représentent 41 % du couvert forestier, alors que les résineux occupent 20 % du territoire forestier. Un couvert forestier mixte, où la proportion de résineux se situe entre 26 % et 75 %, constitue le 39 % résiduel. Ces différents types de couverts forestiers sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Parmi les espèces de feuillus, les bétulaies (à majorité de bouleaux) et les érablières représentent respectivement 53 % et 19 % des espèces d'arbres (**Figure 1**). Les résineux les plus abondants sont les pessières (à majorité d'épicéas) qui représentent 16 % des espèces d'arbres du bassin et qui sont exclusivement présentes dans les Appalaches.

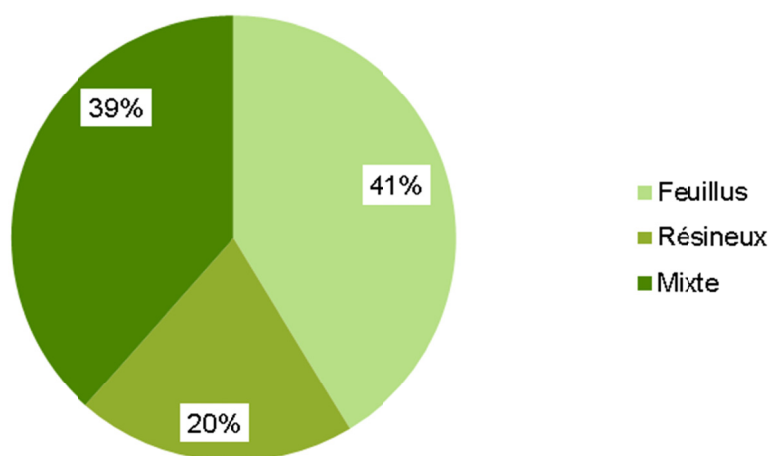


Figure 1 Pourcentage des différents types de peuplements forestiers

La seconde carte présente les grandes cultures agricoles (**Carte 8**) et a été générée à partir de la Base de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière agricole du Québec (BDCA, 2011). Ces classes de culture sont compilées à partir des déclarations faites par les producteurs agricoles à la Financière agricole du Québec et environ 10 % de ces déclarations sont validées sur le terrain.

L'agriculture couvre une superficie de 1568 km², ce qui représente 34 % de la zone d'étude. Ce pourcentage est différent de celui de la carte d'utilisation du sol, car celle du BDCA indique les parcelles qui sont en exploitation, alors que l'image Landsat répertorie tous les terrains agricoles, même s'ils sont en friche. Les principaux types de cultures rencontrés sont les céréales (54 %) et le foin (22 %). Les cultures mixtes (1 %), les cultures maraîchères (1 %), les cultures de canneberges (0,3 %) et les cultures de petits fruits (0,03 %) occupent une petite portion des zones cultivées (**Figure 2**). Il est important de souligner qu'aucune information n'est disponible pour 21 % de la zone d'étude. Les parcelles agricoles se retrouvent principalement dans la zone aval, ainsi que dans la partie centrale au nord-ouest de l'axe traversant les villes de Victoriaville, Warwick et Kingsey Falls. Les grandes cultures céréalières se retrouvent vers l'aval du bassin, tandis que les parcelles de foin deviennent majoritaires dans les Appalaches. Les cultures maraîchères et de petits fruits se situent en aval de la zone d'étude alors que les quelques cannebergières présentes sur le territoire se retrouvent dans la partie centrale, sur les sédiments d'origine éolienne et les alluvions.

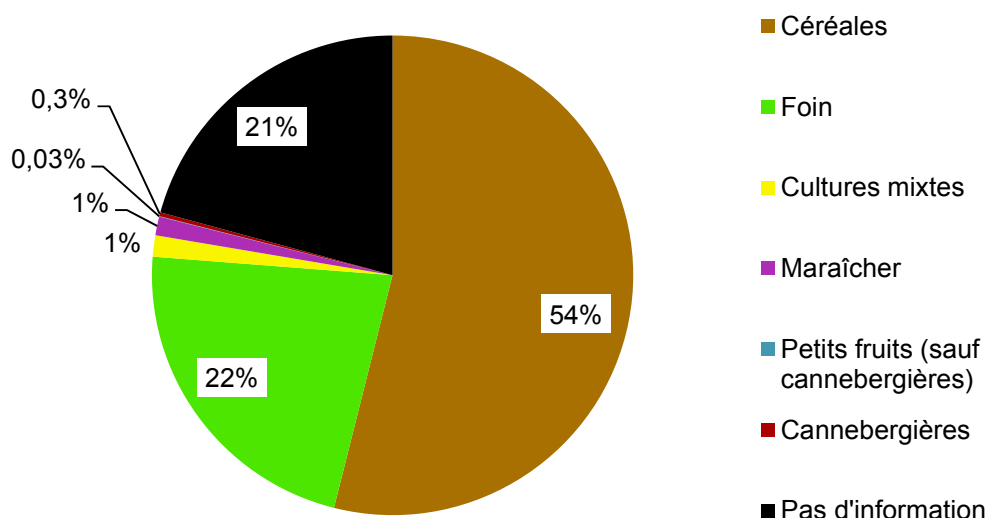
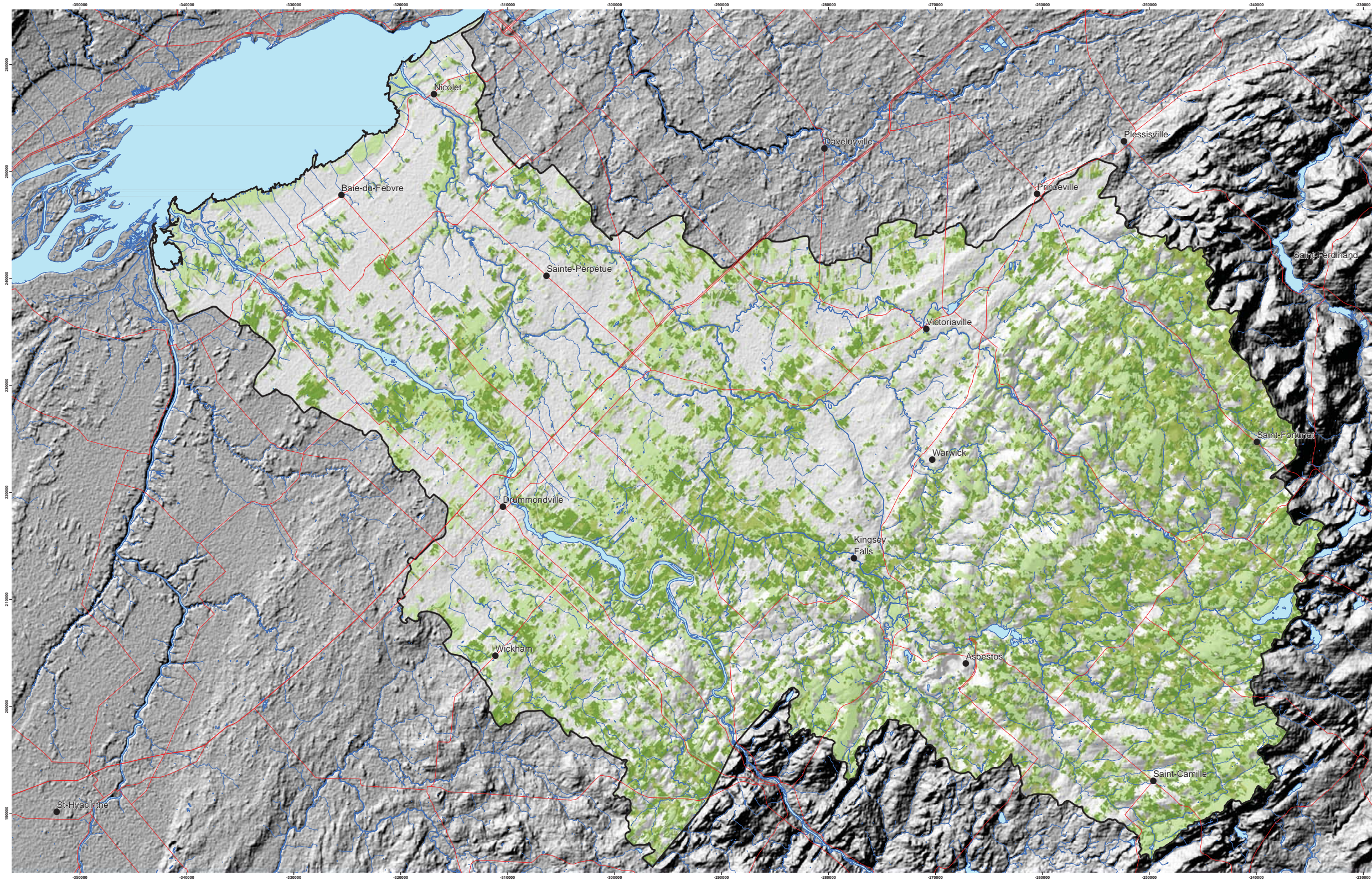


Figure 2 Pourcentage des différents types de cultures



LÉGENDE

● Ville

— Réseau routier

⬮ Zone d'étude

— Hydrographie linéaire

⬮ Hydrographie surfacique

Type de peuplement

■ Feuillus (plus de 75% de la surface)

■ Résineux (plus de 75% de la surface)

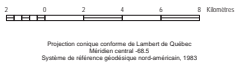
■ Mixte (de 26% à 75% de résineux)



MÉTADONNÉES

Section 2.2.4 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

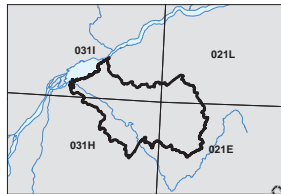
Carte 7 Couverture végétale - peuplements forestiers ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

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

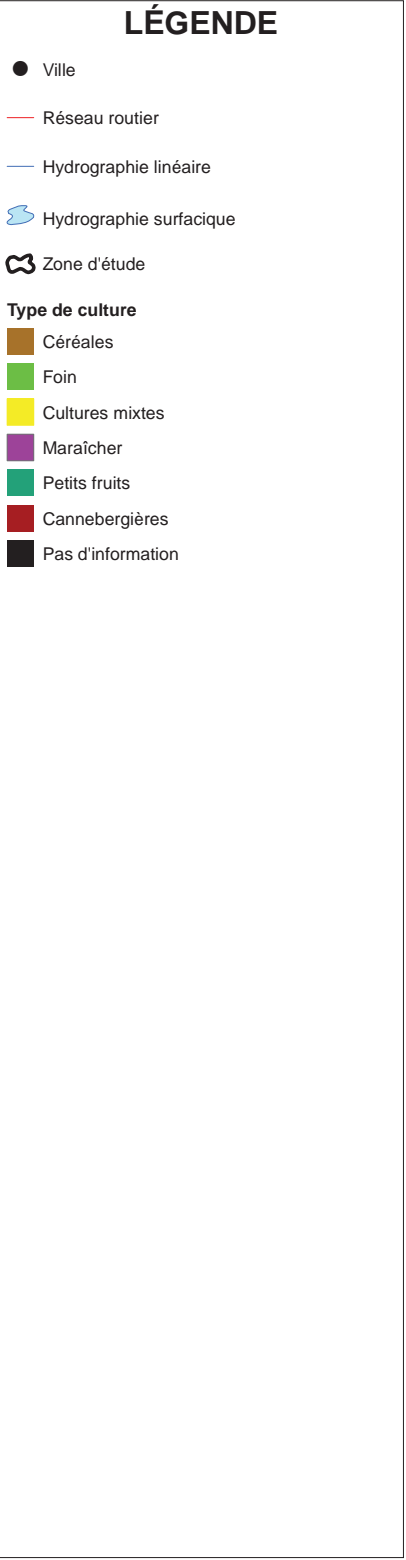
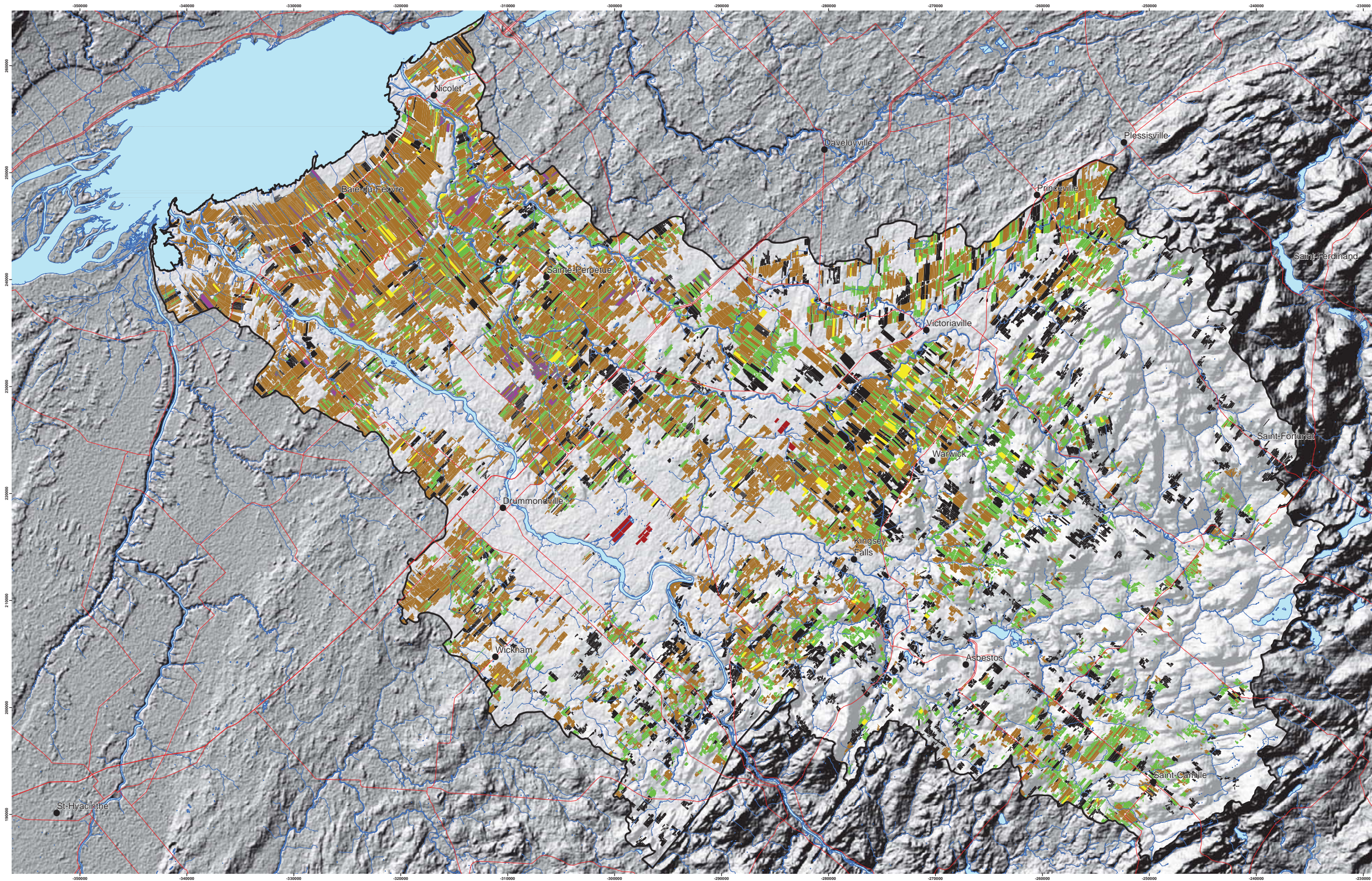
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE

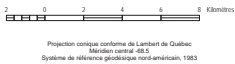
Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et 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 données 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Révision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barthelemy, D., Meyconnai, G.,
Gervais, M. H., Côté, M. A. 2015. Profil de connaissances
des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDECC.



MÉTADONNÉES
Section 2.2.4 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

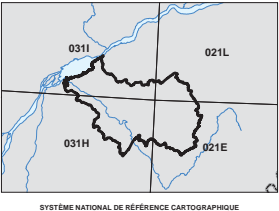
**Carte 8 Couverture végétale – agriculture
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC**



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 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 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 données requises pour évaluer 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barthelet, D., Meyzonnet, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.

2.2.5 Milieux humides

L'inventaire le plus récent des milieux humides est le fruit d'un travail conjoint entre Canards illimités Canada (CIC; 2006) et le MDDELCC qui a été complété au printemps 2012 (**Carte 9**). 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 278 km² soit l'équivalent de 6 % de la superficie totale de la zone d'étude. Selon la source consultée, la superficie relative occupée par les milieux humides sur la zone d'étude varie de 4 % (Landsat) à 6 % (MDDELCC, 2012). Cette différence est due en partie au fait que la classification réalisée par le MDDELCC et CIC est dédiée à l'identification des milieux humides alors que la classification de l'image Landsat est moins précise pour ce type d'analyse. Par exemple, l'analyse de l'image Landsat peut intégrer les tourbières arbustives dans la classe des terrains boisés, ou encore peut intégrer certains marécages et prairies humides dans la classe prairie.

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 et tourbières minérotrophes (**Figure 3**). 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).

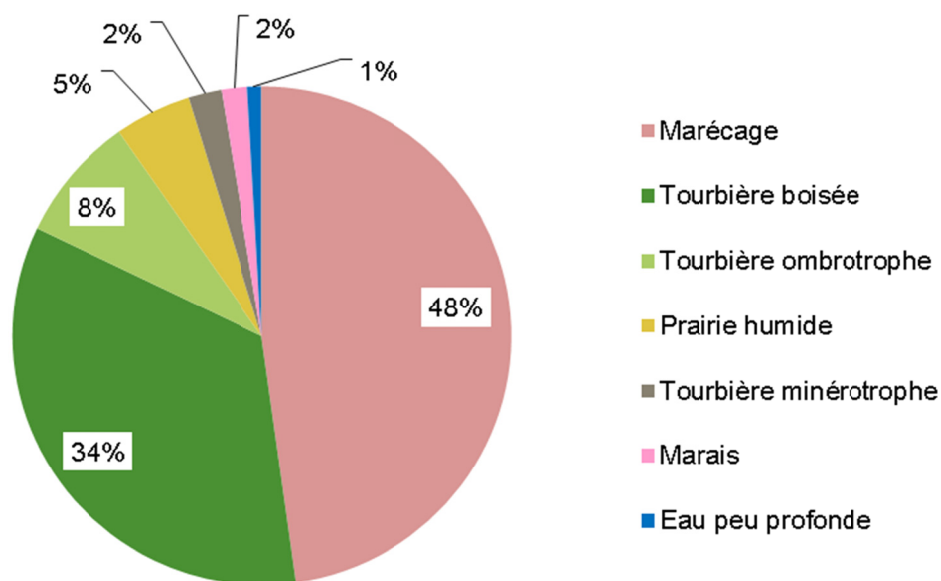


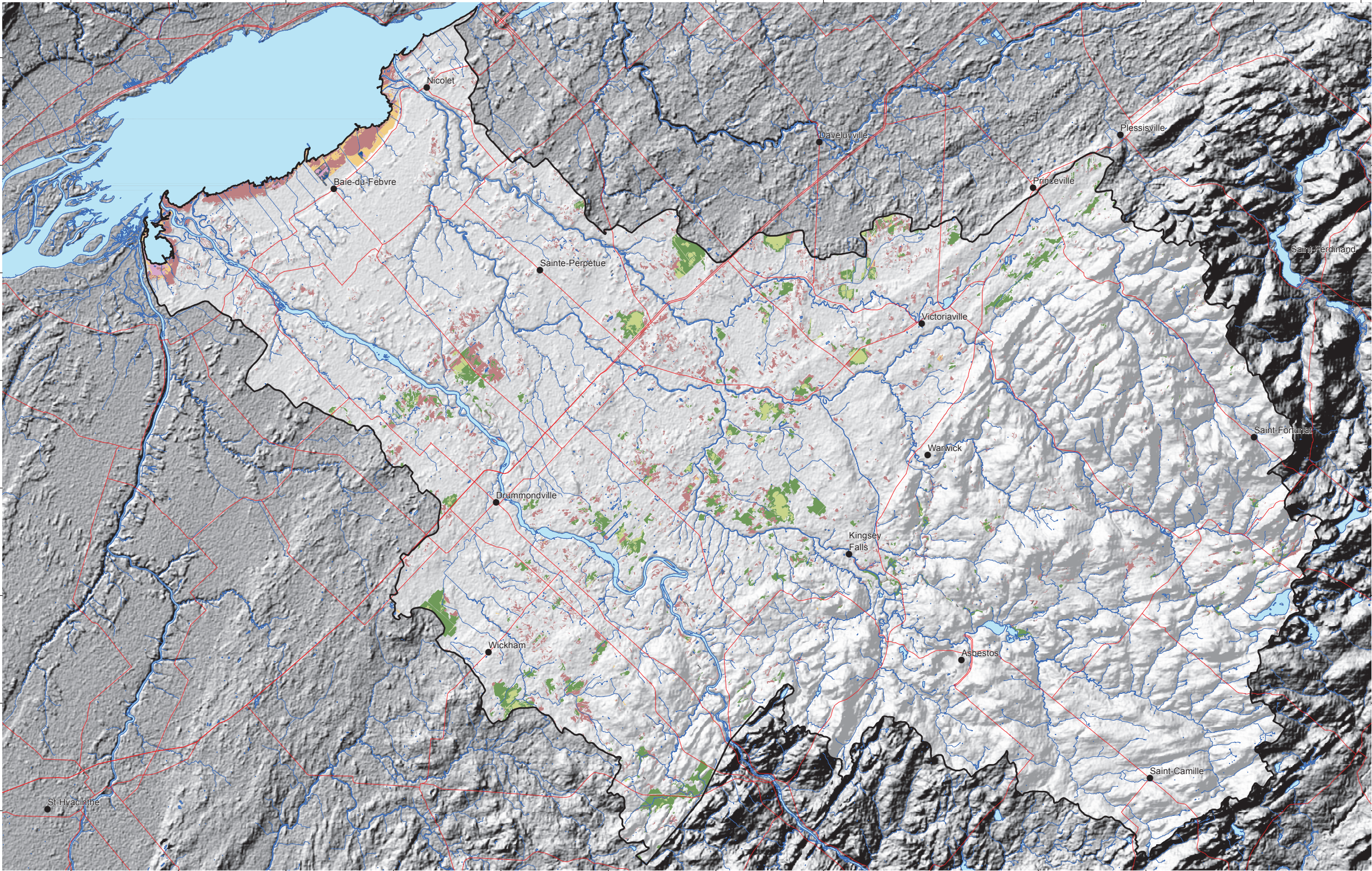
Figure 3 Pourcentage des différents types de milieux humides

Les marécages, qui composent 48 % des milieux humides sur la zone d'étude, se retrouvent principalement en bordure du fleuve Saint-Laurent et sur la partie centrale du territoire. Les tourbières boisées et les tourbières ombrotrophes (respectivement 34 % et 8 % des superficies de milieux humides) sont essentiellement situées dans la partie centrale du territoire. Les tourbières minérotrophes représentent, quant à elles, 2 % des milieux humides et sont situées au sud de Kingsey Falls et à l'extrémité sud-ouest de la limite du bassin de la rivière Saint-François. En bordure du fleuve Saint-Laurent, on retrouve des étendues marécageuses continues, ainsi que plus spécifiquement par rapport au reste du bassin, la présence d'eau peu profonde, de marais de prairies humides pour respectivement 1 %, 2 % et 5 % de la superficie relative des milieux humides.

2.2.6 Pédologie

Les données pédologiques (**Carte 10**) pour la zone d'étude proviennent de la dernière compilation réalisée par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) à l'échelle de 1 : 20 000, pour des années de numérisation réalisées entre 1998 et 2003.

Pour les parties basse et centrale de la zone d'étude, le sable est l'unité pédologique qui domine et qui s'échelonne selon des sols très rapidement drainés à mal drainés. À l'intérieur de cette dominance du sable, on retrouve des sols argileux sur une étendue relativement grande et continue sur le bassin versant de la rivière Saint-Zéphirin, et d'une manière générale sur une zone triangulaire au sud de Nicolet et de Baie-du-Febvre. Les étendues argileuses sont morcelées, de faibles étendues sur les Basses-Terres et généralement mal drainées. On retrouve sur la partie centrale, autour de l'axe Drummondville-Princeville, des zones de dépôts organiques qui correspondent en partie aux zones de tourbières identifiées dans la section milieux humides. Hormis les zones sableuses et argileuses, on retrouve également des parcelles discontinues de till couvrant la partie basse du territoire, dont les superficies augmentent graduellement en s'approchant du piémont appalachien. La portion du piémont et des Appalaches est dominée par des dépôts issus de tills qui s'échelonnent de sols rapidement drainés à mal drainés. On trouve spécifiquement pour le piémont et les fonds de vallées appalachiennes des dépôts graveleux de faible étendue, comme pour les fonds de vallées à l'est de Kingsey Falls, la zone de piémont au nord-est et au sud-ouest de Victoriaville, ainsi qu'au nord-est d'Asbestos. Les données à référence spatiale utilisées pour préparer ce livrable sont issues de l'assemblage de plusieurs cartes pédologiques sous forme numérique réalisée 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 2**.



LÉGENDE

● Ville

— Réseau routier

— Hydrographie linéaire

— Hydrographie surfacique

— Zone d'étude

Classes de milieux humides

■ Marécage

■ Tourbière boisée

■ Tourbière ombrotrophe

■ Prairie humide

■ Tourbière minérotrrophe

■ Marais

■ Eau peu profonde



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES

Section 2.2.5 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 9 Milieux humides ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC

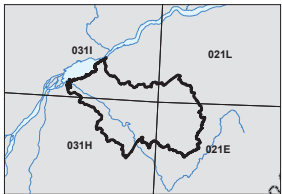
0 2 4 6 8 Kilomètres

Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Système de référence géodésique NAD 83
Système de coordonnées géographiques (NAD 83)

SOURCES / RÉALISATION

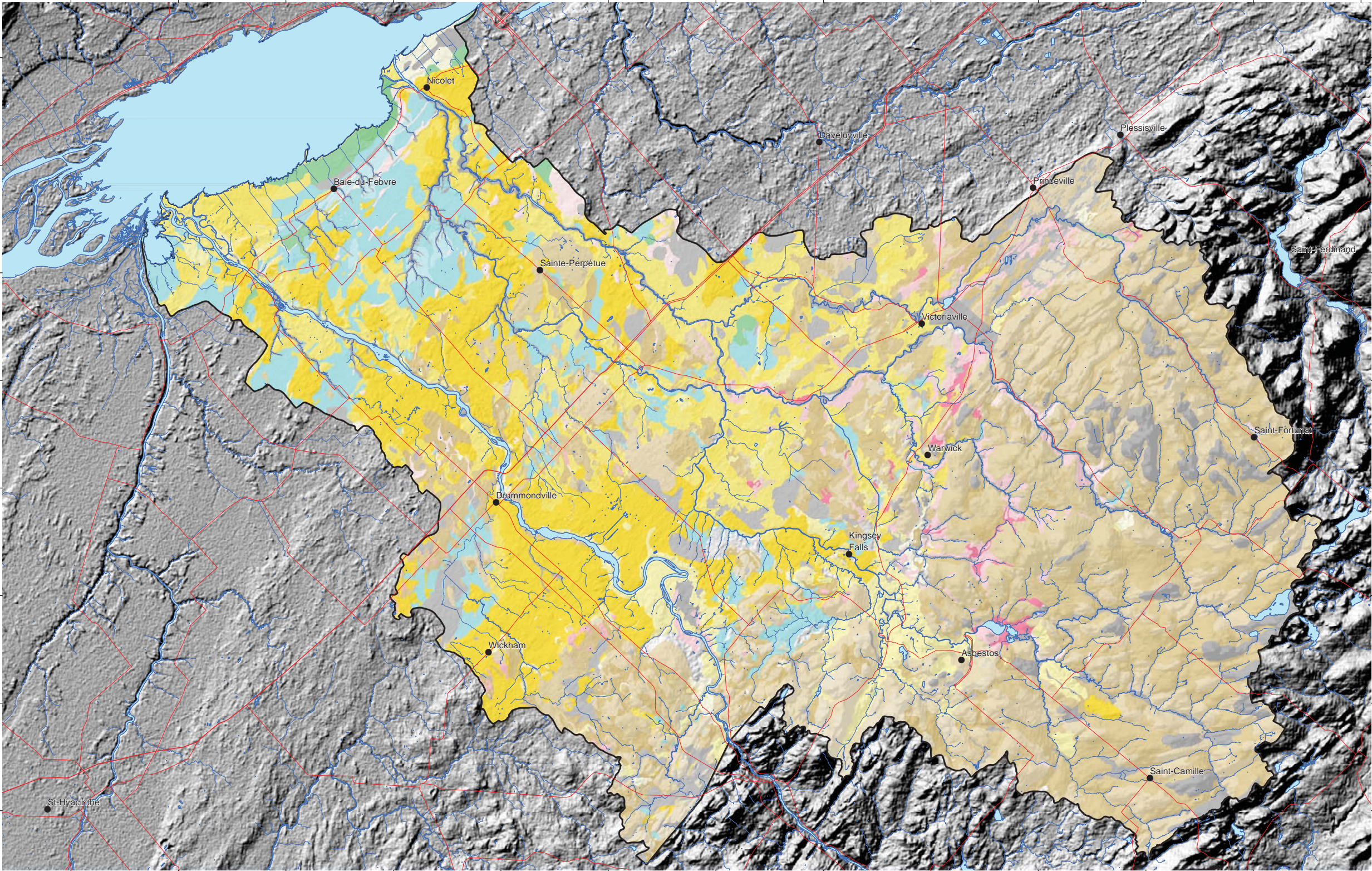
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K
Milieux humides: CIC, 2012

Réalisation:
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE

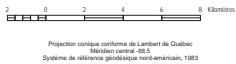
Notation bibliographique conseillée:
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meyzonnat, G.,
Gervais, M. L., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDECC.



MÉTADONNÉES

Section 2.2.6 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 10 Pédologie ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K
Pédologie: DPEP, IRDA 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 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 données 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Revue bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meynson, G., Gravelle, M., H., Côté, M. A. 2015. Profil de connaissance des basses versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.

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 (**Carte 11**). 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 11 stations illustrées, seulement quatre sont encore actives, les sept autres ont été abandonnées à différentes dates (**Tableau 3**). Le débit total le plus important enregistré sur la zone d'étude (762 m³/s) a été mesuré à la station 030103, située vis-à-vis le pont de l'autoroute Jean-Lesage sur la rivière Nicolet. Cette station est la plus en aval sur la rivière Nicolet. Toutes les rivières instrumentées ont un écoulement en période d'étiage.

Tableau 3 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)
Nicolet	030103*	1966-2010	1545,9	33,6	762,0	0,85
Nicolet Sud-Ouest	030101*	1929-2010	546,9	11,8	351,0	0,02
Bulstrode	030104	1966-1976	363,5	9,5	180,0	0,37
Bulstrode	030106*	1975-2012	343,0	8,2	263,0	0,02
Bulstrode	030110	1972-1986	250,2	7,5	240,0	0,06
Saint-Germain	030262*	1972-2010	262,6	4,8	112,0	0,06
Saint-Germain	030291	1985-1996	244,4	3,8	60,8	0,05
Des Saults	030107	1972-1979	149,1	2,1	47,3	0,07
Danville	030109	1972-1978	66,8	1,4	28,9	0,04
A Pat	030108	1972-1978	63,3	1,3	32,8	0,13
Saint Zéphirin	030119	n.d.	38,7	n.d.	n.d.	n.d.

* Station active

Les données météorologiques ont été obtenues auprès de Climat Québec. Ces données sont disponibles à 25 stations météorologiques sur la zone d'étude. Parmi celles-ci, 13 sont actives et les 12 autres stations ont été abandonnées à différentes dates (**Tableau 4**). Vingt-deux stations font partie du réseau provincial et trois font partie du réseau d'Environnement Canada. La température moyenne annuelle sur la zone d'étude varie de 3,4 °C (Saint-Fortunat) à 6,3 °C (Drummondville). Dans la partie aval de la zone d'étude, les précipitations annuelles moyennes totalisent entre 900 et 1000 mm et vers l'amont, plus de 1100 mm. Une augmentation générale 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 additionnées à la fonte de la neige) de 1900 à 2010 pour un maillage de 0,1° (Poirier et al., 2014). 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 4 Informations sur les stations météorologiques

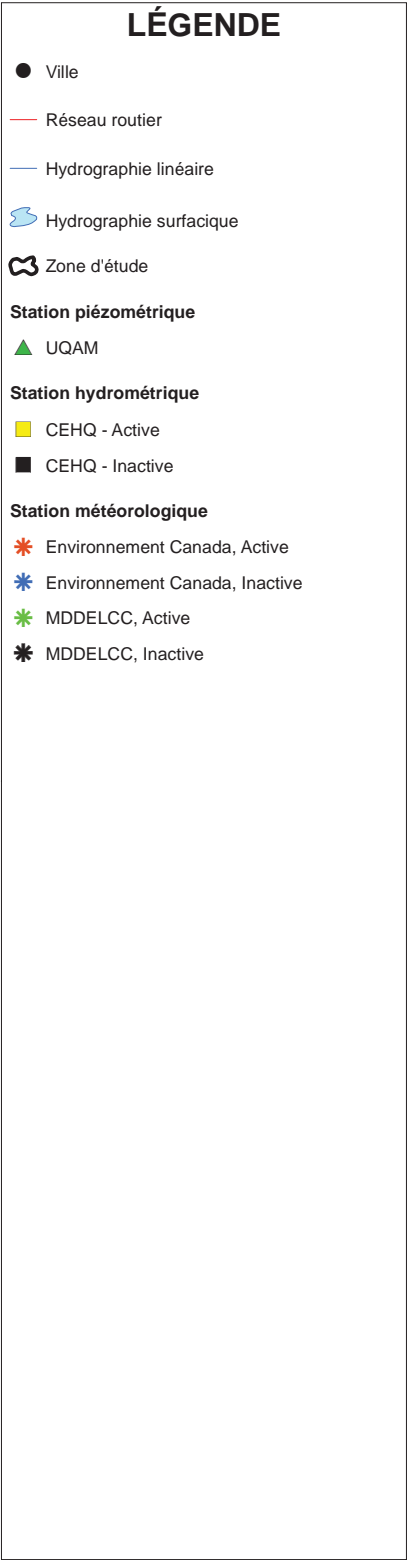
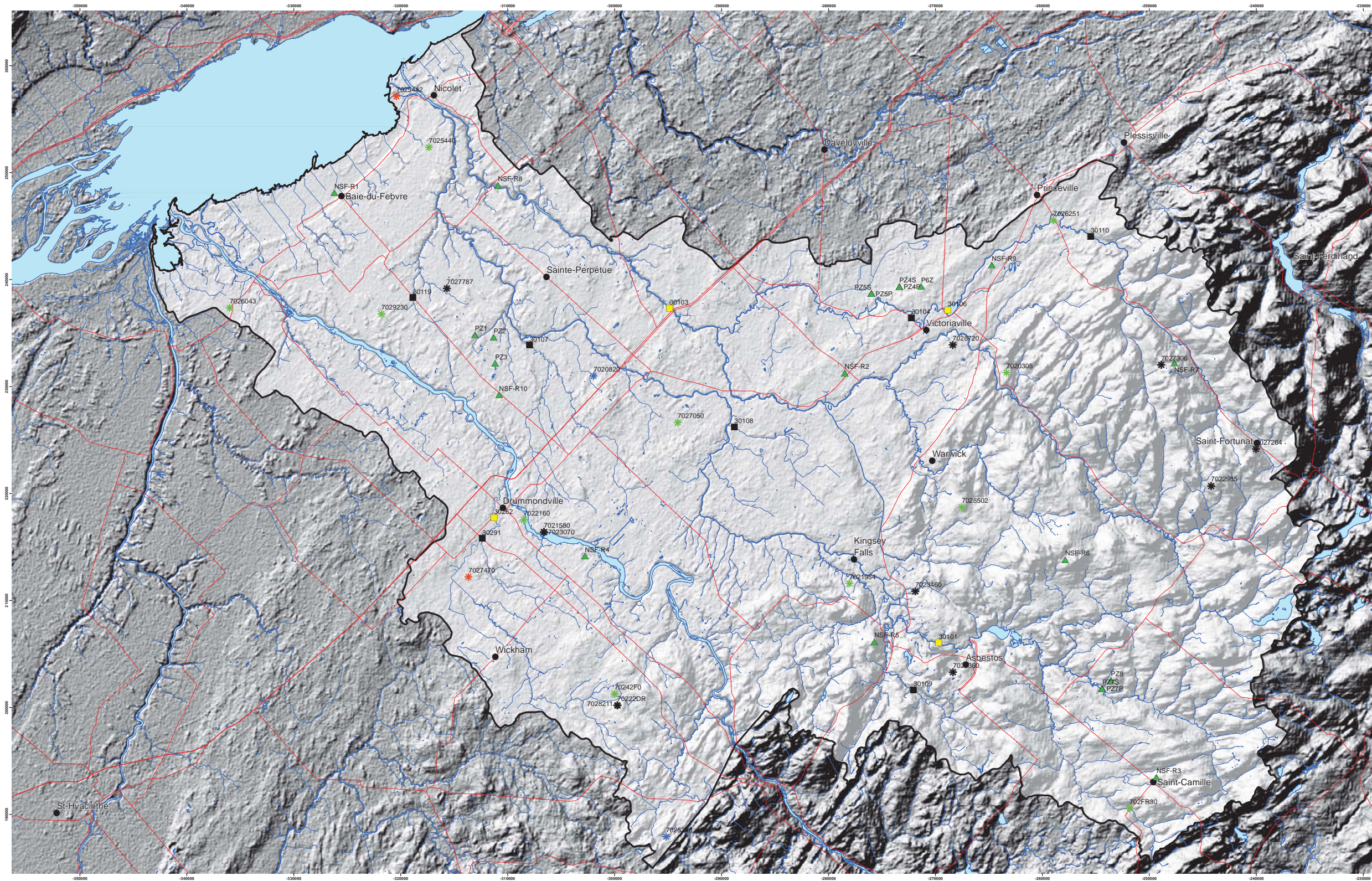
Nom de la station	Numéro de la station	Altitude (m)	Étendue série de données	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitation moyenne (mm/an)
Arthabaska	7020305	222	1969-2014	5,3	1135
Asbestos	7020360	229	1948-1987	5,1	1088
Chute-Hemmings	7021580	87	1981-1986	5,6	1032
Danville	7021954	133	1871-2014	5,6	1062
Drummondville	7022160	76	1913-2014	6,3	1107
Durham-Sud	70222DR	191	1981-1994	5,1	1120
Ham-Nord	7022985	404	1963-1982	3,5	1377
Hemmings-Falls	7023070	87	1931-1981	n.d.	n.d.
Kingsey	7023460	130	1957-1975	5,3	1039
L'Avenir	70242F0	173	2007-2014	n.d.	n.d.
Nicolet	7025440	30	1913-2014	5,3	918
Nicolet	7025442	8	1994-2014	6,0	929
Pierreville	7026043	20	1980-2014	5,8	986
Princeville	7026250	160	1973-1994	4,2	1056
Saint-Camille-de-Wolfe	702FR30	279	1975-2014	4,4	1178
Sainte-Clotilde-2	7027050	92	2007-2014	n.d.	n.d.
Sainte-Hélène-de-Chester	7027306	457	1963-1973	n.d.	n.d.
Saint-Fortunat	7027264	419	1963-1994	3,4	1500
Saint-Germain-de-Grantham	7027470	85	2008-2014	6,2	912
Saint-Zéphirin	7027787	52	1975-1994	4,9	1031
South-Durham	7028211	191	1966-1981	4,9	1102
Tingwick	7028502	262	1988-2014	n.d.	n.d.
Victoriaville	7028720	137	1949-1984	4,9	1078
Zéphirin	7029230	51	1989-2014	n.d.	n.d.

Aucune station piézométrique opérée par le MDDELCC n'est présente sur la zone d'étude. Certains des puits installés dans le cadre du projet (**Tableau 5**) seront intégrés au Réseau dans les prochains mois.

Tableau 5 Informations sur les stations piézométriques

Localisation	Nom station	Nom piézomètre	Aquifère	Altitude (m)	Température moyenne* (°C)	Niveau moyen* (m)
Saint-Valère	CPT-S16a	PZ5S	Granulaire	100	8,3	98
Saint-Valère	CPT-S16b	PZ5P	Granulaire	100	n.d.	n.d.
Baie-du-Febvre	NSF-R1	--	Roc	8	9,0	6
Saint-Albert	NSF-R2	--	Roc	119	8,3	118
Saint-Camille	NSF-R3	--	Roc	306	7,7	306
Drummondville	NSF-R4	--	Roc	108	8,8	108
Danville	NSF-R5	--	Roc	280	8,1	275
Saint-Rémi-de-Tingwick	NSF-R6	--	Roc	389	8,1	384
Saint-Hélène-de-Chester	NSF-R7	--	Roc	415	*	408*
Sainte-Monique	NSF-R8	--	Roc	44	8,3	23
Victoriaville	NSF-R9	--	Roc	148	7,9	146
Drummondville	NSF-R10	--	Roc	72	7,2	71
Asbestos	NSF-R11	--	Roc	83	-	-
Saint-Zéphirin	RPSS-S2	PZ1	Granulaire	73	7,6	70
Sainte-Brigitte-des-Saults	RPSS-S4	PZ3	Granulaire	70	7,8	69
Sainte-Brigitte-des-Saults	RPSS-S5	PZ2	Granulaire	69	8,7	67
Wotton	RPSS-S12a	PZ7S	Granulaire	205	n.d.	n.d.
Wotton	RPSS-S12b	PZ7P	Granulaire	208	8,2	206
Wotton	RPSS-S13	PZ8	Granulaire	270	7,3	269
Saint-Valère	RPSS-S15a	PZ4S	Granulaire	110	9,2	109
Saint-Valère	RPSS-S15b	PZ4P	Granulaire	110	n.d.	n.d.
Saint-Valère	RPSS-S17	PZ6	Granulaire	137	8,3	136

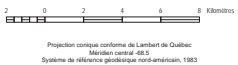
*Sonde défectueuse. Moyenne basée sur quatre mesures manuelles. Pas de mesure de température lors des mesures de niveau manuelles.



MÉTADONNÉES
Section 2.2.7 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

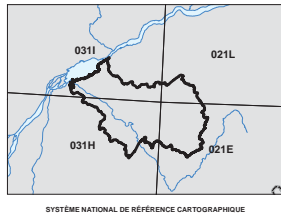
**Carte 11 Réseau de suivi météorologique,
hydrologique et piézométrique**

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Métres vertical: 85,3
Système de référence géodésique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K
Stations météorologiques: MDELC DSEE
Stations hydrométriques: CEHQ
Stations piézométriques: 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 données requises pour évaluer les conditions locales et offrir aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meyerson, G.,
Gravelle, M., Ouellet, M., 2015. Projet de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDELC.

2.3 Population, centres urbains et activités

2.3.1 *Municipalités*

La population totale sur la zone d'étude est estimée à 192 087 habitants. La ville la plus peuplée est celle de Drummondville (72 320 habitants), suivie de Victoriaville (44 313 habitants). Les autres villes d'importances sont Asbestos (7 095 habitants), Nicolet (5 471 habitants dans la zone d'étude), Warwick (4 764 habitants) et Saint-Cyrille-de-Wendover (4 485 habitants). Les informations sur les municipalités présentes sur le territoire et la superficie couverte sur la zone d'étude sont dans le **tableau 6**.

Tableau 6 Populations et superficies par municipalités et par MRC

MRC	Municipalité	Population zone d'étude	Superficie totale (km²)	Superficie zone d'étude (km²)
Arthabaska	Chesterville	895	117,0	117,0
	Ham-Nord	857	103,5	103,5
	Kingsey Falls	2020	70,5	70,5
	Notre-Dame-de-Ham	418	32,9	32,9
	Saint-Albert	1534	70,3	70,3
	Saint-Christophe-d'Arthabaska	3025	69,2	69,2
	Sainte-Anne-du-Sault	3	60,4	0,2
	Sainte-Clotilde-de-Horton	1591	117,1	117,1
	Sainte-Élizabeth-de-Warwick	374	51,6	51,6
	Sainte-Hélène-de-Chester	377	84,1	84,1
	Sainte-Séraphine	380	76,2	76,2
	Saint-Norbert-d'Arthabaska	1211	102,7	102,7
	Saint-Rémi-de-Tingwick	477	73,8	73,8
	Saint-Rosaire	167	109,8	21,7
	Saint-Samuel	774	44,4	44,4
	Saints-Martyrs-Canadiens	119	117,7	56,0
	Saint-Valère	1171	108,8	99,1
	Tingwick	1421	170,1	170,1
	Victoriaville	44313	86,2	86,2
	Warwick	4764	110,4	110,4
Bécancour	Bécancour	128	494,6	5,0
Drummond	Drummondville	72320	260,1	257,2
	Durham-Sud	611	92,7	57,1
	L'Avenir	1243	99,1	99,1
	Lefebvre	514	66,2	39,8
	Notre-Dame-du-Bon-Conseil	2449	92,4	92,4
	Saint-Bonaventure	693	81,0	55,3
	Saint-Cyrille-de-Wendover	4485	110,4	110,4
	Sainte-Brigitte-des-Saults	771	72,0	72,0
	Saint-Félix-de-Kingsey	1578	128,0	128,0
	Saint-Germain-de-Grantham	2340	87,7	43,9
	Saint-Lucien	1639	114,1	114,1
	Saint-Majorique-de-Grantham	1116	58,8	51,2
	Saint-Pie-de-Guire	398	52,6	45,8
	Wickham	2076	99,1	82,1

MRC	Municipalité	Population zone d'étude	Superficie totale (km ²)	Superficie zone d'étude (km ²)
L'Érable	Plessisville	369	145,7	5,7
	Princeville	1883	196,7	64,7
	Sainte-Sophie-d'Halifax	272	92,3	37,3
	Saint-Ferdinand	500	142,7	34,3
Nicolet-Yamaska	Baie-du-Febvre	569	173,2	96,8
	Grand-Saint-Esprit	235	27,2	13,5
	La Visitation-de-Yamaska	320	43,5	43,5
	Nicolet	5471	129,2	89,5
	Odanak	59	5,7	0,7
	Pierreville	1410	124,9	80,4
	Saint-Célestin	0	79,2	0,0
	Sainte-Eulalie	470	86,0	44,8
	Saint-Elphège	294	42,2	42,2
	Sainte-Monique	562	59,6	58,7
	Sainte-Perpétue	988	71,7	71,7
	Saint-François-du-Lac	1527	83,4	63,9
	Saint-Léonard-d'Aston	1877	84,8	69,3
	Saint-Wenceslas	74	79,7	5,4
	Saint-Zéphirin-de-Courval	721	71,7	71,7
Les Appalaches (Chaudière-Appalaches)	Saint-Fortunat	258	76,6	71,4
	Saint-Jacques-le-Majeur-de-Wolfestown	5	61,6	1,6
	Saint-Julien	33	82,8	6,7
Le Haut-Saint-François (Estrie)	Dudswell	310	223,7	38,8
	Weedon	34	225,0	2,9
	Cleveland	473	124,3	36,0
	Melbourne	0	173,7	0,1
	Saint-Claude	50	121,6	5,6
	Stoke	1	252,9	0,1
	Ulverton	380	52,4	48,2
Les Sources (Estrie)	Asbestos	7095	31,8	31,8
	Danville	3965	153,6	147,4
	Ham-Sud	138	152,4	92,8
	Saint-Adrien	508	98,8	98,8
	Saint-Camille	497	83,6	78,4
	Saint-Georges-de-Windsor	528	128,1	72,8
	Wotton	1454	144,7	144,7
Acton (Montréal)	Saint-Nazaire-d'Acton	8	58,2	0,6
	Saint-Théodore-d'Acton	0	83,7	0,0
Pierre-De Saurel (Montréal)	Saint-David	12	92,7	1,4
	Saint-Gérard-Majella	18	38,2	2,7
	Yamaska	176	76,6	8,3
TOTAL		191796	7961,9	4595,0

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 (**Carte 12**). La couche d'information a été généralisée en limitant à cinq le nombre de classes : zones agricoles, zones forestières, zones humides, zones urbaines et zones minières.

La majorité du territoire est occupée à des fins agricoles (48 %) et forestières (45 %) (**Figure 4**). Les zones agricoles sont situées dans la zone aval, en bordure du fleuve, ainsi que dans la partie centrale au nord-ouest de l'axe traversant les villes de Victoriaville, Warwick et Kingsey Falls. Pour le reste, on observe un morcellement des superficies entre terrains boisés et terrains agricoles avec une tendance à l'augmentation de la proportion des terrains boisés vers les Appalaches et dans une large zone au sud-ouest de Drummondville, ainsi qu'aux endroits où les milieux humides sont présents, ces derniers étant souvent entourés de forêts. Selon cette source d'information, les milieux humides couvrent 4 % du territoire, et sont situés au centre du bassin ainsi qu'en bordure du fleuve Saint-Laurent. L'occupation urbaine du sol (villes et voies de circulations) correspond à 2 % du territoire, et est particulièrement marquée pour les villes de Drummondville, de Victoriaville et d'Asbestos. Les zones minières, dont la principale production est l'amiante chrysotile, représentent 0,4 % du territoire et sont principalement situées dans la région d'Asbestos. 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.

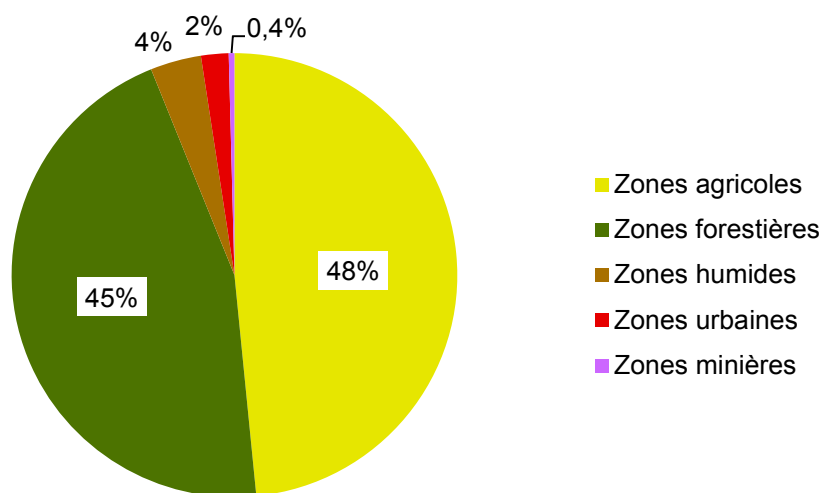


Figure 4 Pourcentage des différents types d'occupation du sol

2.3.3 Affectation du territoire

La **carte 13** présente la carte de l'affectation du territoire. Les données proviennent du ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMOT). Selon cette

information, le territoire est affecté en majeure partie à des vocations agricoles (58 %) et agroforestières (28 %) (**Figure 5**). La MRC d'Asbestos affecte la quasi-totalité des terrains à une vocation résidentielle et ces derniers représentent 5 % de la superficie du territoire. Les villes de Drummondville et de Victoriaville sont associées à des affectations urbaines étendues. Cette affectation représente 3 % de la superficie de la zone d'étude. Les zones d'affectation forestière se concentrent à l'extrémité sud-est de la zone appalachienne et représentent 3 % du territoire. Les territoires affectés aux activités récréatives (1 %) sont, quant à eux, principalement situés en amont de la zone d'étude ainsi qu'en bordure du Saint-Laurent. Les secteurs industriels constituent 1 % du territoire et sont concentrés en bordure des pôles urbains d'Asbestos, de Victoriaville et de Drummondville. Les zones de conservation occupent 1 % du territoire, essentiellement sur le bord du lac Saint-Pierre, à l'emplacement de la réserve du lac Saint-Pierre qui a été classée réserve mondiale de la biosphère par l'UNESCO en 2000. Enfin, dans de plus faibles proportions, les affectations publiques et commerciales représentent respectivement 0,05 et 0,01 % du territoire.

Les différences entre les cartes d'utilisation du sol et de couverture végétale pour les catégories de l'agriculture et de la forêt s'expliquent par le fait que la carte du MAMOT présente le zonage du territoire, qui ne correspond pas toujours à l'état du terrain. Par exemple, un terrain forestier peut être zoné agricole ou résidentiel, sans pour autant qu'il soit développé. Les terrains à vocation agroforestière dominent particulièrement la superficie de la MRC de Drummond, ainsi que la partie est de la MRC d'Athabaska.

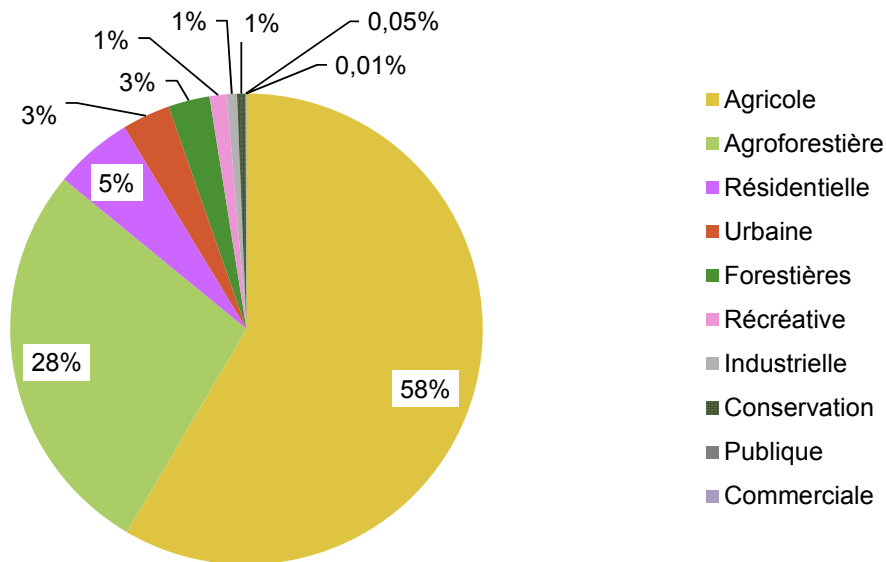
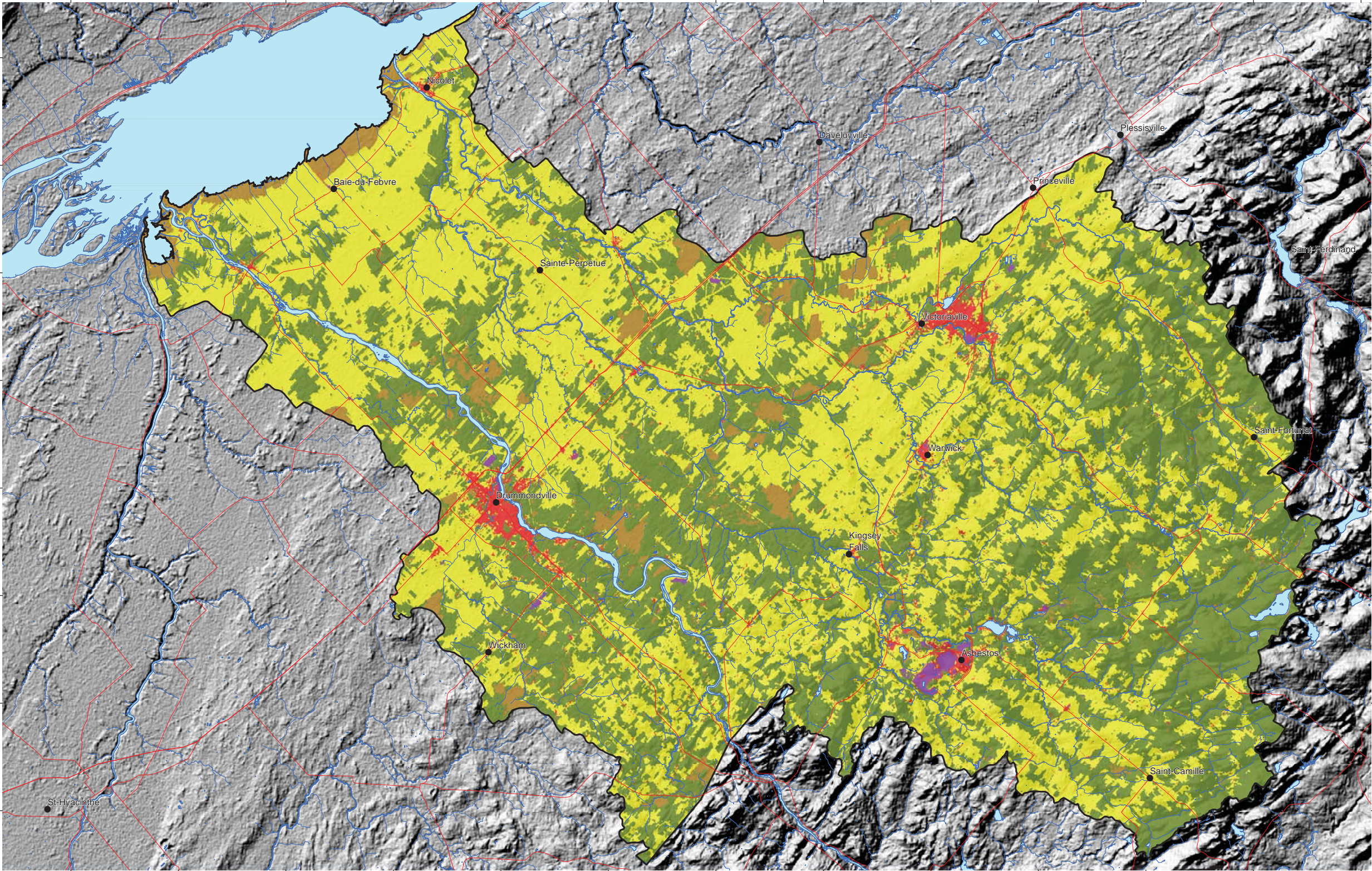


Figure 5 Pourcentage des différents types d'affectation du territoire



LÉGENDE

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

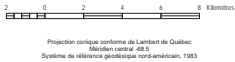
Classe d'occupation du sol

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



MÉTADONNÉES
Section 2.3.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

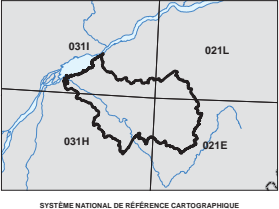
Carte 12 Occupation du sol
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

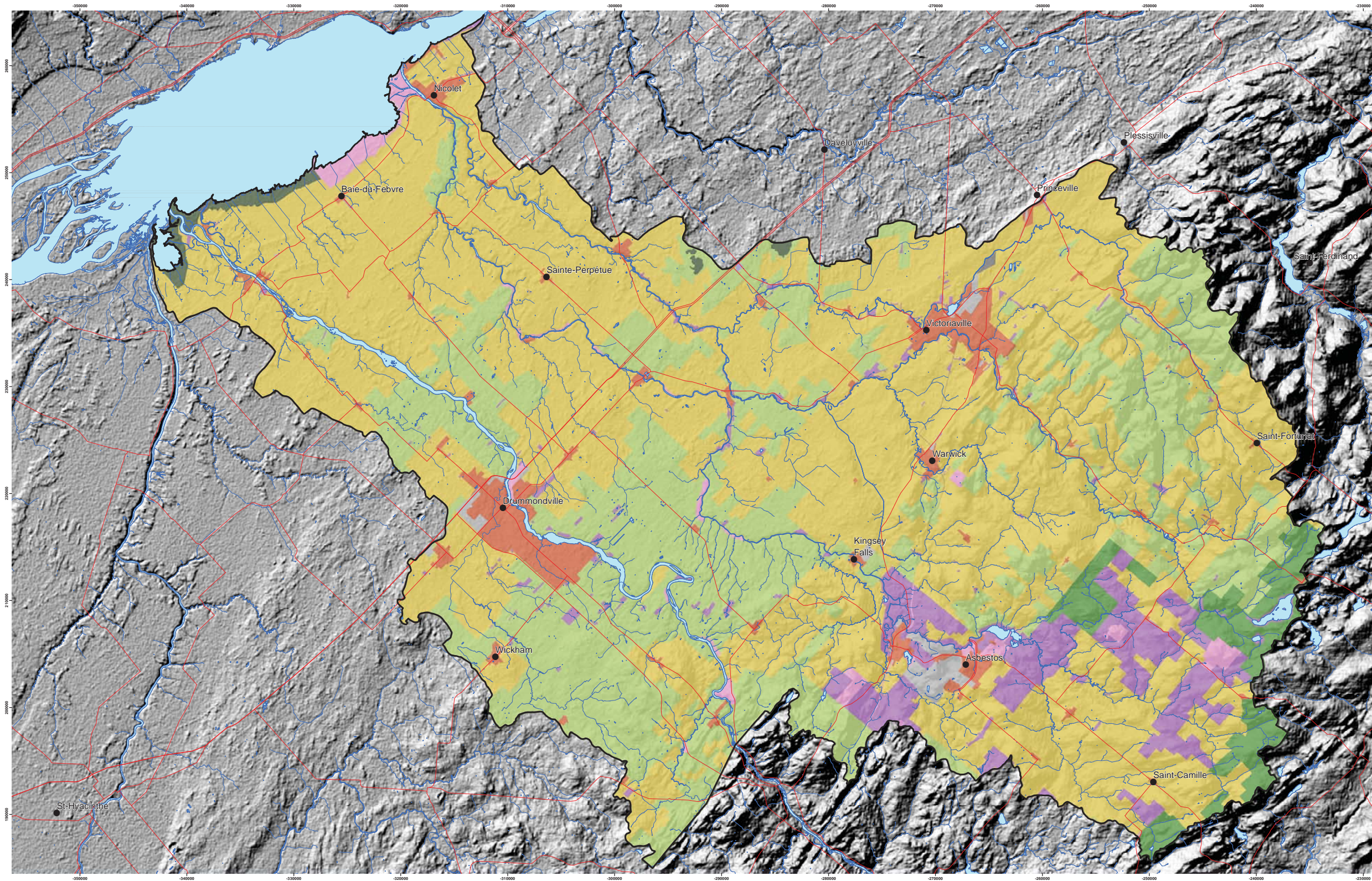
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Occupation du sol : LANDSAT DPEP

Réalisation :
Université de 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 données requises pour diffuser 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barabèche, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final, Rapport



LÉGENDE

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

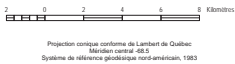
Classes d'affectation du territoire

- Agricole
- Agroforestière
- Résidentielle
- Urbaine
- Forestière
- Récréative
- Industrielle
- Conservation
- Publique
- Commerciale



MÉTADONNÉES
Section 2.3.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 13 Affectation du territoire ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Affectation du territoire : MAMROT 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 données 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'attache 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.

Notation bibliographique conseillée:
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Profil de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.

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 7** (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 MDDELCC 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 MDDELCC 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 MERN à partir du système d'information géominier (SIGEOM). Le Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDELCC, la base de données géochimique du Québec (BADGEQ et MERN), 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 relative 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.

Une affiche a été présentée lors du colloque du Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) « Les eaux souterraines : développement des connaissances et gestion durable de la ressource » au congrès de l'ACFAS en mai 2013 (Gagné et al., 2013) faisant un survol du projet et détaillant plus précisément l'étape de compilation de l'information existante (**Annexe 3**).

Tableau 7 Sources d'information disponibles 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)	MERN
	Réseau hydro national du Canada	RnCan-GeoBase
	Localisation des zones humides	DPEP/Canards Illimités/MAPAQ
	Localisation des barrages (avec capacité)	MDDELCC-CEHQ
Limites de bassins	Carte des régions hydrographiques	MDDELCC-CEHQ
	Carte des limites de bassins versants	MDDELCC-CEHQ
	Réseau hydro national du Canada	RnCan-GeoBase
	Aires de drainage (Données cadres de l'Atlas National)	RnCan-GeoGratis
Topographie	Modèle numérique altimétrique (MNA)	MERN
	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)	MERN
	Occupation du sol	MAPAQ
	Compilation nationale de l'occupation du sol au Canada	RnCan-GeoBase
	Système d'information écoforestière (SIEF)	MERN
	Cartes des zones inondables	MDDELCC-CEHQ
Affectation du territoire	Limites des zones agricoles	CPTAQ
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN
Routes, limites municipales et toponymie	Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	MERN
	Base nationale de données topographiques (BNDT)	RnCan-GeoGratis
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN
	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	MERN-SIGEOM
	Géologie du Quaternaire	UQAM
Pédologie	Carte des sols, information pédologique	DPEP/IRDA
Hydrogéologie	Localisation des puits du réseau de suivi	MDDELCC
	Localisation des puits (SIH)	MDDELCC-SIH
	Localisation des forages pétroliers et miniers	MERN/SIGPEG
	Localisation des forages géotechniques (MTQ et HQ)	MTQ/HQ
	Localisation des captages municipaux	MDDELCC
	Rapports hydrogéologiques	MDDELCC/ municipalités
Qualité de l'eau	Carte de la qualité de l'eau de surface des tronçons	MDDELCC
	Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ)	MERN
Hydrométrie	Localisation des stations et données hydrométriques	MDDELCC-CEHQ
Climat	Localisation des stations et données météorologiques	MDDELCC-DSEE

3.2 Travaux de caractérisation

Entre avril 2012 et mars 2015, plusieurs travaux de terrain ont été mis en œuvre 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 8** résume les travaux de caractérisation qui ont été réalisés dans le cadre du projet tandis que la **carte 14** permet de localiser ces travaux. L'**annexe 4** présente des photos prises lors des travaux de terrain.

3.2.1 *Cartographie géologique*

La cartographie des dépôts quaternaires des bassins versants de la rivière Nicolet et de la portion aval de la rivière Saint-François a été amorcée à l'été 2012 et s'est poursuivie à l'été 2013. Les travaux d'investigation sur le terrain au sein de la zone à l'étude ont été menés par cinq étudiants de l'UQAM, supervisés par le professeur Michel Lamothe. Au total, plus de 40 coupes stratigraphiques ont été décrites, la nature des dépôts a été identifiée à plus de 4 447 sites et plus de 1 703 affleurements ont été compilés (**Carte 14**). Ces informations ont essentiellement été recueillies en bordure de route et à l'intérieur de

banc d'emprunts. L'ensemble de ces informations a été colligé lors de la cartographie des formations superficielles menée à l'hiver 2013-2014 par Guillaume St-Jacques, agent de recherche à l'UQAM.

Tableau 8 Résumé des travaux de caractérisation

Travaux de caractérisation	Période	Réalisés par
Levés géologiques	été 2012 et été 2013	UQAM-Quatenaire
Levés géophysiques de résistivité électrique et géoradar (30)	été 2013	UQAM-UQAT
Installation de piézomètres dans l'aquifère fracturé (10)	été et automne 2013	Groupe Puitbec Inc
Installation de piézomètres dans les dépôts meubles (13)	automne 2013	INRS
Sondages CPT et RPSS (24)	automne 2013	INRS
Essais de pompage (10)	Été 2013 et été 2014	UQAM
Essais hydrauliques à charge variable (22)	Été 2013 et été 2014	UQAM
Essais Packers (5)	mai 2014	UQAC
Levés piézométriques	juin à sept 2013	UQAM
Suivi continu des niveaux piézométriques (21)	oct. 2013 à mars 2015	UQAM
Échantillonnage d'eau souterraine, analyses chimiques et isotopiques (190)	juin. 2013 à août 2014	UQAM/MAXXAM/ U. Waterloo, UdeS
Suivi mensuel des précipitations et analyses isotopiques (2 sites)	nov. 2013 à oct. 2014	UQAM
Échantillonnage de l'eau de surface - ^{222}Rn (20 sites)	juin. 2013 à août 2014	UQAM
Sondage de profondeur de tourbes (30 sondages sur 7 tourbières),	Été 2013 et été 2014	UQAM
Mesure des débits de base en période d'étiage (11 sites)	étés 2012 et 2013	UQAM

3.2.2 Géophysique

Les levés géophysiques 1D ont été réalisés au cours de l'été 2013 à 30 sites (**Carte 14**) à l'aide d'un résistivimètre (modèle Terrameter SAS1000) de la compagnie ABEM. Les levés ont été réalisés avec des espacements maximums d'électrodes allant de 100 à 250 m, ce qui permettait une profondeur d'investigation théorique de 20 à 50 m. Le choix des sites de mesures a été fait afin d'améliorer l'information stratigraphique, principalement la profondeur du roc, des contextes hydrogéologiques types. L'interprétation des profils est fournie à l'**annexe 5**.

3.2.3 Sondages et forages

Onze nouveaux forages au roc ont été réalisés. Au cours du mois d'août 2013, 24 sondages stratigraphiques ont été réalisés dans les formations granulaires à 21 sites différents. Parmi les 24 sondages, sept ont pu être faits au pénétromètre à cône (CPT) tandis que 17 ont été forés en sondage par rotopercussion (RPSS). Treize des forages RPSS ont été transformés en piézomètres. L'ensemble des forages au roc et des sondages dans les dépôts granulaires sont localisés dans la **carte 14**.

Forages au roc

Onze forages au roc ont été réalisés par la compagnie Les Puits LBM inc. qui a remporté l'appel d'offres ciblé lancé par l'UQAM en mai 2013.

Les sites de forages ont été localisés de manière à combler des lacunes d'information hydrogéologiques identifiées dans le rapport Phase I (Larocque et al., 2013). De plus, 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. La majorité des puits (NSF-R1, NSF-R3, NSF-R4, NSF-R5, NSF-R6, NSF-R8 et NSF-R9) sont situés sur des terrains appartenant aux municipalités. Le puits NSF-R2 est localisé sur un terrain privé tandis que le puits NSF-R10 est localisé sur un terrain appartenant au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN).

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. Lorsque 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 250 mm. Plus bas, une cavité de 150 mm de diamètre était alors forée dans le roc sur une profondeur de 40 à 50 m. Les forages ont une profondeur de 51 à 91 m (**Tableau 9**). L'épaisseur des dépôts meubles rencontrés varie entre 1 à 69 m. Les schémas de tous les forages au roc sont illustrés à l'**annexe 6**.

Sondages dans les dépôts meubles

Au total, 24 sondages (CPT et forages RPSS) ont été faits pour déterminer la stratigraphie et l'épaisseur des dépôts meubles, de même que pour faire l'installation de piézomètres (**Carte 14**). Ces travaux ont été réalisés au cours du mois d'août 2013 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 dans trois sites représentant des contextes hydrogéologiques distincts. Les sondages CPT ont quant à eux été réalisés dans la plaine argileuse de la partie basse de la zone d'étude, là où les besoins en données stratigraphiques étaient les plus grands.

Les sondages CPT et les forages RPSS ont été réalisés en grande majorité sur des terrains privés.

Parmi les 24 sondages réalisés, 13 ont été transformés en piézomètres. Ceux-ci sont équipés d'un tube de PVC de 25,4 mm de diamètre comprenant à leur base une crépine grâce à laquelle l'eau circule par des stries horizontales espacées de 2,5 mm et ayant une ouverture de 0,15 mm. La profondeur maximale des piézomètres est de 13,5 m et la longueur des sections crépinées varie de 1,5 m à 3 m (**Tableau 10**). 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. La profondeur maximale des sondages CPT est de 23 m. Au cours de l'été 2014, une campagne de nivellement au GPS différentiel a permis de localiser et niveler précisément les 13 piézomètres.

En plus des sondages, cinq échantillons de dépôts meubles, de 1,5 m de longueur, ont été extraits des sites RPSS-S2, RPSS-S3, RPSS-S4, RPSS-S15 et CPT-S16. Ces échantillons ont permis de réaliser des observations stratigraphiques détaillées et d'obtenir des échantillons non remaniés de différents types de sédiments. Les schémas des piézomètres et les profils stratigraphiques provenant du système d'acquisition de données de la foreuse de l'INRS-ETE sont illustrés dans l'**annexe 6**.

Tableau 9 Détails de construction des forages

Forage	Municipalité	Profondeur (m)	Profondeur tubage (m)	Nappe libre ou captive	Lithologie du roc
NSF-R1	Baie-du-Febvre	84,4	44,5	Captive	Shale/calcaire
NSF-R2	Saint-Albert	60,0	16,5	Captive	Ardoise calcaire
NSF-R3	Saint-Camille	51,8	7,0	Libre	Schiste
NSF-R4	Drummondville	58,0	11,3	Semi-captive	Ardoise calcaire
NSF-R5	Danville	54,0	6,0	Libre	Schiste
NSF-R6	Saint-Rémi-de-Tingwick	54,0	6,5	Libre	Schiste
NSF-R7	Sainte-Hélène-de-Chester	55,0	6,0	Libre	Schiste/phyllade
NSF-R8	Sainte-Monique	91,0	46,8	Captive	Shale
NSF-R9	Victoriaville	55,0	6,0	Libre	Ardoise calcaire
NSF-R10	Drummondville	58,0	15,2	Semi-captive	Ardoise calcaire
NSF-R11	Asbestos	79,2	60	Captive	Schiste

Tableau 10 Détails de construction des piézomètres dans les dépôts meubles et des sondages CPT et RPSS

Site	Piézomètre	Municipalité	Profondeur sondage (m)	Profondeur piézomètre (m)	Longueur crépine (m)
CPT-S1		Saint-Zéphirin	23,0		-
CPT-S2		Saint-Zéphirin	2,0		-
CPT-S8		Saint-Zéphirin	21,5		-
CPT-S9		La Visitation	16,7		-
CPT-S10		Baie-du-Febvre	3,0		-
CPT-S16		Saint-Valère	12,0		-
RPSS-S2	NSF-PZ1	Saint-Zéphirin	7,7	5,5	1,5
RPSS-S5	NSF-PZ2	Ste-Brigitte-des-Saults	8,8	8,8	3,0
RPSS-S4	NSF-PZ3	Ste-Brigitte-des-Saults	7,6	7,6	3,0
RPSS-S15a	NSF-PZ4S	Saint-Valère	10,0	4,0	1,5
RPSS-S15b	NSF-PZ4P	Saint-Valère	10,0	8,8	1,5
RPSS-S16a	NSF-PZ5S	Saint-Valère	12,2	4,0	1,5
RPSS-S16b	NSF-PZ5P	Saint-Valère	12,2	12,2	1,5
RPSS-S17	NSF-PZ6	Saint-Valère	4,0	4,0	1,5
RPSS-S12a	NSF-PZ7S	Wotton	14,0	4,8	1,5
RPSS-S12b	NSF-PZ7P	Wotton	14,0	13,5	3,0
RPSS-S13	NSF-PZ8	Wotton	8,0	7,6	3,0
RPSS-S7	NSF-PZ20	Drummondville	11,7	2,0	1,5
RPSS-S6	NSF-PZ21	Drummondville	11,7	11,7	3,0
RPSS-S3		Saint-Zéphirin	25,0		-
RPSS-S9		La Visitation	29,5		-
RPSS-S11		Drummondville	10,6		-
RPSS-S14		Wotton	4,5		-
RPSS-S18		Saint-Valère	3,6		-
RPSS-S19		Saint-Samuel	17,0		-

3.2.4 Essais hydrauliques sur les puits

Essais de pompage

Les essais de pompage ont été réalisés sur neuf des dix puits installés. La présence importante de gaz dissous au puits NSF-R1, combiné à la faible transmissivité de l'aquifère n'a pas permis la réalisation d'un essai de pompage concluant. Les essais ont été de courte durée (maximum 6h). Les débits pompés varient de moins de 1L/min (NSF-R5) à 120L/min (NSF-R10). L'interprétation des résultats a été faite sur les données remontées selon l'équation de Theis (1940) et a permis d'obtenir des valeurs de conductivité hydraulique (K) seulement. Un puits d'observation était disponible au puits NSF-R9, ce qui a permis une interprétation en pompage et l'obtention d'une valeur de K et d'emmagasinement (S).

Essais à charge variable

Des essais à charge variable ont été réalisés dans les neuf forages au roc et dans les 13 piézomètres installés dans le cadre du projet. Dans les forages au roc, les variations de charges ont été induites de deux manières : 1) en injectant de l'air sous pression dans le tubage du puits, 2) 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. Le dispositif par injection d'air sous pression a permis de générer des variations maximales du niveau d'eau dans le puits de 4 m, tandis que le dispositif par insertion du tube des variations de 0,8 m. Dans le cas des piézomètres, les deux méthodes ont aussi été utilisées. L'insertion se faisait à l'aide d'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, tandis que l'injection d'air a permis de générer des variations allant jusqu'à 4 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 la méthode par injection d'air, trois essais en remontée ont été réalisés tandis que pour la méthode par insertion, 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 Bouwer et Rice (1976) et Hvorslev (1951).

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 21 au 31 mai 2014 sur cinq forages (NSF-R2, NSF-R3, NSF-R4 et NSF-R6). Les essais ont été réalisés le long de la partie ouverte du forage à intervalles de 2 m. Au total, il y a eu 87 essais d'injection à charge constante et la transmissivité a été calculée pour les quatre forages. La méthode utilisée est décrite à l'**annexe 7**.

3.2.5 Mesure des niveaux piézométriques

Le niveau piézométrique a été mesuré dans 164 puits appartenant à des particuliers, des entreprises et des municipalités entre le mois de juin et le mois de septembre 2013. La localisation spatiale de chaque puits a été relevée à l'aide d'un GPS et l'élévation à cette coordonnée a été déterminée à partir du modèle d'élévation numérique au 10 m fourni par le MERN. Dans les zones de contextes hydrogéologiques types, la densité de levés piézométriques est plus élevée. Dans ces zones, des niveaux ont été mesurés à 53 sites.

Les onze puits au roc et 11 des 13 piézomètres dans les dépôts meubles ont été instrumentés pour le suivi en continu des niveaux de nappe (voir **carte 14**). Les niveaux et les températures de l'eau sont enregistrés en continu à l'aide de sondes Solinst Levelogger Gold toutes les heures. Elles ont toutes été installées au cours de l'été 2013.

3.2.6 Échantillonnage d'eau

Analyse des ions

Des échantillons d'eau souterraine ont été prélevés entre les mois de juillet et novembre 2013 dans 190 forages de particuliers, d'entreprises, de municipalités ainsi que dans les puits et piézomètres forés au cours de la Phase II, ce qui correspond à une densité d'échantillonnage d'environ un puits par 25 km² (**Carte 14**). Les municipalités 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. Sur l'ensemble des forages échantillonnés, 40 captaient l'eau d'un aquifère granulaire et 150 captaient l'aquifère du roc fracturé. Le projet de MSc de Marion Saby étudie en détail les résultats géochimiques de cette campagne d'échantillonnage et porte plus précisément sur l'utilisation de différents traceurs géochimiques pour évaluer les temps de résidence de l'eau souterraine. Les résultats des travaux de Marion Saby (Saby et al., 2014) ont été présentés à l'occasion du colloque annuel du RQES au congrès de l'ACFAS (Université Concordia) en mai 2014 (**Annexe 3**).

Tous les échantillons ont été prélevés suivant le protocole développé par le GRIES (GRIES, 2010) pour l'ensemble des projets PACES (**Annexe 8**). La purge des puits et des piézomètres installés dans le cadre du Projet a été réalisée en s'assurant qu'elle corresponde à trois fois le volume du puits. Bien que généralement pompés de façon journalière, les puits ont été purgés avant l'échantillonnage en utilisant la sortie d'eau la plus près du puits. Une cellule d'échantillonnage a été spécialement confectionnée pour l'échantillonnage PACES (**Figures A4.7 et A4.8 en annexe 4**), qui permet la mesure des paramètres physico-chimiques en continu sans que l'eau soit exposée à de l'air. La stabilisation des mesures *in situ* de pH, température, salinité et conductivité électrique (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. Quatre bouteilles de 125 ml ont été utilisées pour l'échantillonnage des paramètres chimiques identifiés au **tableau 11**. Les échantillons ont été conservés dans des glacières où la température était maintenue inférieure à 4 °C. À la fin de chaque semaine, l'ensemble des échantillons était envoyé au laboratoire MAXXAM de Montréal pour analyse. Dans le cas de dépassement de norme de potabilité, les propriétaires étaient contactés dans les cinq jours suivant la réception du résultat du laboratoire. Les avis de dépassement étaient ensuite transmis au bureau régional de la Direction de la santé publique.

Paramètres bactériologiques

Les analyses bactériologiques (bactéries atypiques, coliformes totaux, *Escherichia coli* et entérocoques fécaux) ont été réalisées à 171 forages échantillonnés. Une bouteille Nalgène® de 250 ml fournie par le laboratoire Biovet de Saint-Hyacinthe a été remplie et

conservée dans une glacière à une température inférieure à 4 °C. Les échantillons prélevés ont été envoyés au laboratoire chaque jour afin de respecter le délai maximal de 24 h entre l'échantillonnage et l'analyse.

Tableau 11 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)	

Pesticides et composés pharmaceutiques

Des échantillons ont également été prélevés en 2013 pour l'analyse de certains pesticides à 147 sites et de certains composés pharmaceutiques à 67 sites (**Tableau 12**). Au cours de l'été 2014, une autre campagne d'échantillonnage a été faite sur 33 puits. Une bouteille Nalgène® de 1 L d'eau filtrée était échantillonnée et conservée dans des glacières où la température était maintenue à moins de 4 °C. À la fin de chaque semaine, tous les échantillons étaient envoyés au Laboratoire de génie de l'environnement de l'Université de Sherbrooke. Au laboratoire, les échantillons ont d'abord été extraits par extraction en phase solide (*Solid Phase Extraction, SPE*) puis analysés par chromatographe en phase liquide (UPLC) couplé à un spectromètre de masse en tandem (MS/MS) (Ba et al., 2014; Haroune et al., 2014). Pour sept des 33 puits, des échantillons

ont également été prélevés et envoyés au Centre d'expertise en analyse environnemental du Québec (CEAEQ) pour l'analyse de 17 résidus de médicaments, pour contre-vérification. La procédure d'échantillonnage pour les analyses au CEAEQ demande l'utilisation de bouteilles en verre transparent de 1 L et l'ajout de 5 ml d'acide sulfurique (10N) à l'échantillon. La liste de composés analysés par le CEAEQ est aussi dans le **tableau 12**. Les analyses au CEAEQ sont faites par extraction liquide-liquide et ensuite par dérivation chimique formant les esters correspondants. Le dosage est fait par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (CEAEQ, 2014).

Tableau 12 Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels analysés

Pesticides		PPSP	Résidus de médicaments – CEAEQ
1-naphthol**	Isoproturon	Acétaminophène*	Acide clofibrigue
Acétamipride**	Krésoxim Méthyl**	Acide Méfénamique	Acide diclofénac
Aldicarbe**	Linuron	Amoxicilline	Acide salicylique
Aldicarbe-sulfone**	Malathion**	Aténolol	Benzafibrate
Atrazine	Métalochlore	Benzafibrate	Caféine
Azinphos-Méthyl**	Méthylbenzuron	Caféine	Carbamazépine
Bendiocarbe**	Métobromuron**	Carbamazépine	Chlorophène
Boscalide**	Métoxuron	Cyclophosphamide	Fénofibrate
Carbaryl**	Monolinuron	Diazepam*	Fénoprofène
Carbendazime**	Parathion**	Fénofibrate	Gemfibrozil
Carbofuran**	Pendiméthaline**	Ibuprofène	Ibuprofène
Chlofenvinphos**	Piperonyl Butoxyde**	Ifosphamide	Indométhacine
Chlorotoluron	Perméthrine**	Indometacine	Kétoprofène
Chlorpyrifos**	Phosmet**	Ketoprofène	Mestranol
Chlotianidine**	Pyraclostrobine**	Naproxène	Naproxène
Coumaphos**	Pyriméthanol**	Triméthoprim	Pentoxifylline
Cyanazine	Sebutylazine		Triclosane
Diazinon**	Simazine		
Diméthoate**	Spinosad A**		
Diuron	Terbutylazine		
Fludioxonil**	Thiabendazole**		
Hexazinone	Thiaclopride**		
Imazéthapyr**	Trifloxistrobine**		
Imidaclopride**			

* Composé analysé seulement pour les échantillons de 2013

** Composés analysés seulement pour les échantillons de 2014

Analyses isotopiques

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

Des échantillons ont été également prélevés sur 184 forages pour la composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) de l'eau souterraine. Chaque échantillon a été prélevé dans une bouteille de HDPE de 30 ml et a ensuite été conservé dans une glacière à température inférieure à 4°C. Les analyses ont été réalisées au laboratoire du GEOTOP à l'UQAM par la méthode d'équilibration. Les résultats ont été mis en lien avec la courbe des eaux météoriques élaborées partir des analyses des précipitations de novembre 2013 à octobre 2014 collectées aux stations Arthabaska et Nicolet.

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

Les résultats des analyses pour les 200 échantillons ont permis d'identifier 17 sites où les concentrations en N-NO_3 étaient supérieures à 2 mg/L. L'eau de ces sites a été échantillonnée à l'été 2013 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., 2003; Cook et al., 2006; 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).

Dans le cadre du projet de MSc de Floriane Moreira, l'activité du Radon (^{222}Rn) a été mesurée à 81 stations pour l'eau souterraine et à 14 stations dans la rivière Nicolet. Chaque échantillon a été prélevé dans une bouteille en verre de 250 ml et envoyé au laboratoire d'hydrogéologie de l'UQAM pour analyse chaque semaine. Les analyses ont été faites par la méthode d'extraction de Leaney et Herczeg (2006) à l'aide d'un compteur à scintillation alpha liquide (modèle Hidex SL-300) qui fait la mesure de l'activité du ^{222}Rn , et suivant le protocole de Lefebvre et al. (2013). Ces travaux ont fait l'objet de deux

présentations l'une lors du congrès du GÉOTOP à Pohénégamook en mars 2014 (Moreira et al., 2014) et l'autre lors du congrès du GÉOTOP à Orford en février 2015 (Moreira et al., 2015b). Ils feront également l'objet d'une présentation lors de la Réunion conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC à Montréal au début mai 2015 et lors du colloque du RQES « Le PACES a 5 ans : Contributions du programme et défis futurs pour l'avancée des connaissances et la gestion de l'eau souterraine au Québec » au congrès de l'ACFAS à la fin mai 2015 (Moreira, 2015). (**Annexe 3**).

Géochimie des roches

Sept échantillons de roche prélevés lors des forages PACES ont été analysés pour la géochimie de roche totale au laboratoire ACME Lab à Vancouver. Au laboratoire, les poudres de roche ont été préparées et mélangées à une solution de $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, fusionnées et dissoutes dans de l'acide nitrique de grade *American Chemical Society* (ACS) et analysées par ICP (*Induced Coupled Plasma*) pour les éléments majeurs et par ICP-MS for les éléments mineurs. Le carbone (TOT/C) et les sulfures (TOT/S) totaux ont été mesurés en utilisant la méthode Leco (LECO Corporation, 2007).

Datation et traceurs isotopiques

Des analyses ont été faites pour le tritium (^3H), pour les gaz rares (Ar, He, Kr, Ne et Xe), pour le hexafluorure de soufre (SF_6) et fréon (F-12) et pour l'activité du radiocarbone (A^{14}C) et composition isotopique du carbone ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$). 20 analyses pour le ^3H ont été faites à l'Université de Waterloo, tandis que 10 échantillons ont été analysés pour le $\delta^{13}\text{C}$ et le ^{14}C au laboratoire Beta-Analytic Inc. Dans le cadre du projet de PhD de Pauline Méjean, 59 puits ont été échantillonnés afin de déterminer les concentrations en gaz rares (He, Ar, Kr, Ne et Xe) de l'eau souterraine. Encore pour les gaz rares, une deuxième campagne d'échantillonnage a été faite en 2014 en parallèle à celle des Pesticides et PPSP où 21 puits ont été échantillonnés. Deux échantillons d'eau ont été prélevés à chaque forage en suivant la méthode standard de Weiss (1968). Cette méthode consiste à prélever 14 ml d'eau dans des tubes de cuivre de diamètre externe de 0,95 cm (3/8 de pouce). Le tube de cuivre est installé sur un support ayant des mâchoires à chaque extrémité, ce qui permet de l'écraser. Il est ensuite relié au robinet (amont) et à un seau rempli d'eau (aval) par des tubes Nalgène® renforcés. Une fois que le système est assemblé et son étanchéité est vérifiée, l'eau est mise en circulation dans le dispositif. Après quelques minutes de circulation, le tube est martelé doucement de façon à éliminer des bulles de gaz éventuellement retenues sur ces parois et finalement les mâchoires sont serrées et l'eau reste à l'intérieur du tube, tout en évitant la contamination par l'air et aussi le dégazage. Les échantillons ont été analysés au Laboratoire des Gaz Rares de Montréal (GRAM), au centre de recherche GEOTOP de l'UQAM et aussi aux laboratoires de l'Université de Tokyo et du Michigan. Les analyses sont faites avec un spectromètre de masse quadripolaire (modèle Balzers QMS C200) et les résultats ont servi à l'évaluation du temps de résidence des eaux souterraines. Le SF_6 et le F-12 sont des traceurs d'origine anthropique (industriels) permettant la datation des eaux jusqu'à environ 60 ans

21 échantillons ont été prélevés en 2014 lors de la campagne d'échantillonnage pour les PPSP et pesticides. Le prélèvement a été fait dans des ampoules de 500 ml en acier inoxydable et les analyses ont été faites au laboratoire Helis de l'Université de Brème.

3.2.7 Caractérisation de contextes hydrogéologiques types

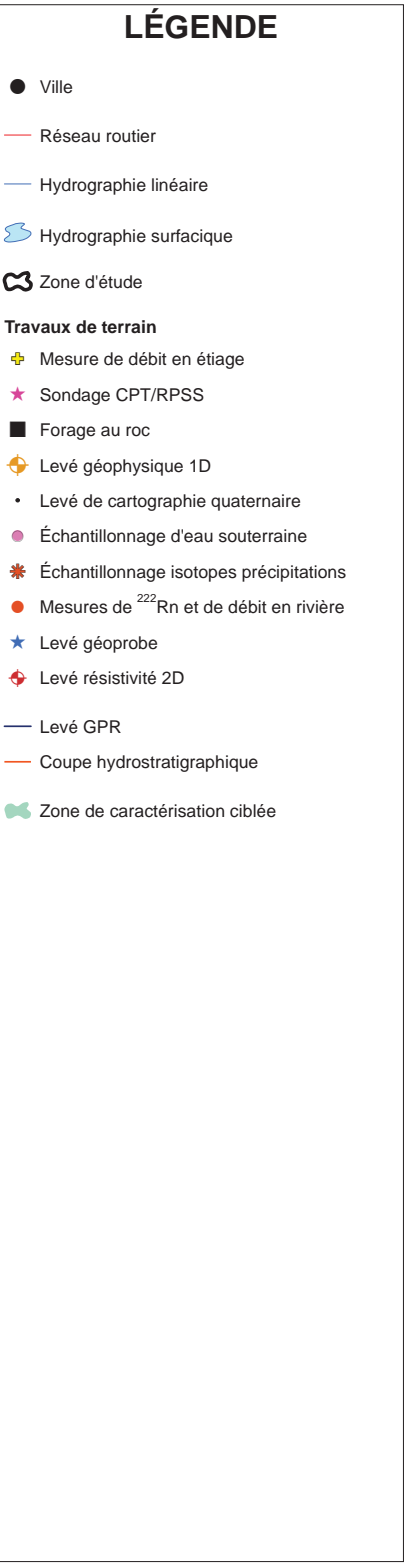
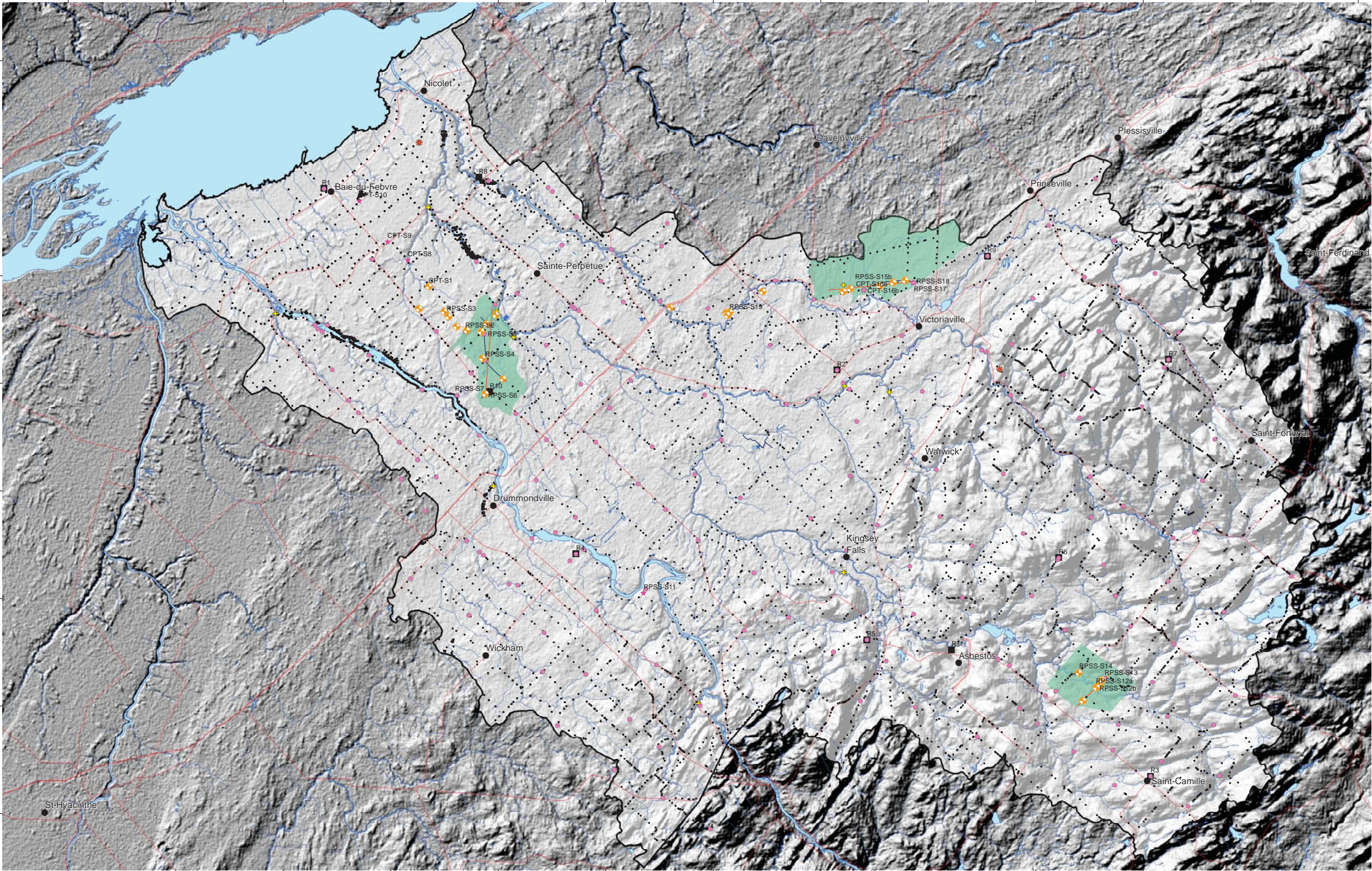
Trois sites représentant des contextes hydrogéologiques types (vallée de rivière appalachienne, zone de recharge au centre du secteur d'étude et zone semi-captive plus en aval) ont été sélectionnés afin d'y réaliser une caractérisation et une instrumentation plus intensive (**Carte 14**). Certains des piézomètres décrits à la **Section 3.2.3** ont été installés sur ces sites pour former des profils le long des lignes d'écoulement probable de l'eau souterraine. Une modélisation des écoulements souterrains de chacun des trois contextes types est en cours dans le cadre du projet de MSc d'Olivier Ferland à l'UQAM. Les résultats permettront notamment de valider la variation temporelle de recharge ainsi que la dynamique de l'eau souterraine dans les trois contextes hydrogéologiques.

Au cours de l'été 2013, deux stations limnimétriques munies d'une sonde automatisée de mesure du niveau de l'eau (sonde Solinst) ont été installées. Ces stations permettront d'obtenir des séries temporelles du niveau de la rivière, mais aucune courbe de tarage n'y sera associée. Les deux stations sont localisées dans la zone 1 et la zone 3. Dans la zone 1, la station est située sur la rivière Nicolet du sud-ouest près de Wotton, tandis que dans la zone 3, la station est située sur la rivière des Saouls près de sa jonction avec la rivière Nicolet du sud-ouest. L'ensemble de ce travail s'intègre au projet de maîtrise en sciences de la Terre d'Olivier Ferland. L'avancement de ces travaux ont fait l'objet de deux présentations par affiche : l'une à GéoMontréal au début octobre 2013 (Ferland et al., 2013) et l'autre (Ferland et al., 2014) au colloque annuel du RQES au congrès de l'ACFAS en mai 2014 (**Annexe 3**).

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 du débit des rivières en période d'étiage ont été prises dans les certains tronçons de rivières où les débits ne sont pas mesurés par le CEHQ. Des mesures de débits ont été réalisées de manière ponctuelle à 24 sites (**Carte 14**). La vitesse de l'eau a été mesurée à l'aide d'un vélocimètre de marque Swoffer (modèle 1200) et le débit a été calculé à l'aide de la méthode des sections transversales.

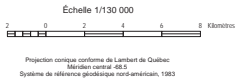
Des séries temporelles de débits de base ont aussi été fournies par le CEHQ pour six stations hydrométriques: une sur la rivière Nicolet, une sur la rivière Nicolet Sud-Ouest, une sur la rivière à Pat, une sur la rivière Danville et deux sur la rivière Saint-Germain. Le CEHQ a utilisé le filtre d'Eckhardt (Poirier, 2012) pour estimer le débit de base.



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES
Section 3.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

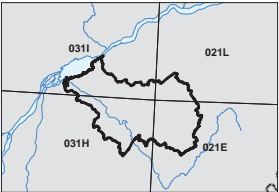
Carte 14 Travaux de terrain
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Travaux de terrain: UQAM

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE

Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/130 000 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 données 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée:
Larocque, M., Gagné, S., Barthelet, D., Meyzonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de caractérisation des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.

3.3 Saisie, validation et archivage des données

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 MERN 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
MERN	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 *Contexte général*

La zone d'étude est couverte par deux provinces géologiques, soit la plate-forme des Basses-Terres du Saint-Laurent et la zone taconienne de l'orogène appalachien. La faille de Logan (d'orientation NE-SO) sépare les deux domaines géologiques. Le roc affleure principalement dans le secteur amont du bassin où les nappes externes affleurent sur la plus grande partie du secteur au-dessus de l'altitude de 200 m. Vers l'aval, l'épaisseur de la couverture quaternaire augmente. La portion moyenne et basse est localisée sous les dépôts quaternaires. Les roches affleurent surtout au niveau des rivières. Elles sont principalement de nature détritique et certaines, comme celles du Groupe de l'Utica (shale de l'Utica), ont des contenus en matière organique élevés et constituent ainsi une sources d'hydrocarbures (principalement sous forme de gaz).

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 Slivitzky et Saint-Julien (1987) pour la zone appalachienne. L'ensemble de la séquence cambro-ordovicienne est reconnu dans les forages profonds régionaux. En surface, les groupes stratigraphiques d'importance sont les roches sédimentaires du Groupe de Sainte-Rosalie (ardoise et dolomie), celles du Groupe de Lorraine (calcaire et shale de la formation de Pontgravé, puis shale et grès de la Formation de Nicolet), puis celles du Groupe de Queenston (shale rouge et grès verts). Au-delà de la ligne de Logan, entre les Basses-Terres et le piémont, on retrouve le domaine des nappes externes avec, sur la partie est, les Olistostromes de la rivière Etchemin et de Drummond (schiste à blocs), sur la partie nord, le Groupe de Sillery (schistes) et plus au sud, la Formation de Bulstrode et de Melbourne (ardoise calcareuse). Pour la partie appalachienne dans le domaine des nappes internes, on retrouve au nord le Groupe de Oak Hill comprenant huit formations de lithologies distinctes (schistes, quartzite, dolomie, phyllade) ainsi que les Schistes de Sutton-Bennett (schiste à chlorite) et sur la partie sud des Appalaches, le Domaine Océanique avec les complexes ophiolitiques, la Formation de Saint-Daniel (Bloc et ardoise) puis la formation de Saint-Victor (schiste, ardoise, grès).

La zone d'étude compte ainsi 26 formations géologiques présentes à l'affleurement et dans les premiers 100 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 (**Carte 15**).

- 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 calcaireux. Ces calcaires sont coquinoïdeux 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 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.
- 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 Mawcook comprend surtout des ardoises rouges avec lesquelles se retrouvent quelques niveaux d'ardoise verte et de grès.
- La Formation de Granby se compose de grès feldspathique gris à gris verdâtre interlité d'ardoise rouge, verte et grise. Les grès sont granoclassés et montrent parfois des laminations obliques.
- Le Groupe de Stanbridge comprend trois unités stratigraphiques. La séquence inférieure comprend un assemblage de roches carbonatées surmonté d'une unité de calcaire et de conglomérat calcaire, puis, au sommet de cette unité inférieure, un assemblage d'ardoises argileuses et dolomitiques contenant de petits lits de grès, de calcaire, de conglomérat calcaire et de dolomie silteuse. L'unité stratigraphique intermédiaire se compose de rythmes de siltstone laminé, d'argilite et de mudstone. L'unité supérieure comprend de l'ardoise pyriteuse à lamines argileuses et des niveaux d'ardoise avec de petits lits de grès silteux verdâtre.
- 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 calcaireuse 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 calcaireux, en bancs massifs ou laminés.

- La Formation de Sainte-Sabine se compose d'une alternance d'ardoises et de sédiments détritiques.
- L'Olistostrome de Drummondville se compose de blocs de calcaire cristallin, d'agglomérats volcaniques et de laves à amygdules dans une matrice de shale.
- 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.
- Le Groupe de Caldwell se divise en deux unités stratigraphiques : à la base, l'unité A se compose surtout de grès feldspathique vert avec des interlits d'ardoise verte, de roches volcaniques intermédiaires à basiques, d'ardoise rouge avec des interlits de grès feldspathique rouge et des lits d'orthoquartzite. Au sommet, l'unité B est formée d'un assemblage d'ardoise avec des interlits d'orthoquartzite vert.
- Le Groupe de Rosaire se compose de quartzite blanc, gris, noir et chamois, de grès feldspathique et de siltstone interstratifié avec du schiste ardoisier noir, gris et vert. Ces lithologies se présentent en lits dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres.
- Les Schistes de Sutton-Bennett désignent des assemblages de roches métamorphiques appartenant aux Groupes de Oak Hill, Caldwell et Rosaire. Aucune connotation stratigraphique ne peut donc leur être attribuée. Ces assemblages se composent de schiste à chlorite, de grès vert interlité de shale vert, et de phyllage rouge.
- Les complexes ophiolitiques représentent les vestiges d'une ancienne croûte océanique et du manteau supérieur formés au Cambrien et mis en place à l'Ordovicien inférieur. La séquence ophiolitique peut être divisée en quatre faciès : une péridotite tectonique, une phase cumulat, une unité de volcanites et une amphibolite.
- La Formation de Saint-Daniel est composée d'un mélange ophiolitique dont la matrice est constituée d'une ardoise à blocs et à l'intérieur duquel on retrouve des blocs ou copeaux de grès, de volcanites acides et basiques, de trachyte, de granitoïde, de gabbro et de serpentine.

- La Formation de Saint-Victor est une séquence à turbidites formée de schiste ardoisier avec des interlits de grès feldspathique, de grès lithique, de tuf acide et de conglomérat en lits d'épaisseur décimétrique.
- La Formation de Lac Aylmer est constituée par un conglomérat de base alternant irrégulièrement avec des grès, des siltstones et des shales, une séquence alternante de grès et de siltstones, et une alternance très régulière de calcaire plus ou moins pur avec des siltstones calcaireux.
- Les intrusifs gabbroïques se composent surtout de gabbro, de yamaskite et d'essexite.
- Le Groupe de Saint-Roch correspond à la Formation de Saint-Roch définie par Hubert (1967). Il est composé d'une unité de grès verts d'âge cambrien inférieur.

Tableau 14 Stratigraphie des unités géologiques

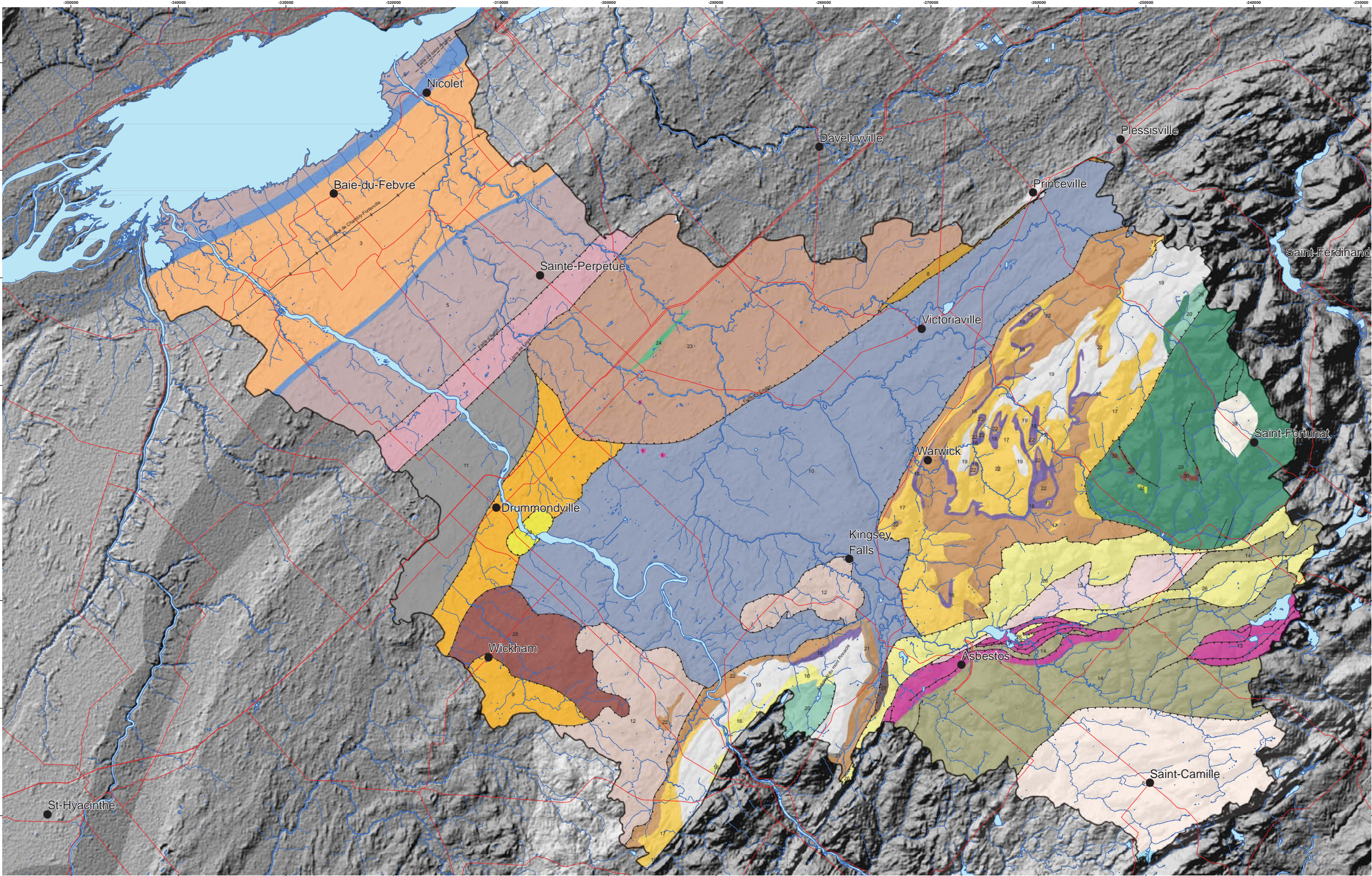
Groupe	Formation	Époque	Lithologie
-	Intrusifs (collines montérégiennes)	Crétacé inférieur	Roches alcalines, kimberlite, brèches associées
-	Lac Aylmer	Silurien supérieur	Calcaire
Queenston	Bécancour	Ordovicien supérieur	Shale rouge, grès vert
Lorraine	Pontgravé	Ordovicien supérieur	Calcaire, shale
Lorraine	Nicolet	Ordovicien supérieur	Shale, grès
Rosaire	-	Cambrien moyen à supérieur	Quartzite et schiste ardoisier
Magog	Saint-Victor	Ordovicien moyen à supérieur	Schiste ardoisier, grès et tuf felsique
-	Olistostrome riv. Etchemin	Ordovicien moyen	Shale et mudstone à blocs polygéniques
-	Olistostrome de Drummondville	Ordovicien moyen	Shale et mudstone à blocs polygéniques
Sainte-Rosalie	Sainte-Sabine	Ordovicien moyen	Ardoise, dolomie
-	Bulstrode et Melbourne	Ordovicien moyen	Ardoise, calcaire
-	Bourret	Ordovicien moyen	Ardoise, calcaire, grès
Stanbridge	-	Ordovicien inférieur à moyen	Non différencié
-	Saint-Daniel	Cambrien à Ordovicien inférieur	Mélange à blocs et copeaux de trachyte
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 inférieur à moyen	Phyllade
Shefford	Granby	Cambrien inférieur	Grès feldspathique et ardoise
Shefford	Mawcook	Cambrien inférieur	Ardoise rouge et verte
Caldwell	-	Cambrien inférieur	Ardoise, grès feldspathique
	Shiste de Sutton-Bennett	Néoprotérozoïque à Ordovicien	Schiste à chlorite

4.1.3 Géologie, structure et fracturation

D'un point vu structural, la zone d'étude est traversée par plusieurs failles et plis d'orientation nord-est/sud-ouest. 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 (Saint-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 à -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 (**Figure 6**). Les roches des Basses-Terres du Saint-Laurent sont quant à elles légèrement plissées et forment le large synclinal de Chambly-Fortierville. 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. Des failles locales sont aussi présentes dans le secteur d'Asbestos le long du complexe ophiolitique. Ces dernières créent de fortes variations de la topographie du socle rocheux. Sur la **figure 6**, 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 lithologie dans le système étudié, cela ayant été confirmé par les forages du roc réalisés durant le projet. L'impact des structures géologiques sur l'écoulement des eaux souterraines est peu connu, mais les roches du Domaine para-autochtone proches de la Faille d'Aston (Groupe de Sainte-Rosalie) et celles de certaines nappes (Groupe de Stanbridge notamment) sont fortement déformées et représentent des zones potentiellement fracturées à fort potentiel hydrogéologique. Aucune tendance verticale de la densité de fracture n'a été observée parmi les 11 puits installés. Des fractures productives ont été identifiées aux puits NSF-R3 et NSF-R10.



LÉGENDE

● Ville

— Réseau routier

— Hydrographie surfacique

— Hydrographie linéaire

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

Crétacé inférieur

1 - Intrusifs

Silurien supérieur

2 - Formation de Lac Aylmer

Ordovicien supérieur

3 - Formation de Bécancour

4 - Formation de Pontgravé

5 - Formation de Nicolet

Ordovicien moyen à supérieur

6 - Formation de Saint-Victor

Ordovicien moyen

7 - Formation de Sainte-Sabine

8 - Olistostrome de la rivière Etchemin

9 - Olistostrome de Drummondville

10 - Formation de Bulstrode

11 - Formation de Bourret

Ordovicien inférieur à moyen

12 - Groupe de Stanbridge

Cambrien à Ordovicien inférieur

13 - Complexes ophiolitiques

14 - Formation de Saint-Daniel

Cambrien moyen à supérieur

15 - Groupe de Rosaire

Cambrien inférieur à moyen

16 - Formation de Pinnacle

17 - Formation de Gilman

18 - Formation de Dunham

19 - Formation de West Sutton

20 - Formation de Tibbit Hill

21 - Formation de Sweetsburg - Schiste à chlorite

22 - Formation de Sweetsburg - Ardoise et quartzite

Cambrien inférieur

23 - Groupe de Sillery

24 - Groupe de Saint-Roch

25 - Formation de Mawcook

26 - Groupe de Caldwell - Grès feldspathique

27 - Groupe de Caldwell - Ardoise

28 - Formation de Granby

Neoproterozoïque à Ordovicien

29 - Schiste de Sutton-Bennett - Schiste à chlorite

30 - Schiste de Sutton-Bennett - Type Groupe de Oak Hill

31 - Schiste de Sutton-Bennett - Grès et shale verts

32 - Schiste de Sutton-Bennett - Type Groupe de Rosaire

Zone d'étude



MÉTADONNÉES
Section 4.1.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

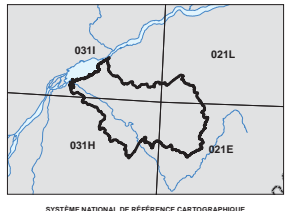
Carte 15 Géologie du roc ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC

0 2 4 6 8 Kilomètres
Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Métres central 48.5
Système de référence géodésique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K, Géologie
SIGEOM 250K
Géologie du roc: SIGEOM 250K
Linéaments: SIGEOM 250K

Réalisation :



Version bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barthelet, D., Mayonnat, G.,
Gervais, M., Chabot, M. A. 2015. Projet de connaissance
des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MOELCC.

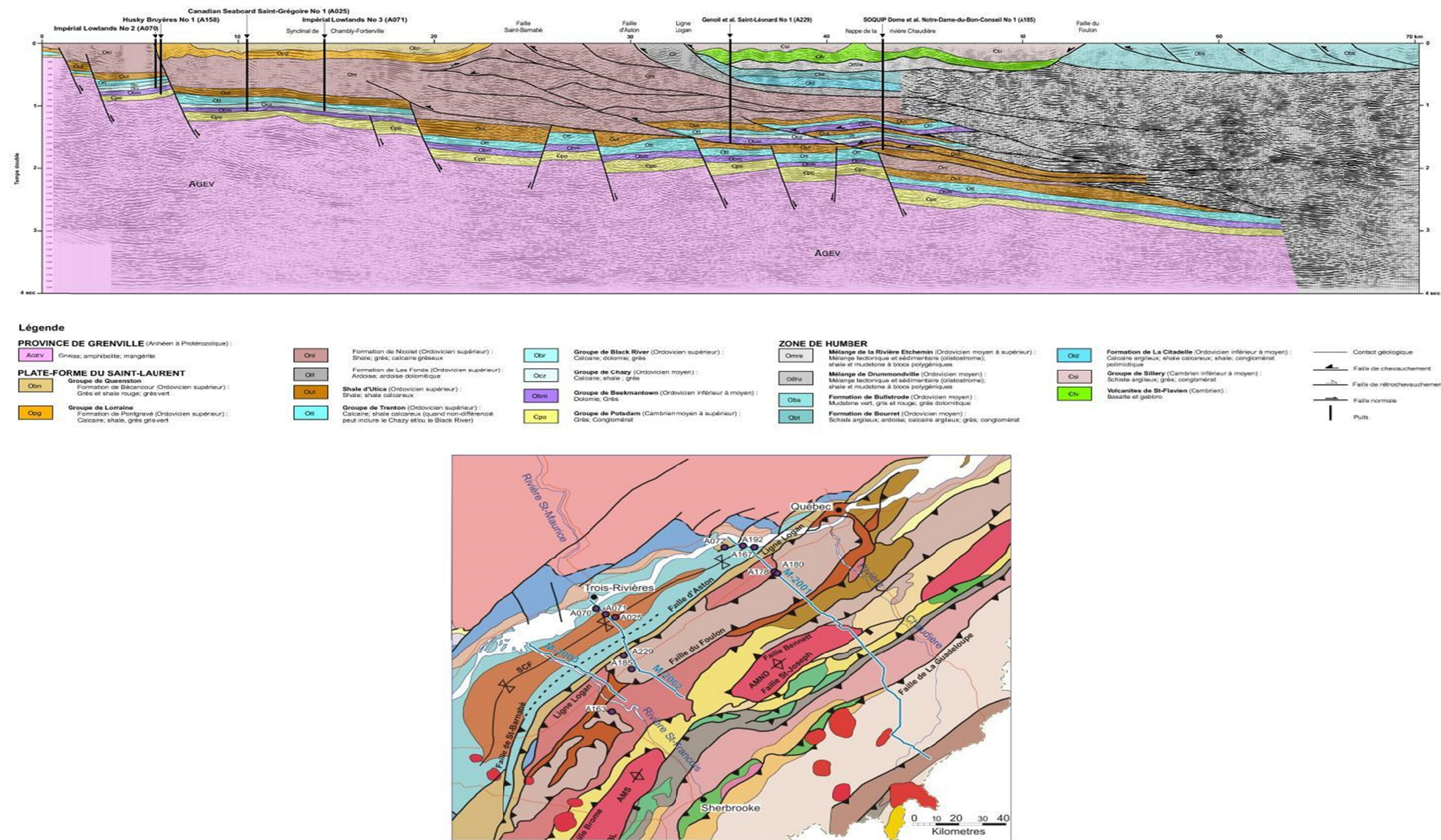


Figure 6 Coupe sismique montrant les différentes structures des formations géologiques de la zone d'étude (haut) et localisation de la coupe (bas) (modifiée de Castonguay et al., 2006).

4.2 Géologie du Quaternaire

Les travaux de caractérisation des dépôts meubles ont été réalisés en collaboration avec Michel Lamothe, professeur à l'UQAM. La campagne de terrain de 2012-2013 avait pour principal objectif de compiler les données disponibles et de les intégrer dans un SIG. Un deuxième objectif était de dresser l'inventaire des coupes stratigraphiques du territoire afin d'appuyer les études hydrostratigraphiques du présent Projet. En 2013-2014, une seconde campagne de terrain de cartographie systématique échelonnée sur dix semaines a permis d'investiguer en détail la zone d'étude, en sillonnant l'ensemble de son réseau routier. La campagne de cartographie a été réalisée par une équipe d'étudiants de l'UQAM: Marili Vincent-Couture, Frédérik Roberge, Florence Gagnon, et Simon Hébert. Ricardo Caceido (DESS SIG, UQAM) a cartographié de façon préliminaire le feuillet de Warwick (21E/13). Pierre-Marc Godbout a supervisé les premières semaines de terrain. Guillaume St-Jacques a eu la responsabilité d'intégrer toutes les informations de cartographie numérique. Marc-André Hurtubise et Mélina Dubois-Verret ont contribué à la réalisation de la carte des dépôts meubles. L'ensemble des travaux a fait l'objet d'un rapport déposé au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (Lamothe et Saint-Jacques, 2014).

4.2.1 *Histoire du Quaternaire*

L'histoire de la géologie quaternaire est étudiée depuis plus de 50 ans dans la région et la distribution des sédiments quaternaires a été cartographiée par plusieurs auteurs. Les premières études des dépôts quaternaires dans un contexte hydrogéologique sont le fruit du travail de Nelson Gadd de la Commission géologique du Canada, qui a résulté en une synthèse publiée en 1971 (Gadd, 1971). Plusieurs géologues et géomorphologues ont contribué à l'effort de cartographie quaternaire depuis lors (Warren et Bouchard, 1976; Chauvin, 1979; Gaucher, 1984; Lamothe, 1985; Parent, 1987).

Une séquence quaternaire stratigraphiquement complexe surmonte le socle rocheux, celle-ci pouvant atteindre plus de 100 m d'épaisseur au cœur des Basses-Terres et dans les sous-bassins où coulent des tributaires du fleuve Saint-Laurent. La séquence quaternaire comprend une succession de trois tills, séparés par des sédiments glaciolacustres fortement imperméables en raison de leur granulométrie, leur texture et 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 quaternaire de la zone d'étude peut être relativement complexe par endroits pour le secteur des Basses-Terres jusqu'au piémont et se simplifie généralement pour la partie appalachienne (Lamothe, 1989; Lamothe et al., 1992). Là où elle est la plus complexe, la séquence quaternaire peut comprendre une succession de deux à trois tills,

qui peuvent être séparés par des sédiments glaciolacustres imperméables, ou au contraire par des dépôts sableux très perméables, dont les épaisseurs varient selon la géomorphologie du terrain. L'unité de base est représentée par le Till de Bécancour, d'âge préSangamonien. L'unité glaciaire suivante est le Till de Lévrard, qui date du début de la glaciation Wisconsinienne. Le Till de Gentilly est le till de surface qui a été déposé lors de la dernière grande avancée glaciaire et il a recouvert l'ensemble de la région. Ce dernier affleure peu dans les Basses-Terres, car il est soit érodé dans les parties plus près du Lac Saint-Pierre, soit surmonté des sédiments de la Mer de Champlain au-dessus des élévations de l'ordre de 65 à 80 m. Ce till est corrélé au Till de Lennoxville dans les Appalaches, où la distribution en surface y est relativement continue.

Plus près du fleuve, des épaisseurs importantes d'argiles marines de la Mer de Champlain sont présentes et ces argiles sont apparentes en surface sur une bande de 20 km à l'intérieur des terres depuis le fleuve. Globalement, la couverture argileuse se réduit graduellement avec l'altitude et on estime que la présence des argiles de Champlain ne dépasse pas les 120 m d'altitude sur la zone à l'étude. Ces argiles sont partiellement ou totalement recouvertes par des dépôts sableux régressifs marins puis lacustres (Lac à Lampsilis), au fur que l'élévation diminue. Au centre du secteur, le remaniement des sables de régression par le vent a généré des dunes de sable (dépôts éoliens), qui sont particulièrement bien identifiées dans une large zone située entre Drummondville et Warwick. La géomorphologie de cette partie centrale du bassin, qui s'apparente à un haut plateau entre les élévations de 80 à 120 m, est caractérisée par la présence de sables en surface (éolien ou littoraux), d'argile ou de till sous-jacent imperméable, autour desquels se sont développées des tourbières qui sont concentrées à cet endroit. La présence en sub-affleurement de nombreuses, mais petites sablières constituées de Sables des Vieilles-Forges suggère que cette unité est relativement continue sous le till régional et même préservée là où le till peut avoir été érodé. Ces sables représentent la source la plus probable des accumulations littorales et éoliennes retrouvées dans les Basses-Terres.

Des dépôts sablo-graveleux fluvioglaciaires constituant des eskers et des moraines peuvent être épais et reposer directement sur le roc, particulièrement le long du contrefort des Appalaches. Les dépôts fluvioglaciaires de la Moraine des Hautes Terres Appalachiennes sont concentrés à proximité des vallées locales, en particulier le long de la rivière Saint-François, quelques kilomètres en amont de la limite de la zone d'étude. Dans les Appalaches, les dépôts quaternaires sont généralement moins épais, et les dépôts de till sur roc dominant la cartographie. Il peut cependant y avoir des dépôts quaternaires épais dans le cas de certaines vallées comme celle de la rivière Nicolet Sud-Ouest, à l'endroit où elle pénètre dans le Piémont Appalachien. Ces vallées sont comblées par une succession de dépôts glaciaires et glaciolacustres.

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

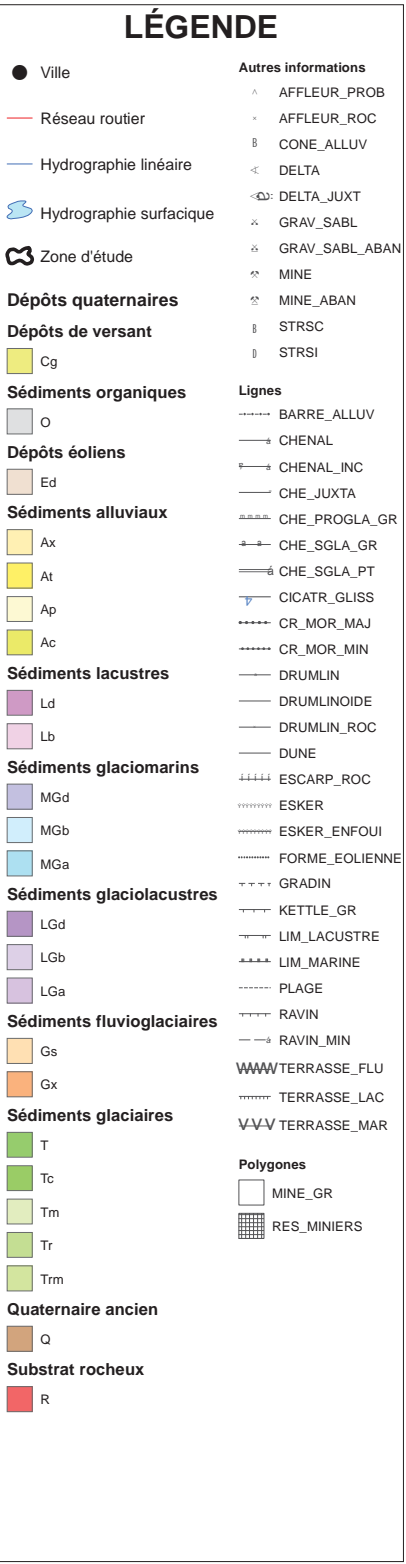
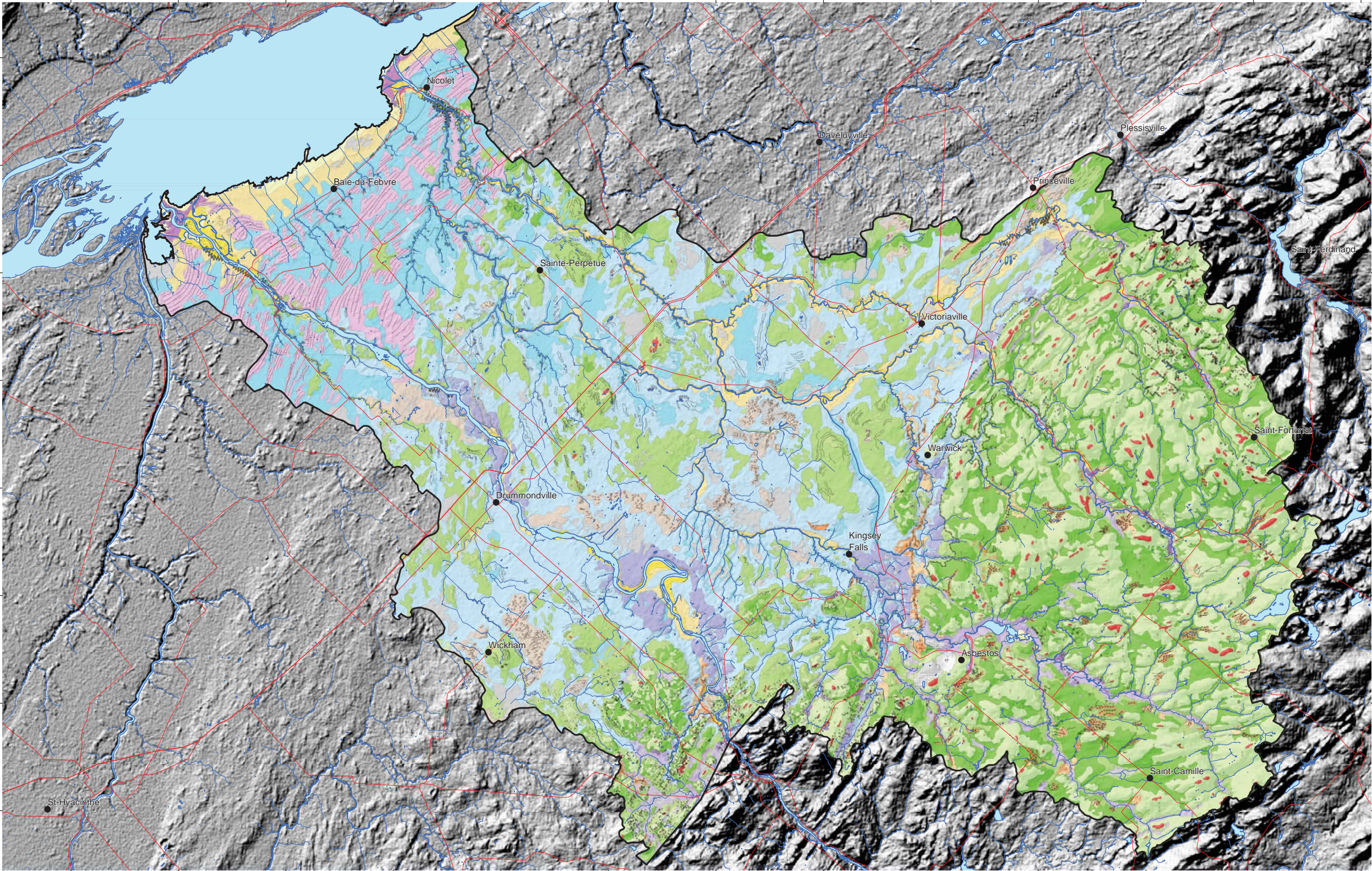
La **carte 16** illustre la répartition spatiale des dépôts quaternaires sur la zone d'étude. Cette carte est disponible en format vectoriel et image auprès du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. Les principales caractéristiques sédimentologiques et cartographiques des unités lithostratigraphiques de la région étudiées entre 2012 et 2014 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 Roc (R)

Le roc affleure sur moins de 1 % de la région à l'étude. Un till mince et un till remanié en couverture mince couvrent du roc observable sur près de 16 % de la surface du territoire étudié, essentiellement dans les secteurs élevés. La plate-forme paléozoïque des Basses-Terres du Saint-Laurent forme le sous-bassement rocheux de la partie basse de la zone cartographiée (Clark et Globensky, 1970, 1973, 1975, 1976; Globensky, 1987; Avramtchev, 1989). Le roc affleure de manière discontinue le long des principales rivières; Nicolet, Saint-François, Bulstrode, mais aussi de certains de leurs affluents ; rivière Noire, rivière Des Rosiers, rivière des Pins, rivière des Saults, ruisseau Gobeil et ruisseau Michaud. La portion haute du bassin est occupée par les roches du domaine océanique, dit des nappes internes des Appalaches, et la partie intermédiaire par la zone dite des nappes externes, appartenant principalement au domaine continental. La couverture quaternaire y est principalement glaciaire et fluvioglaciaire. Le roc y affleure de façon importante. Dans le secteur appalachien directement au nord-est de Warwick, une carrière expose un régolite sous-jacent à des sables fluvioglaciaires.

Tableau 15 Stratigraphie des dépôts meubles

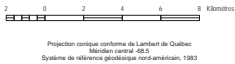
Contexte hydrogéologique	Unité géologique	Unité hydrostratigraphique
	Cg	
	Ot	
	O	
	Ed	
Unité perméable	Ap	
	Ac	U1
	At	
	Ax	
	Ld	
	Lb	
Unité perméable	MGb	
	MGd	
	MG	
Unité imperméable	MGa	U2
	MG	
	MGa	
	Gx	
Unité perméable	G	U3
	Trm	
	Tr	
	Tf	
	Tm	
Unité imperméable	Tc	U4
	G	
	LGa	
Unité perméable	LGd	
	La	
Unité imperméable	A et O	U5
	MGa	
	Tc	
	LGa	
Unité perméable	A	
	LGa	
Unité imperméable	Tc	
	A	



MÉTADONNÉES

Section 4.2.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 16 Géologie du Quaternaire
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Géologie du Quaternaire : Lamothe et
St-Jacques, 2014

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 données 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'attaché 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., Barmetsh, D., Meyzonnat, G., Gravelle, M., H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.

Le Quaternaire ancien (Q)

Dans la portion aval et centrale de la zone d'étude, cette unité complexe affleure de façon ponctuelle le long des tributaires importants du fleuve tel les rivières Nicolet, Nicolet Sud-Ouest et Saint-François. Régionalement, l'unité quaternaire la plus ancienne que l'on peut y observer est généralement le till de Bécancour. Celui-ci est surmonté de sédiments non glaciaires constitués des Varves de Pierreville, des Sables de Lotbinière et des Varves de Deschaillons. La seconde unité glaciaire, le Till de Lévrard, est quant à elle surmontée des sédiments non glaciaires de St-Pierre et des Sables des Vieilles-Forges. Un aspect très important de la stratigraphie régionale est la présence relativement généralisée des Sables des Vieilles-Forges dans une grande partie du secteur de la plaine centrale, de la terrasse de Saint-Barthélemy jusqu'à la Moraine des Hautes-Terres. Cette unité est apparemment aggradationnelle sur une bonne partie de ce secteur et sa préservation a des implications claires en termes d'hydrogéologie. Cette dernière unité est reconnue par sa nature communément déformée, son contenu variable en matière organique et sa position stratigraphique qui est clairement sous le Till de Gentilly le long de coupes de rivières (Nicolet, Nicolet Sud-Ouest, Saint-François, et ailleurs dans le bassin comme à la rivière Bécancour). Des mesures en luminescence suggèrent que l'âge de cette unité est de l'ordre de 45 ka (Godbout et al., 2011). Les Sables des Vieilles-Forges sont observés dans de nombreux bancs d'emprunts au sein de formes de terrain suivant grossièrement l'axe nord-ouest/sud-est. Dans la portion amont du bassin versant, soit dans les Appalaches, le till de Johnville constitue généralement l'unité quaternaire la plus ancienne reconnue et il est normalement surmonté de la Formation de Massawippi. Ces unités ne sont pas observées dans le secteur. Le site de Norbestos expose la succession Till de Chaudière - Formation de Gayhurst - Till de Lennoxville. Le faciès sableux de la séquence de Gayhurst est relativement bien exposé dans le secteur de Wotton.

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

Le till de surface, qu'il soit mince ou continu, remanié ou non, couvre près de 60 % du territoire à l'étude. Ce diamicton glaciaire affleure surtout dans le secteur appalachien et celui du piémont, soit dans la portion orientale du bassin versant. Les épaisseurs observées vont de 0,3 m (Tm) à plus de 20 m (Tc) dans les Basses-Terres, 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. De façon générale, le till possède une très grande proportion de matrice argilo-silteuse par rapport à son contenu en clastes. Dans les Basses-Terres et le piémont, le till non altéré est gris-verdâtre, compact, normalement non fissile, carbonaté et contient des clastes d'origine précambrienne. Dans la région appalachienne, le till 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 (Go, Gs, Gx)

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. Répartis de façon très inégale sur le territoire à l'étude, ils sont essentiellement concentrés au sein de l'esker de Warwick-Asbestos et des différents complexes morainiques.

L'esker de Warwick-Asbestos, orienté selon un axe nord-sud, est situé à la limite de l'ensemble physiographique des Basse-Terres et des Appalaches. Ce complexe fluvioglaciaire consiste en une série de segments d'esker diachroniques mis en place au front glaciaire lors de sa régression vers le nord suite à sa stagnation ayant formé la moraine de Ulverton-Tingwick (Parent, 1987). Cette dernière est rattachée à la moraine des Hautes-Terres de Gadd (1964). De constitution typique, l'esker est formé de lobes d'épandages subaquatiques (Gs) mis en place de façon distale d'un tronçon principal formé de crête unique (Gx). L'épaisseur de ces dépôts est généralement d'une vingtaine de mètres sauf à la colline Elliott où un delta-kame a mis en place des dépôts sur une quarantaine de mètres d'épaisseur. Il est à noter qu'à l'exception du delta-kame de la colline Elliott, tous les dépôts de l'esker Warwick-Asbestos reposent sous la limite marine (165 à 175 masl).

Deux complexes morainiques sont présents sur le bassin versant des rivières Nicolet et Saint-François; le plus ancien, situé plus à l'est, comprend la moraine du mont Ham, alors que la moraine de Ulverton-Tingwick, plus récente, est située plus à l'ouest. Ces deux complexes sont tous deux constitués de sédiments de contact glaciaire (Gx) formant de courts tronçons morainiques bordés de chenaux de fonte juxtaglaciaires. La moraine du mont Ham, particulièrement bien développée dans la région d'Asbestos, se distingue par une série discontinue de crêtes morainiques adossées sur des reliefs locaux appalachiens. L'édification de deltas de contact glaciaire à des altitudes de 265 à 270 masl, ainsi que de nombreuses autres évidences de terrain, prouvent que ce complexe morainique fut mis en place de façon synchrone avec l'extension maximale de la phase Sherbrooke du lac glaciaire Memphrémagog. La moraine Ulverton-Tingwick est caractérisée par deux segments qui se distinguent de par la morphologie et la taille granulométrique de ses dépôts. Cette différence est attribuable à l'environnement de la marge glaciaire lors de la construction de ces formes terminales. La présence de lacs proglaciaires, leur profondeur et leur étendue déterminent le type de formes qui sera mis en place. Lorsqu'il y a présence de lacs profonds, occupant de vastes superficies, on retrouve

d'avantage d'épandages subaquatiques alimentés par de petits eskers. Les rares segments morainiques y sont particulièrement discontinus. À l'opposé, dans un environnement où les lacs proglaciaires ayant affecté la marge glaciaire sont petits et peu profonds, les crêtes morainiques sont beaucoup plus nombreuses et constituées de crêtes de tills remaniés par les chenaux de fonte juxtaglaciaires.

Le segment morainique Ulverton dont l'extrémité nord est marquée par la colline Eliott est particulièrement discontinue et essentiellement constituée d'épandages subaquatiques alimentés par de petits systèmes d'eskers. Cette morphologie typique est attribuable à la phase de Fort Ann du lac Memphrémagog (251-254 masl) qui a affecté la marge glaciaire sur presque l'ensemble de ce segment.

Le segment Tingwick qui s'étend entre la colline Eliott et Notre-Dame-de-Ham est beaucoup mieux développé, bien que la présence de deltas de contact glaciaire révèle la présence de lacs proglaciaires jusqu'à des altitudes de 225 à 230 masl. Ce tronçon est constitué d'une série de crêtes de till remanié et de chenaux de fonte juxtaglaciaire adossés sur les versants des collines constituant le piémont appalachien.

Les sédiments glaciolacustres (LGd, LGb, LGa)

Les sédiments glaciolacustres se retrouvent essentiellement dans la portion amont du bassin versant à l'étude. Ces sédiments sont présents sous forme de sable, sable silteux et de gravier sableux (LGb) au bas des versants de plusieurs vallées. On y retrouve aussi, mais plus rarement, des silts et des rythmites (LGA) issus d'un plan d'eau plus profond. De nombreux deltas (LGd) ont été mis en place à l'embouchure de cours d'eau qui se déversaient dans les lacs proglaciaires et ont été identifiés sur la base de leur morphologie et de la nature des leurs matériaux

Les altitudes atteintes par les différentes phases glaciolacustres sont essentiellement observables par le remaniement des matériaux de surface et la formation de quelques gradins d'érosion. Les altitudes relatives des deltas sont cohérentes avec les différentes phases et épisodes glaciolacustres. Le retrait glaciaire vers le NNO sur les plateaux et le piémont appalachien est marqué par la moraine du mont Ham. Cette régression permet l'expansion des lacs proglaciaires Vermont (phase de Fort Ann; max. 251 à 254 masl) et Memphrémagog (phase Sherbrooke; max. 270 masl). Le recul du front jusqu'à sa position des moraines Ulverton-Tingwick et la déglaciation progressive des Basses-Terres du haut Saint-Laurent permet par coalescence la formation du Lac à Candona.

Les sédiments glaciomarins (MGd, MGb, MGA)

À partir du front appalachien, et ce jusqu'au fleuve Saint-Laurent, affleurent sur environ 27 % du territoire 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 et localisés sous l'élévation de 175 m (Parent, 1987) sont aussi cartographiés comme glaciomarins. Les sédiments deltaïques glaciomarins (MGd) sont essentiellement concentrés au sein de larges épandages situés en marge du piémont appalachien p. ex. à l'ouest de l'esker Warwick-Asbestos et sur les rives de la rivière Saint-François. À l'est et au sud-ouest, le sommet des deltas approche la limite maximale glaciomarine, tandis que sur les rives de la Saint-François, ils se situent entre 110 et 130 masl.

Les sédiments glaciomarins littoraux et pré littoraux (MGb) comprennent généralement des sables et des silts sableux grisâtre à brunâtre et montrent parfois des signes d'oxydation. Cependant, certaines lignes de rivages constituées de plages contiennent des sables graveleux. Certaines de ces plages tirent leur origine du remaniement des Sables des Vieilles-Forges sous-jacents. Les sédiments d'eau profonde (MGa) sont surtout constitués de silt, de silt argileux et d'argiles silteuses parfois laminées et comprenant localement des rythmites. Dans la portion amont du bassin versant, ils sont concentrés le long d'anciens chenaux tandis que dans la portion aval, ils sont concentrés où la tranche d'eau a été supérieure à 35 à 45 m.

Les sédiments lacustres (Ld, Lb)

Sous les élévations d'environ 65 m, on observe de grandes zones sableuses mises en place par les eaux douces du Lac à Lampsilis (Lb). L'exondation du territoire est marquée par la présence de plusieurs niveaux de plages et terrasses. À l'embouchure des rivières Nicolet et Saint-François, des deltas (Ld) se sont formés lors d'un niveau tardif du Lac à Lampsilis. La terrasse de Saint-Bathélemy à l'élévation de 16 masl surplombe la plaine moderne d'inondation du Lac Saint-Pierre.

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

Les sédiments d'origine fluviale, localisés à une élévation légèrement supérieure à celle du système de drainage actuel, sont cartographiés sur environ 3 % du territoire à l'étude comme sédiments alluviaux. Ces derniers sont majoritairement concentrés tout le long de la rivière Nicolet, Nicolet Sud-ouest, Saint-François et de leurs principaux affluents. 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)

Les sédiments éoliens sont essentiellement 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 10 m sont développées suivant l'axe NE-SO. Les sédiments éoliens sont généralement constitués de sables moyens à fins, très bien triés et stratifiés. Ils sont très bien représentés entre Sainte-Clothilde-de-Horton et Wickham.

Les sédiments éoliens sont fréquemment observés autour des unités de tourbières, où l'activité éolienne a ainsi remanié le matériel granulaire disponible jusqu'à son immobilisation par la végétation.

Les sédiments organiques (O)

Les sédiments organiques observés régionalement sont surtout des tourbières. Leur répartition est assez vaste et reflète leurs modes variés de formation. Généralement, il y a un lien entre l'unité sous-jacente et la densité de tourbières. Dans la zone d'étude, 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, elles-mêmes localisées sous-jacentes à des sables d'exondation marine. Cependant, certains des sédiments organiques se retrouvent également sur de faibles épaisseurs de sédiments littoraux glaciomarins, 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 Nicolet, Nicolet Sud-Ouest et Saint-François. Cette unité est constituée de silt et d'argiles remaniées par des glissements de terrain. Elle occupe le plus souvent des amphithéâtres de glissement de terrain marqués par des modelés chaotiques ou en gradins. Ces dépôts de nature argilo-silteuse sont essentiellement issus de la Mer de Champlain. Cependant, la nature sédimentaire de ces dépôts est aussi influencée par la nature du matériel sus-jacent, généralement littoral ou périlittoral du lac à Lampsilis.

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 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 l'**annexe 5** pour le détail des levés géophysiques).

À la base de la construction du modèle 3D, plus de 10 000 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 forages réalisés dans le cadre du projet, les données stratigraphiques issues de rapports de consultants, les données extraites de la base de données du MTQ ainsi que les levés géophysiques, constituent les données les plus fiables pour le modèle 3D régional. À partir de ces données, 170 coupes topogéologiques ont été réalisées sur la zone Nicolet/Bas-Saint-François à l'aide du logiciel GMS10.0. 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.

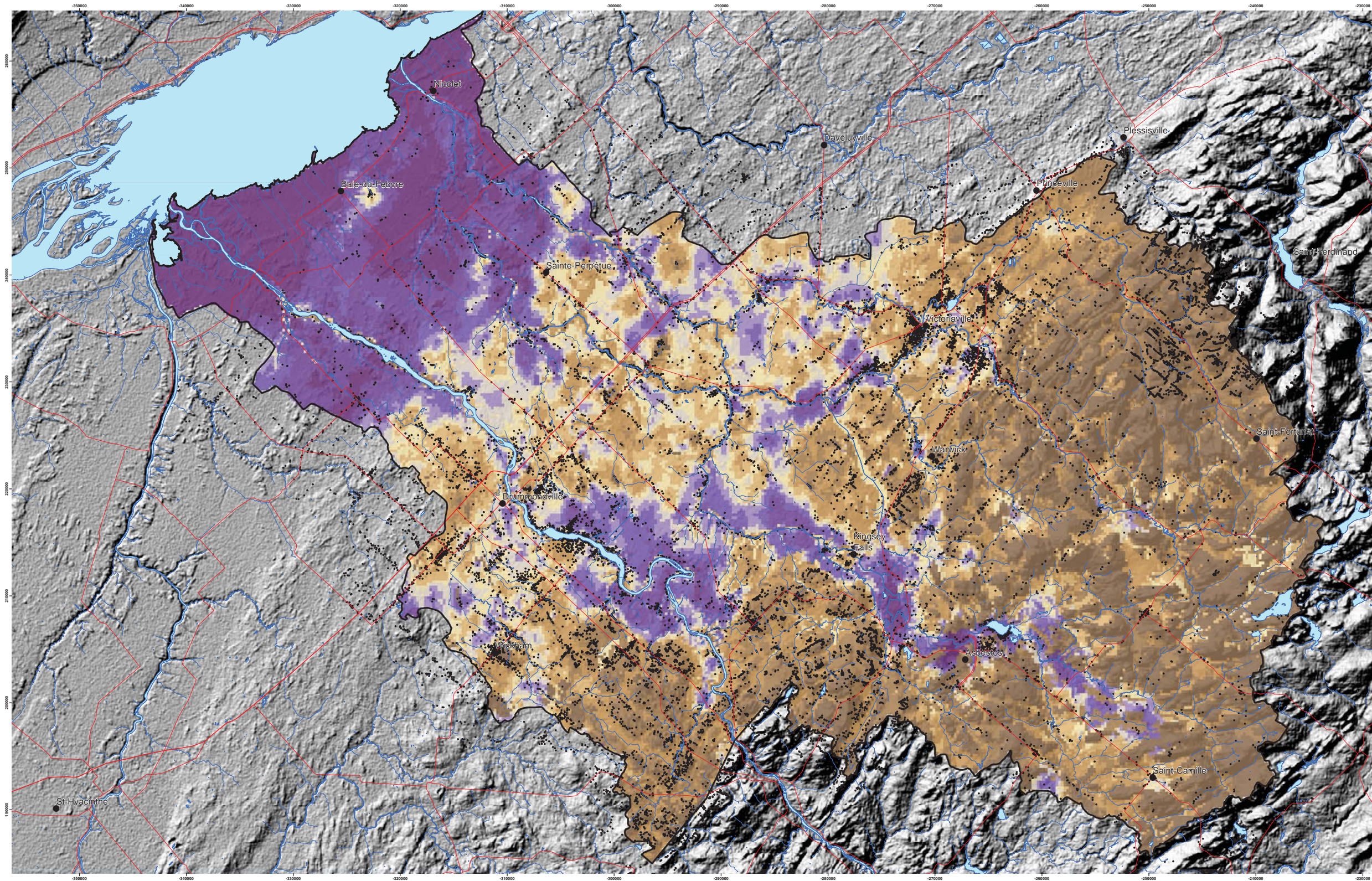
Épaisseur des dépôts meubles

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 (**Carte 17**). 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 9** décrit comment cette carte a été réalisée.

La portion aval de la zone d'étude est l'endroit où l'épaisseur des dépôts meubles est la plus importante, plus précisément dans le secteur de la partie aval de la rivière Saint-François. À cet endroit, l'épaisseur des dépôts peut atteindre 80 m. Très peu de forages atteignent le roc dans cette région. Toutefois, des données provenant de la base de données du SIGPEG confirment que des profondeurs importantes de dépôts meubles sont réellement présentes dans ce secteur. Dans les Appalaches, la vallée de la rivière Nicolet du sud-ouest est la seconde zone où l'épaisseur des dépôts meubles peut dépasser 50 m. Les déformations tectoniques de la roche dans ce secteur ont formé des dépressions qui ont été remplies par des sédiments, notamment dans la portion comprise entre Kingsey Falls et Asbestos (secteur des Trois-Lacs). Un troisième secteur, de moindre importance, est situé dans l'axe de la ligne de Logan (cf. **section 4.1.3**) entre Saint-Léonard d'Aston et Sainte-Brigitte-des-Saults. À Saint-Léonard-d'Aston, le roc s'enfonce à plus de 30 m sous la surface de la rivière Nicolet. L'étendue spatiale de cette déformation semble être limitée à la rivière elle-même. À Sainte-Brigitte-des-Saults, le roc s'enfonce vers l'ouest à partir du village de Sainte-Perpétue pour remonter ensuite quelques kilomètres à l'ouest de la rivière Nicolet. Des levés géophysiques et des sondages Geoprobe réalisés près de la rivière Nicolet sud-ouest, à Sainte-Brigitte-des-Saults, ont mis en évidence une profondeur du roc de plus de 30 m, validant ainsi les observations stratigraphiques du puits municipal de Sainte-Perpétue. Le maillage au 250 m de la carte d'épaisseur des dépôts rend difficile la mise en évidence de la profondeur réelle du roc, notamment dans le secteur de Saint-Léonard-d'Aston. Les coupes stratigraphiques présentées plus bas dans cette section permettent de mieux visualiser l'épaisseur des dépôts dans ces zones.

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 (élévation maximale de 681 m) vers le fleuve Saint-Laurent (élévation minimale de -75 m), à l'exception de certaines zones des vallées des rivières Nicolet et Nicolet du sud-ouest et de la zone formant l'exutoire de la rivière Saint-François (**Carte 18**). Le réseau hydrographique n'a pas creusé la roche en place de manière significative. Dans la portion aval de la zone d'étude, là où les formations géologiques sont les moins résistantes à l'érosion (notamment la formation de Bécancour) les rivières Nicolet et Saint-François ont creusé leur lit dans le roc à moins de 10 m de profondeur.



LÉGENDE

- Villes
- Réseau routier
- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- Zone d'étude

Épaisseur des dépôts meubles (m)

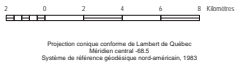
0 - 1
1 - 3
3 - 6
6 - 9
9 - 11
11 - 14
14 - 17
17 - 22
22 - 30
30 - 80

- Forages et affleurements



MÉTADONNÉES
Section 4.2.4 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 17 Épaisseur des dépôts meubles
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC

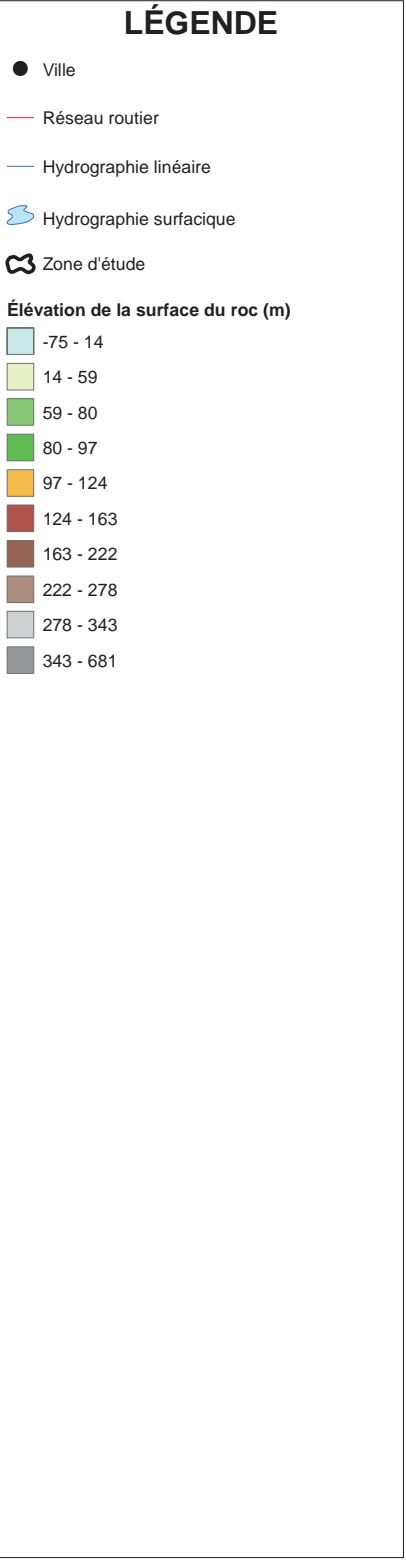
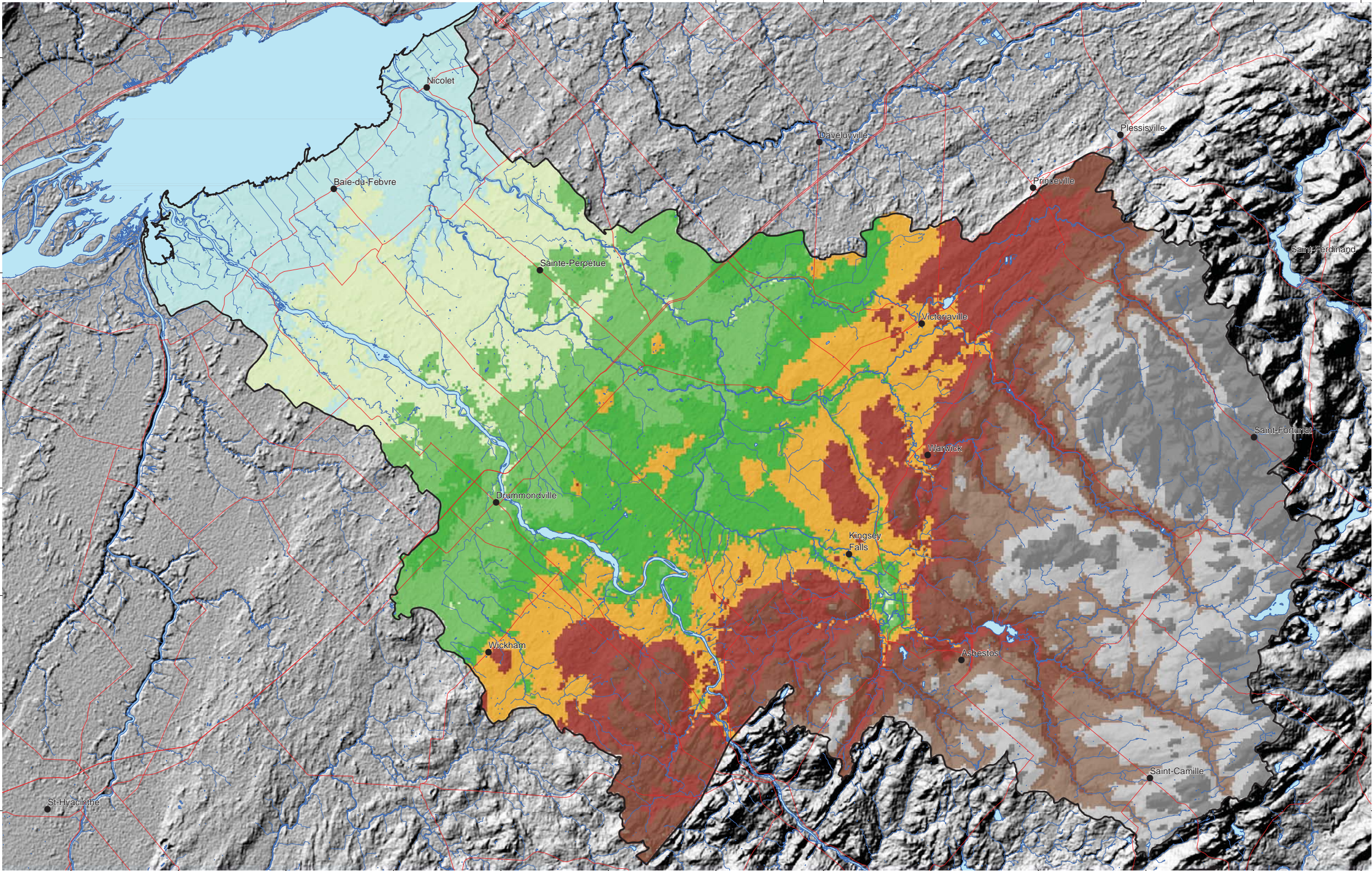


SOURCES / RÉALISATION
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Données de forage : SIH, MTQ, MERN-SIGPEG,
consultants, UQAM
Affleurements : SIGEOM
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



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 données 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'attaché 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barabèche, D., Mayonnat, G., Graveline, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final, Rapport



MÉTADONNÉES
Section 4.2.4 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

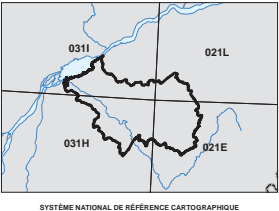
Carte 18 Topographie du roc
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Topographie du roc : 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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.

Coupes stratigraphiques

Des coupes stratigraphiques ont été réalisées à quatre endroits sur la zone d'étude (**Figure 7**). Les coupes ont été extraites à partir du modèle tridimensionnel de l'hydrostratigraphie. Ces coupes représentent la grande majorité des séquences des sédimentaires quaternaires de la zone d'étude. Dans le cadre du projet de MSc d'Olivier Ferland, trois coupes hydrostratigraphiques locales ont aussi été élaborées. Ces coupes ont ensuite servi à la construction d'un modèle d'écoulement de l'eau souterraine développé dans MODFLOW et décrit à la **section 6.3**.

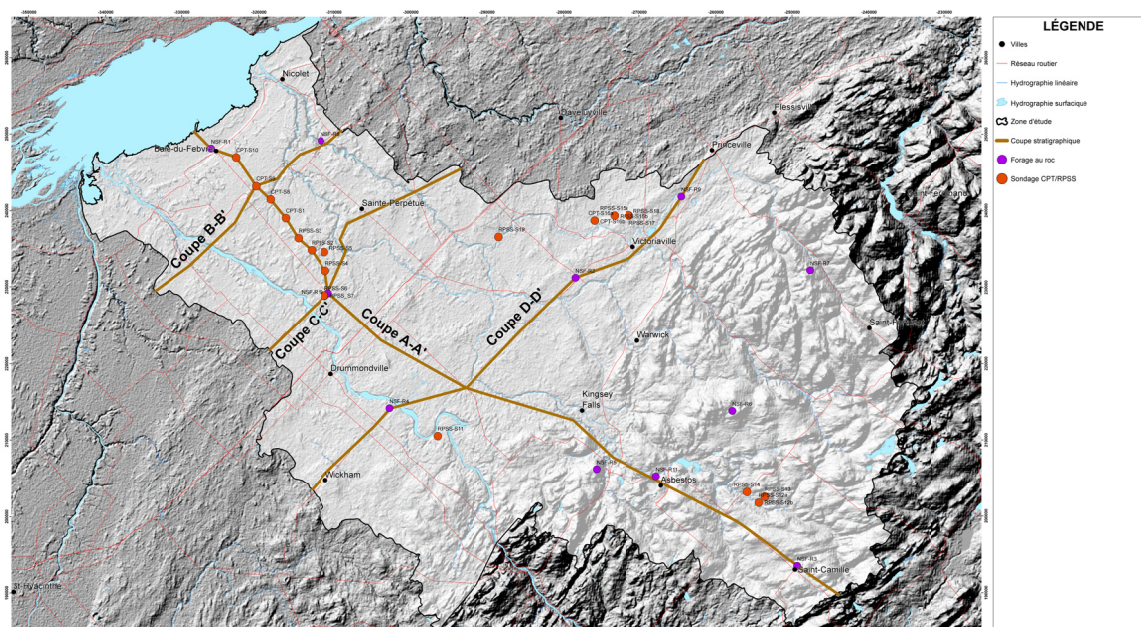


Figure 7 Localisation des coupes stratigraphiques

Coupe A-A'

La coupe hydrostratigraphique A (**Figure 8**) s'étend du fleuve à la limite amont de la zone d'étude. 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. La zone centrale est principalement recouverte d'une séquence de dépôts sableux, de dépôts silteux et 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 se retrouvent sous le till et en contact avec le roc. Les différentes formations géologiques sont séparées par des failles inverses de chevauchements. Ces dernières ayant été formées suite à la formation de la chaîne Appalachienne. Dans la partie amont de la vallée de la rivière Nicolet sud-ouest, les déformations tectoniques forment une dépression de la surface du roc qui semble se poursuivre jusqu'en amont du secteur des trois lacs. Cette dépression, bien qu'irrégulière, a été comblée par les dépôts argileux avec la présence de matériaux

granulaires à la base (identifiés comme Quaternaire ancien). L'épaisseur totale de ces dépôts peut atteindre plus de 50 m. Dans le secteur du piémont, des dépôts granulaires d'origine fluvio-glaciaire sont présents sous l'argile, parfois en contact direct avec le roc. Ces dépôts constituent de bons aquifères, comme c'est le cas à Kingsey Falls. L'esker Asbestos-Warwick est aussi composé des mêmes matériaux fluvio-glaciaires, mais ces derniers sont généralement en condition de nappe libre (non montré sur la coupe). Les municipalités de Tingwick et de Warwick puisent l'eau souterraine de cette formation très productive.

Coupe B-B'

La coupe stratigraphie B (**Figure 9**) est localisée dans la partie aval de la zone d'étude. Elle met en évidence l'épaisseur importante des dépôts argileux, la présence de matériaux granulaires sous les dépôts argileux ainsi que la présence de dépôts quaternaires anciens sous le till. Ces derniers ont été observés au forage NSF-R8, à Sainte-Monique. Les sondages stratigraphiques réalisés dans le secteur de Saint-Zéphirin-de-Courval s'arrêtent au contact du till, mais indiquent que ce dernier se trouve approximativement à la même profondeur qu'au forage NSF-R8, soit environ 20 m. Les données provenant du SIH indiquent quant à eux une profondeur du roc à 30 m. La combinaison de ces informations a permis de confirmer l'étendue des dépôts quaternaires anciens entre les rivières Nicolet et Saint-François.

Coupe C-C'

La coupe stratigraphique C (**Figure 10**) croise la coupe A à la hauteur du forage NSF-R10. Elle permet de visualiser la dépression du roc dans le secteur de Sainte-Brigitte-des-Saults et de Saint-Léonard d'Aston. À Sainte-Brigitte-des-Saults, la dépression est probablement due à la présence d'un réseau de failles (les données du MRN indiquent que leur localisation exacte est incertaine) entre la ligne de Logan et la faille du Foulon (voir coupe A-A'). Les levés géophysiques montrent la présence de dépôts granulaires (Quaternaire ancien) d'une épaisseur supérieure à 20m du côté N-E de la rivière Nicolet sud-ouest. Ces derniers sont recouverts d'argile formant ainsi un aquifère captif (**Annexe 5, sondage 2D_3**). Un peu plus en aval, là où la rivière bifurque vers le nord, les dépôts argileux sont absents et un till remanié est observé en surface (**Annexe 5, sondage 2D_1**). Encore un peu plus en aval un troisième levé géophysique indique la présence de dépôts granulaire sous l'argile (**Annexe 5, sondage 2D_2**). L'étendue de cette formation granulaire est localement importante puisqu'elle est retrouvée également au puits municipal de la municipalité de Sainte-Perpétue qui l'utilise comme source d'approvisionnement en eau potable.

Coupe D-D'

La coupe stratigraphique D (**Figure 11**) croise la coupe A à la hauteur du forage NSF-R4 et passe par les forages NSF-R2 et NSF-R9. Elle met en évidence les dépôts sableux

présents entre les rivières Nicolet centre et Nicolet sud-ouest. Ces dépôts d'origine éolienne en surface peuvent être en alternance avec des couches silteuses créant ainsi des conditions de nappe semi-captive. Cette séquence peut dépasser 13 m comme au sondage Geoprobe 5 (**Annexe 5**). Ces dépôts sableux constituent un aquifère local qui est utilisé entre autres, par la municipalité de Saint-Albert. Vers le nord-est, la couverture des dépôts devient mince et l'aquifère du roc fracturé est en condition de nappe libre.

Coupe Z1

La coupe Z1 (**Figure 12**) chevauche les municipalités de Drummondville et des Saint-Brigitte-des-Saults. Elle débute dans le secteur du forage NSF-R10 et se termine au ruisseau Boisvert. Les parties amont et aval sont caractérisées par des dépôts fins (silts et argile) d'environ 10 m d'épaisseur reposants sur le till tandis que la portion centrale les dépôts sableux dominent la stratigraphie. Cette coupe est caractéristique du contexte de nappe semi-captive.

Coupe Z2

La coupe Z2 (**Figure 13**) est située le long de la rivière Noire à Saint-Valère. Elle illustre une séquence sédimentaire de sable et de gravier qui deviennent recouvert silts sableux dans la partie centrale. Des dépôts de sable silteux de plus de 10 m d'épaisseur comportant des lentilles argileuses sont caractéristiques de la partie aval de la coupe. Des dépôts tourbeux se sont mis en place dans les dépressions des dépôts de sable silteux. Cette coupe est caractéristique du contexte de nappe libre.

Coupe Z3

La coupe Z3 (**Figure 14**) est localisée dans la vallée de la rivière Nicolet Centre près de la municipalité de Wotton. Du côté sud-ouest, des dépôts atteignent une épaisseur de près de 30 m. Ils sont composés d'une séquence de sable, de sable silteux reposant sur le till. De l'autre côté de la rivière, la stratigraphie est plutôt caractérisée par des sables et des graviers alluvionnaires. Plus en amont, sur cette partie de la coupe, le till s'amincit et des affleurements de roc ont été observés dans la partie la plus élevée. Cette coupe est caractéristique du contexte d'une vallée en condition de nappe libre.



Figure 8 Coupe hydrostratigraphique A-A'

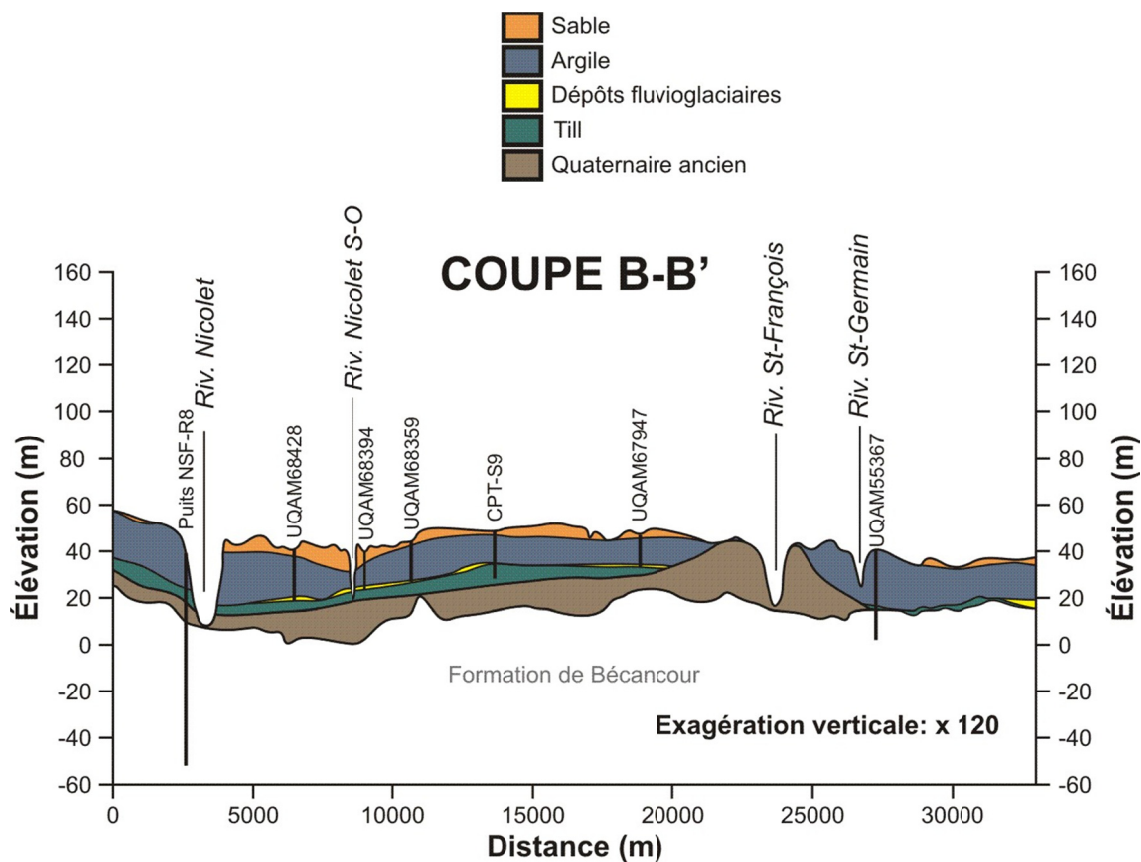


Figure 9 Coupe hydrostratigraphique B-B'

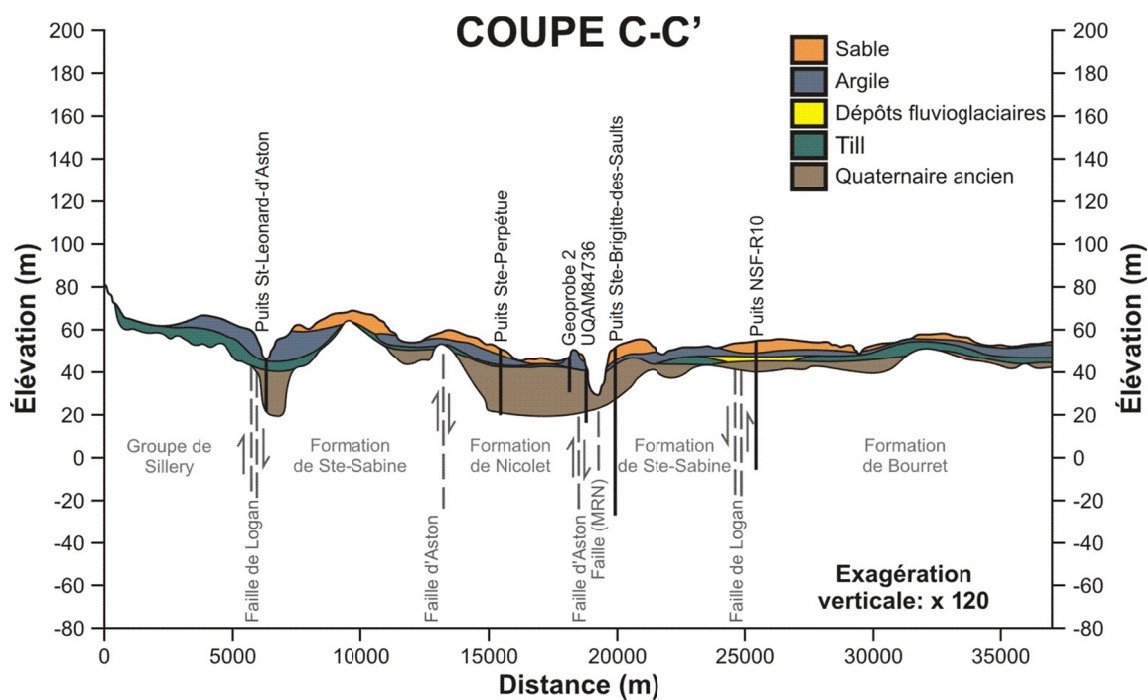


Figure 10 Coupe hydrostratigraphique C-C'

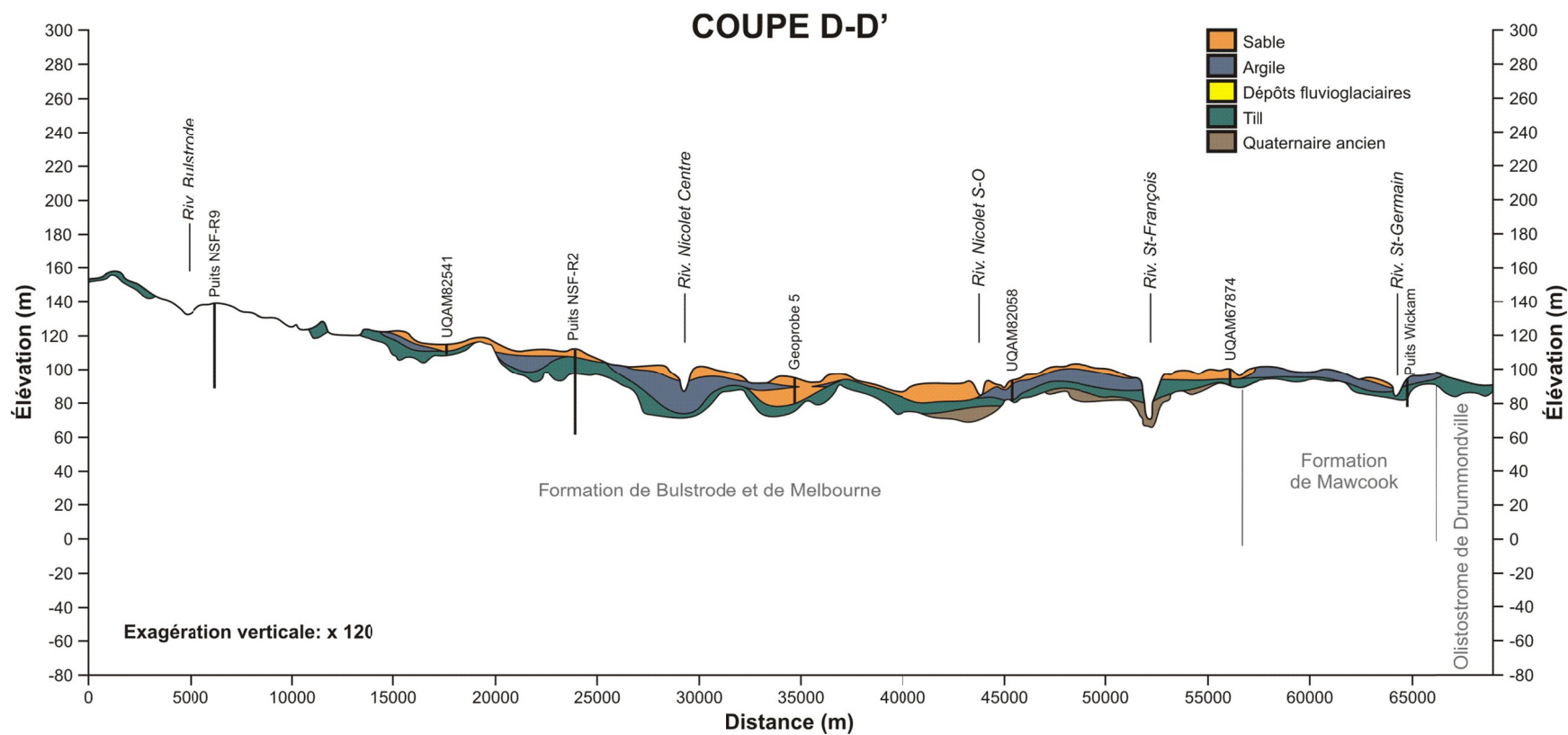


Figure 11 Coupe hydrostratigraphique D-D'

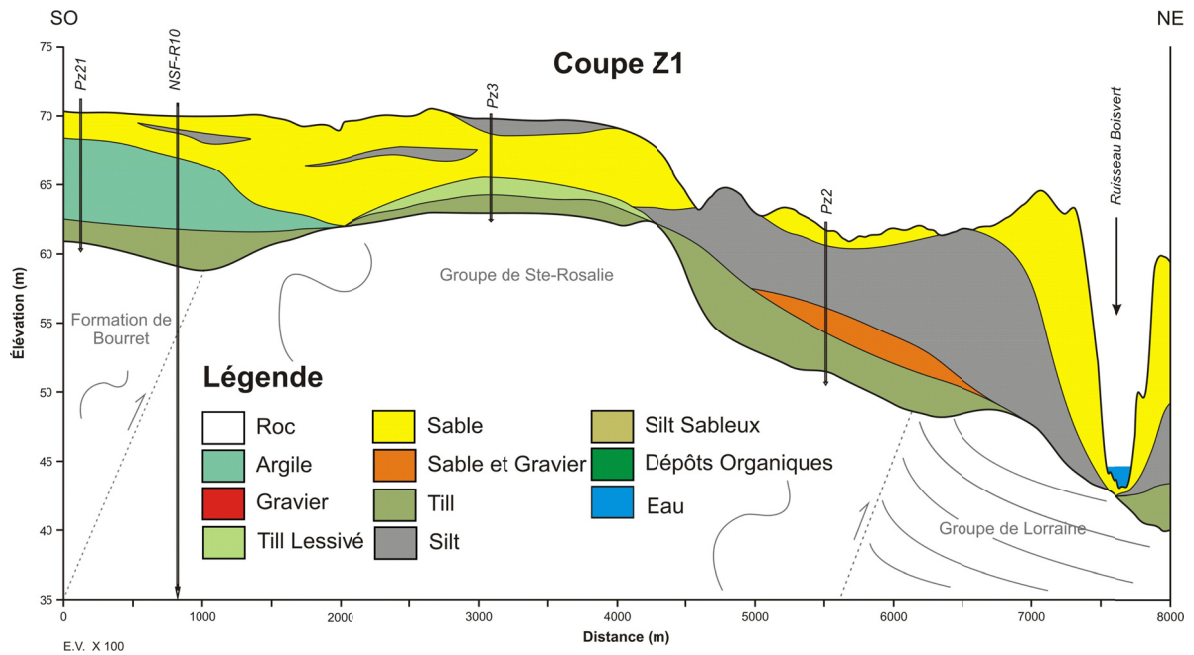


Figure 12 Coupe hydrostratigraphique Z1

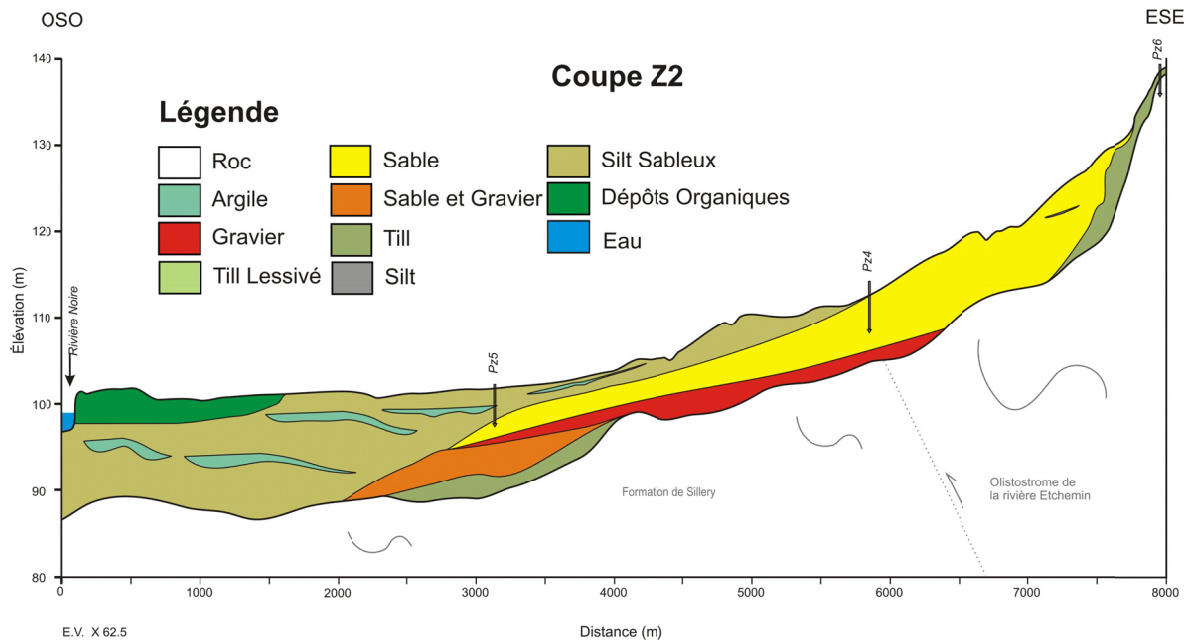


Figure 13 Coupe hydrostratigraphique Z2

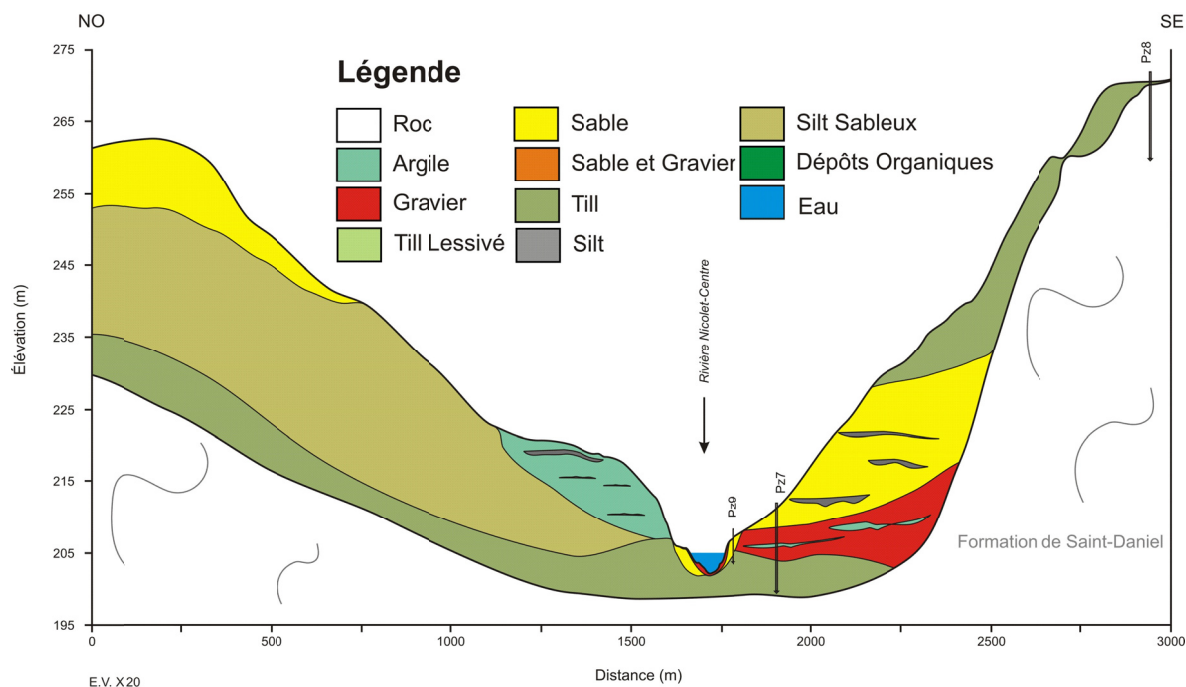


Figure 14 Coupe hydrostratigraphique Z3

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. Ce livrable ne montre pas l'indice de confinement des aquifères granulaires superficiels. 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 **carte 19** 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 55 % de la superficie étudiée, les zones à nappe semi-captive représentent 18 % de la superficie étudiée et les zones de nappe captive représentent 27 % de superficie étudiée.

Le secteur des Appalaches est généralement en condition de nappe libre, car la couverture des dépôts meubles imperméables y est mince ou absente. Certains fonds de vallée ont été identifiés comme étant en condition de nappe semi-captive. L'estimation de la superficie en nappe semi-captive est toutefois conservatrice puisque dans plusieurs autres fonds de vallée la présence de till compact d'épaisseur suffisante pourrait également créer des conditions de nappe semi-captive, voire même captive. La résolution des données générées dans ce projet ne permet cependant pas d'évaluer l'étendue de ce phénomène. Dans la vallée des rivières Nicolet et Nicolet-Centre, les données acquises durant le Projet ont permis de déterminer que l'aquifère du roc est en condition de nappe captive et ce, jusque dans le secteur de la ville de Wotton. Les zones de nappe captive sont principalement localisées aux endroits où la couverture argileuse est présente en surface (cf. **Carte 19** Carte 19 Indice de confinement), ce qui est caractéristique de la portion aval de la zone d'étude. La rivière Saint-François a érodé les dépôts meubles jusqu'au roc créant ainsi des conditions de nappe libre jusqu'à la hauteur de Saint-François-du-Lac. Les rivières Nicolet et Nicolet sud-ouest coulent en général sur des dépôts imperméables en aval de la ligne de Logan. Une remontée du roc dans le sud de la ville de Baie-du-Febvre crée une petite zone en condition de nappe libre.

4.4 Contextes hydrogéologiques

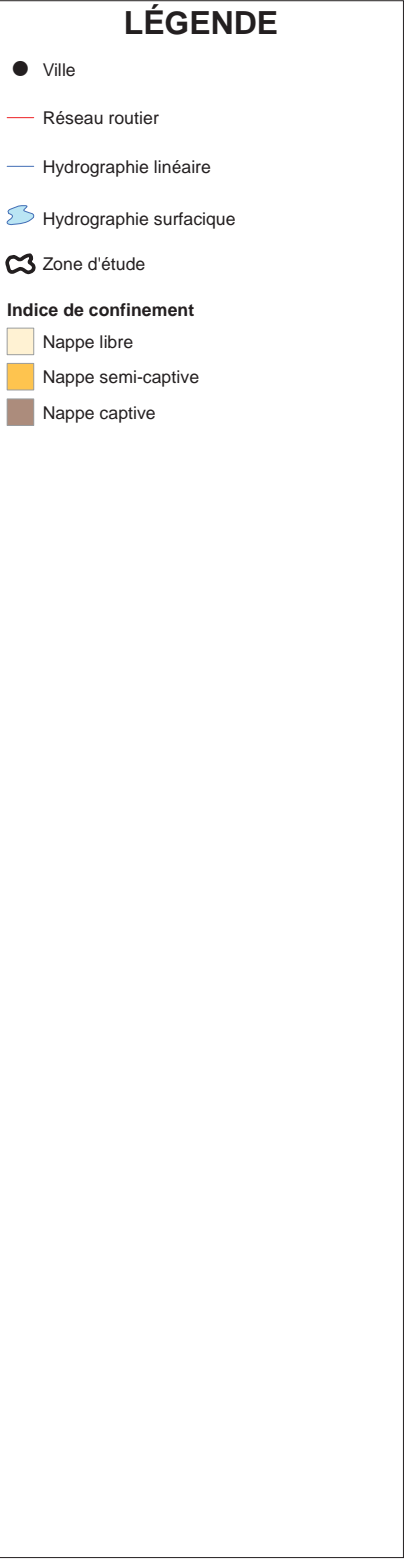
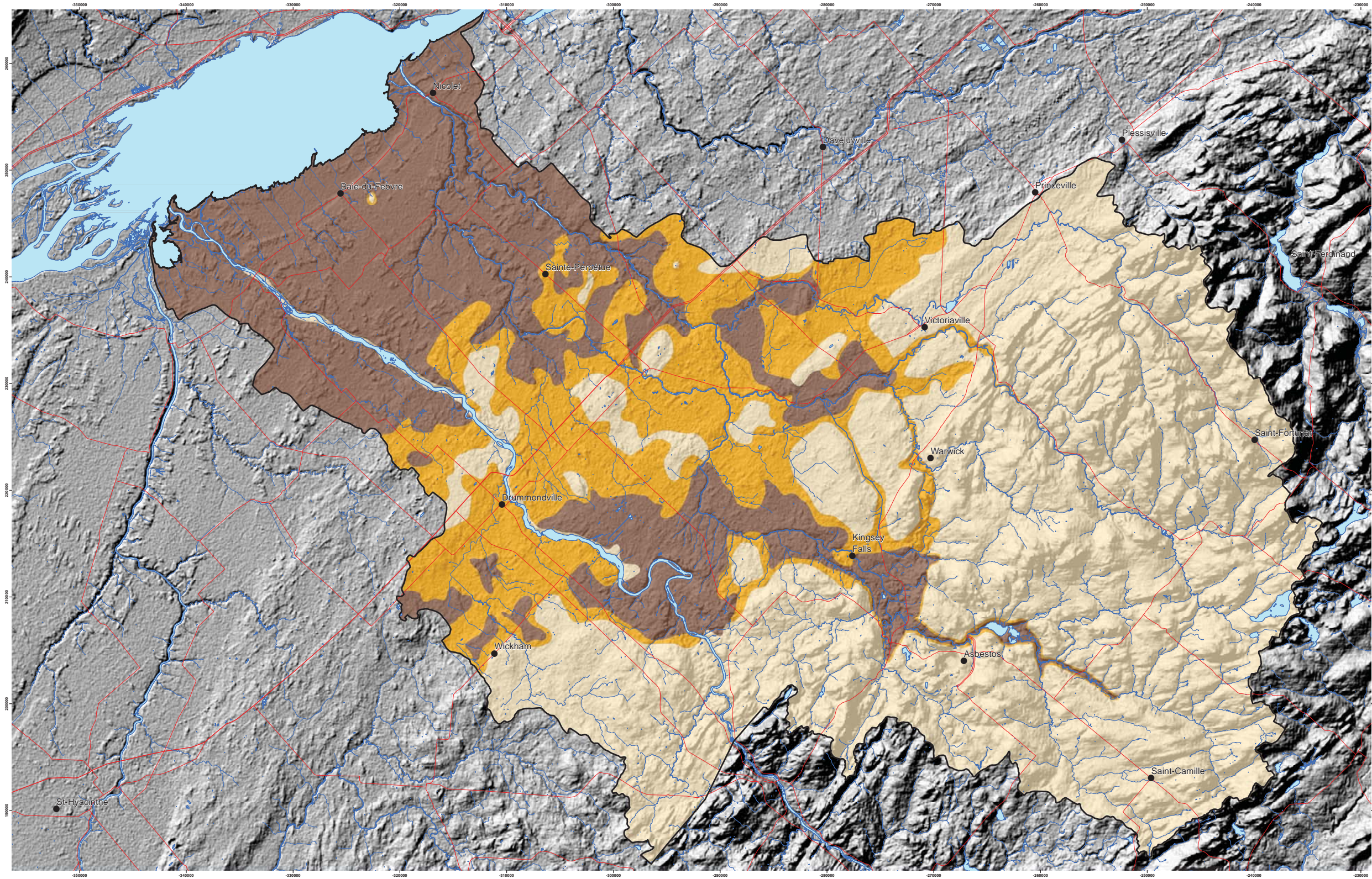
Les contextes hydrogéologiques représentent la répartition spatiale de séquences hydrostratigraphiques types de dépôts meubles. Ils permettent d'identifier quelle séquence de dépôts meubles peut être rencontrée dans un secteur de la zone d'étude. Les unités hydrostratigraphiques présentées dans ce livrable 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 dépôts holocènes (U1) et les sables littoraux (U2) ont été regroupés en une seule unité nommée «granulaire». Les Sables des Vieilles Forges (U9), les Varves de Deschaillons (U10), les sédiments de Saint-Pierre (U11) et le Till de Bécancour (U12) ont été regroupés 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 **carte 20** illustre la répartition spatiale des contextes types. La zone appalachienne est dominée par les contextes d'affleurements de roc, de till, de till remanié et de dépôts granulaires reposant du till. Ce type de contexte est principalement rencontré dans le fond des vallées, là où les dépôts ont pu s'accumuler. Il est possible que des dépôts silteux ou argileux soient présents sous les dépôts granulaires. Cependant, les informations n'ont pas permis de généraliser ce contexte à toutes les vallées de la portion aval de la zone d'étude. La vallée de la rivière Nicolet sud-ouest entre les trois lacs et Kingsey Falls est

caractérisée par une séquence de dépôts granulaires superposés à un till reposant sur des dépôts argileux compacts et parfois des graviers. L'épaisseur des dépôts fins peut atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Le forage NSF-R11, localisé près de la rivière Nicolet à Asbestos, ainsi qu'un forage de consultant localisé à Danville, a permis de valider l'étendue de la vallée enfouie. Cette dépression du roc causée sans doute par le réseau de failles dans le secteur s'étend de la région de Kingsey Falls jusqu'en amont du secteur des Trois-Lacs et peut-être même plus en amont.

Dans la partie centrale (entre le piémont et l'autoroute 20), les dépôts argileux gagnent en importance et leur épaisseur augmente, en général, vers la partie aval. L'argile affleure en surface à quelques endroits, mais elle est généralement recouverte par des dépôts sableux d'origine littorale ou éolienne. C'est dans ce contexte particulier, de sables éoliens et littoraux reposants sur une couche d'argile ou de till, que s'est développée la majorité des tourbières de la zone d'étude. Des dépôts granulaires sont aussi présents sous l'argile dans la zone comprise entre les rivières Nicolet et Nicolet sud-ouest. Les dépôts sableux superficiels de ce même secteur forment un potentiel aquifère, car leur épaisseur demeure supérieure à 5 m sur plusieurs kilomètres carrés, comme c'est le cas dans le secteur de Saint-Albert. Les contextes de till sur roc sont localisés sur les topographies plus hautes. À ces endroits, les dépôts argileux ont été érodés lors du retrait de la mer de Champlain. Un contexte particulier de dépôts granulaires d'origine fluvio-glaciaire forme l'esker Asbestos-Tingwick. Ce cordon de sable et de gravier est orienté S-O/N-E. Ces dépôts de granulométrie grossière reposent en général directement sur le roc, bien qu'on puisse y retrouver un till. Leur épaisseur peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur ce qui en fait un aquifère important dans la région. Les argiles ont recouvert les flancs de l'esker ce qui pourrait créer des conditions de nappe semi-captive par endroit.

Dans la partie aval, les contextes argileux gagnent en importance et la stratigraphie est complexifiée par la présence, combinée ou non, de matériaux granulaires sous les argiles marines et sous le till. Sur la **carte 20**, la zone hachurée indique qu'il y a potentiellement des sédiments quaternaires anciens sous le till (**c.f. coupe stratigraphique A, B et C, section 4.2.4**). Les dépôts granulaires présents sous les argiles de la mer de Champlain peuvent constituer des aquifères, notamment dans le secteur de Sainte-Perpétue et de Saint-François-du-Lac. Près du fleuve, les données obtenues lors du forage NSF-R1 indiquent que le contexte «argile-granulaire-till» est dominant.



MÉTADONNÉES
Section 4.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

**Carte 19 Indice de confinement
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC**



SOURCES / RÉALISATION

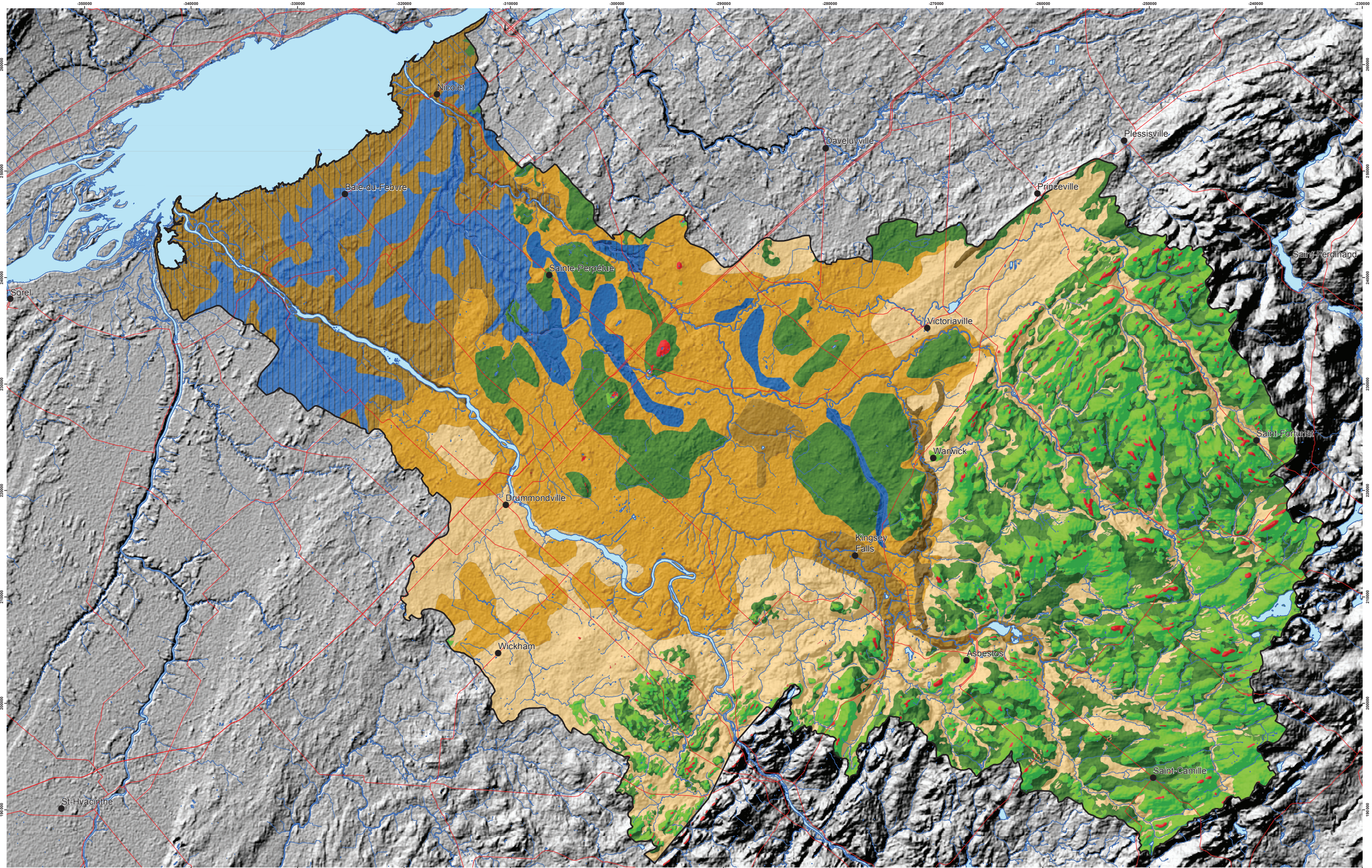
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Indice de confinement : UQAM

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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meyzonnat, G., Gervais, M. L., Choulet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.



LÉGENDE

●

Ville

—

Réseau routier

—

Hydrographie linéaire

—

Hydrographie surfacique

—

Zone d'étude

Contexte hydrogéologique

■

Argile-till

■

Argile-sable-till

■

Granulaire

■

Granulaire-argile-granulaire-till

■

Granulaire-argile-till

■

Granulaire-till

■

Till

■

Till remanié

■

Roc

□

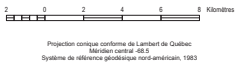
Quaternaire ancien sous le till ou l'argile



MÉTADONNÉES

Section 4.4 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 20 Contextes hydrogéologiques
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Contextes hydrogéologiques : 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 données requises pour diffuser 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Revue bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Bouché, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.

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, cette étude ne considérait cependant pas les dépôts quaternaires.

Dans une étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Nicolet, Paré (1981a) identifiait les meilleurs réservoirs aquifères comme étant les dépôts meubles et précisait que ces derniers pouvaient fournir des débits de 10 à 950 m³/h. Cette analyse était basée sur des données hydrogéologiques issues des pompes municipales et des données provenant du SIH. Paré (1981b) 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 à l'**annexe 10**.

La municipalité de Chesterville s'approvisionne à partir de l'aquifère fracturé composé d'ardoise, de grès interstratifié et de schiste de la Formation de Sweetsburg (Mission HGE inc., 2005). Les puits ont une profondeur moyenne de 95 m. Dans le secteur des puits, l'aquifère est en condition de nappe libre.

La municipalité de Dudswell s'approvisionne à partir d'un aquifère de roc fracturé en condition de nappe libre (Laforest Nova Aqua, 2008). L'aquifère se compose d'ardoise et de blocs de la formation de Saint-Daniel. La profondeur du puits atteint 62 m.

La municipalité de Durham-Sud s'approvisionne à partir de drains horizontaux dans un aquifère granulaire composé de dépôts fluvio-glaciaires (esker) (Mission HGE inc., 2007c). L'épaisseur totale du dépôt fluvioglaciaire est de plus de 10 m. Les drains ont une profondeur de 3m et l'aquifère est en condition de nappe libre.

La municipalité de Kingsey Falls exploite les sédiments fluvio-glaciaires en conditions de nappe captive (Laforest Expert-Conseils inc., 2007). La formation granulaire peut atteindre une épaisseur de plus de 10 m et est située sous une épaisseur variable d'argile qui peut atteindre plus de 20 m.

La municipalité de Notre-Dame-de-Ham s'approvisionne dans un aquifère de roc fracturé composé de Schiste ardoisiér du Groupe de Oak Hill (Consultants HGE, 2003). L'aquifère est en condition de nappe libre dans ce secteur. Le puits à une profondeur de 92 m.

La municipalité de Notre-Dame-du-Bon-Conseil s'approvisionne dans un aquifère à nappe libre composé de sables et de graviers littoraux marins (Mission HGE inc., 2006b). L'épaisseur de l'aquifère peut atteindre 20 m.

La municipalité de Saint-Germain-de-Grantham puise son eau potable dans un aquifère captif composé d'ardoise et de calcaire de la Formation de Bourret. L'aquifère est recouvert d'un dépôt argileux pouvant atteindre 12 m. Les six puits en exploitation ont une profondeur de 90 m (Laforest Expert-Conseils inc., 2003).

La municipalité de Saint-Martyr-Canadien exploite un aquifère de roc fracturé composé de schiste et d'ardoise de la Formation de Saint-Victor. L'aquifère est en condition de nappe libre et la profondeur du puits de 90 m (Tek Eau inc., 1980).

La municipalité de Saint-Cyrille-de-Wendover puise son eau potable dans un aquifère en condition de nappe libre composé de lits de grès, calcaire et shale de l'Olistostrome de Drummondville. Un système composé de huit puits tubulaires d'une profondeur moyenne de 108 m alimente le réseau municipal (Laforest Nova Aqua, 2006).

La municipalité de Sainte-Brigitte-des-Saults s'approvisionne en eau potable dans un aquifère de roc fracturé composé de shale et de grès de la Formation de Nicolet. L'aquifère est en condition de nappe semi-captive et est recouvert de sable, de sable, de silt et parfois de gravier, le tout d'une épaisseur pouvant atteindre 30 m (Mission HGE inc., 2006c). Les deux puits ont une profondeur de 100 m et de 78 m.

La municipalité de Sainte-Clothilde de Horton puise l'eau souterraine d'un aquifère de roc fracturé composé de schiste argileux rouge et de grès gris. L'aquifère est en condition de nappe libre et est recouvert de sable fin et d'argile d'une épaisseur d'environ 4 m. Le puits à une profondeur totale de 9,8 m (Laboratoire d'Expertise de Québec Ltée., 2007b).

La municipalité de Sainte-Perpétue exploite, à partir de trois puits, un aquifère granulaire composé de sable et de gravier fluvio-glaciaire en condition de nappe captive. L'unité aquifère est située à 20 m de profondeur et a une épaisseur d'environ 8 m. Elle est recouverte par une séquence de sable fin silteux et d'argile (Mission HGE inc., 2006a).

La municipalité de Saint-Léonard d'Aston puise son eau potable dans un aquifère captif composé de sable et de gravier. L'unité aquifère d'une épaisseur de 3 m est située à 27 m de profondeur, en contact avec le socle rocheux. Elle est recouverte par une alternance de sable fin et d'argile (Mission HGE inc., 2007b).

La municipalité de Tingwick s'approvisionne en eau souterraine dans un aquifère à nappe libre composé de sable et de gravier d'origine fluvio-glaciaire qui compose la moraine «Asbestos-Warwick». La profondeur du puits est de 18 m et l'unité aquifère est comprise entre 10 m et 18 m de profondeur (Mission HGE inc., 2007a).

La municipalité de Victoriaville s'approvisionne en eau souterraine à partir d'un aquifère granulaire à nappe libre composé de dépôts fluviaux de la plaine alluviale de la rivière Nicolet. Cinq puits tubulaires et un caisson composent le système de captage. Les puits tubulaires ont une profondeur moyenne de 14 m (Foratek International inc., 1987).

La municipalité de Warwick puise aussi son eau potable dans la moraine «Asbestos-Warwick». Dans ce secteur, la formation fluvio-glaciaire peut cependant être en condition de nappe captive ou semi-captive selon la présence de dépôts argileux en surface. Le premier puits collecteur a un diamètre de 4,9 m et une profondeur de 22,5 m. Un système de sept drains horizontaux d'une longueur maximale de 40 m capte l'eau souterraine. Le second puits est vertical et a une profondeur de 25 m (Laboratoire d'Expertise de Québec Ltée., 2007a).

La municipalité de Wickham exploite l'eau souterraine du roc fracturé à partir de trois puits et un aquifère granulaire de gravier et de sable à partir d'un quatrième puits. L'aquifère fracturé est en condition de nappe captive et est composé de schiste de la Formation de Mawcook. L'aquifère est recouvert par des unités de till pouvant atteindre 6 m et, par endroit, par une unité de silt argileux d'une épaisseur maximale de 16 m. L'aquifère granulaire repose sur le socle rocheux à une profondeur d'environ 20 m et est en condition de nappe captive, tout comme l'aquifère fracturé (Donat Bilodeau Expert-Conseil, 2006).

La municipalité de Wotton s'approvisionne en eau potable à partir d'un aquifère de roc fracturé composé de schiste de la Formation de Saint-Victor. Les pompes se font à partir de deux puits. Le premier captant l'aquifère fracturé en condition de nappe captive en fond de vallée et le deuxième, l'aquifère en condition de nappe libre en sommet de talweg (Perrier Experts-Conseils inc., 2008).

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

Des essais de pompage (10 sites) et à charge variable (13 sites), ont été réalisés dans les puits forés et les piézomètres interceptant le roc installés durant le projet. À l'exception du puits NSF-R9, l'interprétation a été réalisée sur les données de remontée au forage selon la méthode de Theis (1940) à l'aide d'une feuille de calcul Excel. À certains puits, plusieurs essais ont été réalisés, la moyenne géométrique de la transmissivité est alors présentée dans le rapport. Les résultats montrent que la transmissivité de l'aquifère est très variable dans l'espace et est généralement faible, tel que mis en évidence dans la compilation de Paré (1981a, 1981b). La longueur de la cavité dans le roc ou la longueur

de la crépine (piézomètres). Les valeurs de transmissivité obtenues lors des essais de pompages varient entre $2,2 \times 10^{-9}$ m/s (NSF-R5) à $5,6 \times 10^{-6}$ m/s (NSF-R10) (**Tableau 17**). Une seule valeur de coefficient d'emménagement a pu être calculée, près du forage NSF-R9 où un puits d'observation (puits privé à une distance de 50 m) était présent. Le coefficient d'emménagement (S) obtenu est de $3,77 \times 10^{-6}$. La **Figure 15** compare quatre essais en remontée à quatre puits différents (NSF-R3, NSF-R7, NSF-R8 et NSF-R10). La partie linéaire des données située à la fin de l'essai a été utilisée pour calculer la conductivité hydraulique. Cette partie de la remontée représente l'écoulement radial autour du puits, au moment où cet écoulement est contrôlé par un faible gradient hydraulique entre le niveau d'eau dans le puits et celui dans l'aquifère.

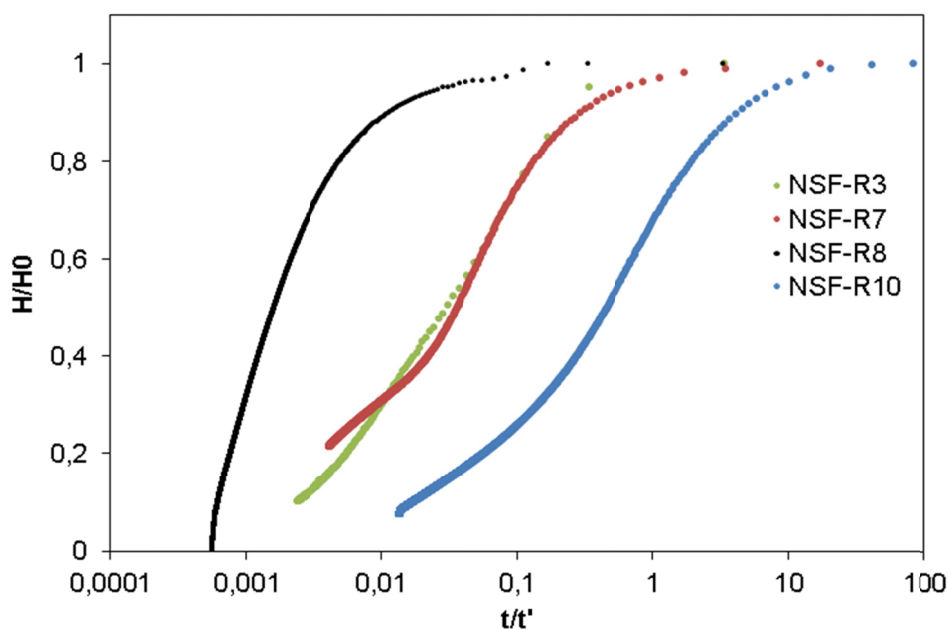


Figure 15 Comparaison des données de remontée pour trois puits. L'axe Y représente le rapport entre le niveau mesuré et le niveau statique avant le début de l'essai.

Les résultats des essais à charge variable (*slug tests*) montrent des valeurs de conductivité hydraulique légèrement plus élevées, soit entre $4,1 \times 10^{-7}$ m/s (NSF-R1) à $9,1 \times 10^{-6}$ m/s (NSF-R10). Le puits NSF-R5 n'a pas été testé avec la méthode à charge variable, car la conductivité hydraulique y est très faible et les essais auraient duré plusieurs jours. Les **Figure 16** et **Figure 17** illustrent la comparaison entre les trois essais à charge variable réalisés aux puits NSF-R4 et NSF-R8. Tel qu'expliqué dans la **section 3.2.4**, les essais dans les puits au roc ont été réalisés par injection d'air dans le tubage du puits. Dans le cas du forage NSF-R4 ($K = 3,9 \times 10^{-6}$ m/s), les trois essais montrent une réaction similaire de l'aquifère fracturé, pour une charge initiale imposée de 1,5, 2,6 ou 3,9 m (**Figure 16**). Ceci indique qu'il y a peu d'hétérogénéité locale autour de ce puits. À titre de comparaison, la réaction de l'aquifère dans le secteur du forage NSF-R8 ($K = 6,8 \times 10^{-8}$ m/s) est beaucoup plus faible (**Figure 17**). À ce forage, la pente des essais est beaucoup plus faible (ce qui se traduit par une conductivité hydraulique plus faible) qu'au

forage NSF-R4. La pente nettement plus prononcée pour la charge initiale imposée de 2,4 m pourrait indiquer un effet de la fracturation induite localement lors du forage (K plus élevée). Les valeurs de conductivités hydrauliques généralement plus élevées observées lors des essais à charge variable, comparativement aux essais de pompage (**Tableau 16**) pourraient être dues à la faible zone radiale investiguée par ce type d'essai, de même qu'à la fracturation induite durant les travaux de forages.

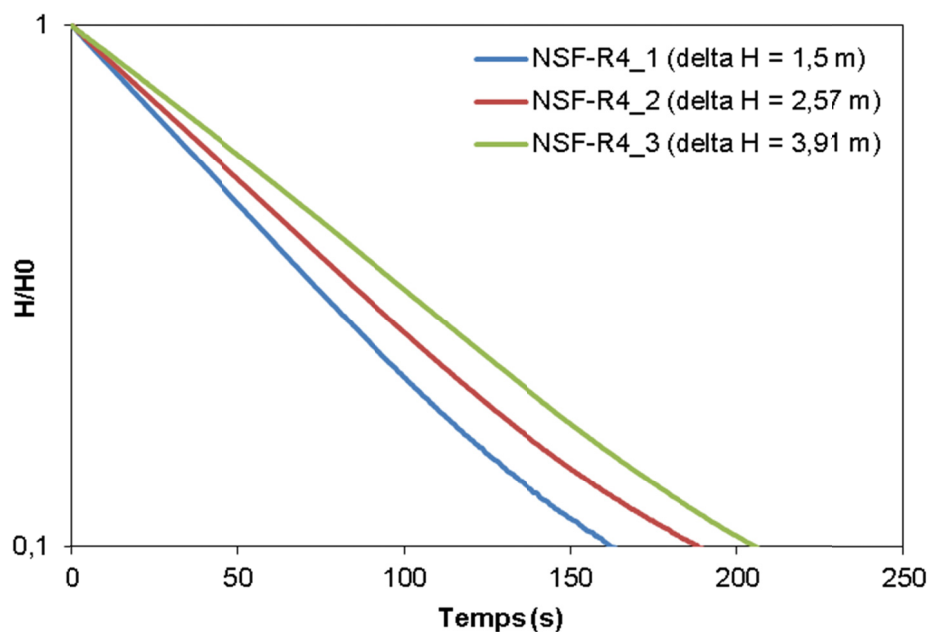


Figure 16 Comparaison des trois essais à charge variable au puits NSF-R4

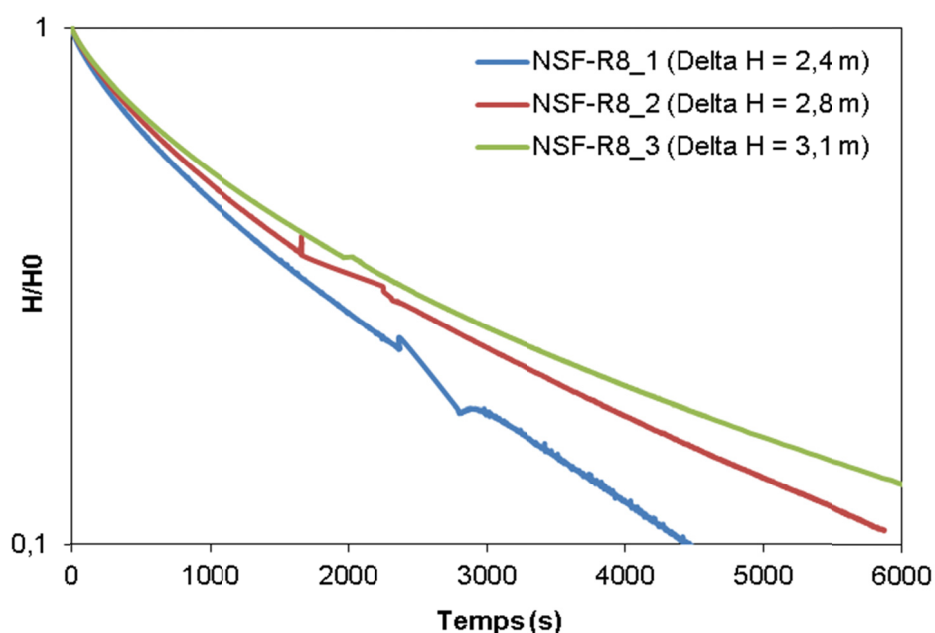


Figure 17 Comparaison des trois essais à charge variable au puits NSF-R8

Essais à charge variable réalisés dans les dépôts granulaires

Aucun essai de pompage n'a été réalisé dans les dépôts meubles dans le cadre du projet. Par contre, un grand nombre d'essais à charge variable (150 tests) ont été réalisés dans les 13 piézomètres installés dans des formations granulaires principalement composées de sables fin. Les résultats présentés ont été obtenus en calculant la moyenne géométrique de tous les essais réalisés à un piézomètre. Les résultats indiquent que la conductivité hydraulique des dépôts varie de $4,0 \times 10^{-5}$ m/s (PZ7S) à $2,1 \times 10^{-7}$ m/s (PZ5S) (**Tableau 16**). Ces résultats concordent bien avec ceux déjà obtenus dans le cadre des études hydrogéologiques réalisées par les consultants sur les aquifères granulaires de la zone d'étude. Deux types d'essais ont été réalisés : par insertion et retrait d'une tige dans le piézomètre (slug) afin de faire varier le niveau piézométrique ou par injection d'air dans le tube du piézomètre. L'injection d'air sous pression permet d'imposer des variations de niveau plus importantes et donc de solliciter l'aquifère sur un plus grand volume. La **Figure 18** illustre la comparaison entre trois essais réalisés au piézomètre PZ1 qui recoupe un till à matrice sableuse avec blocs. Les deux essais par insertion d'une tige ont le même comportement linéaire et donnent une valeur de conductivité hydraulique de $5,8 \times 10^{-7}$ m/s. L'essai par injection d'air a une réaction similaire et fournit une valeur de K légèrement plus faible de $4,6 \times 10^{-7}$ m/s.

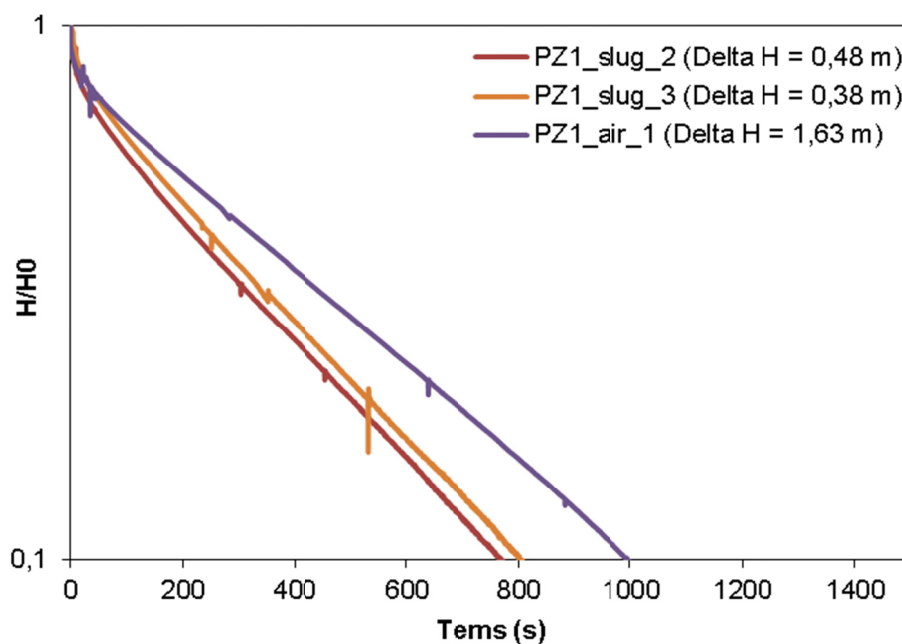


Figure 18 Comparaison des essais à charge variable au piézomètre PZ1

Tableau 16 Synthèse des propriétés hydrauliques obtenues par essai de pompage et essais à charge variable

Site	Aquifère	Géologie	K pompage (m/s)	K charge variable (m/s)
NSF-R10	Fracturé-semi-captif	Ardoise calcaire	$5,6 \times 10^{-6}$	$9,1 \times 10^{-6}$
NSF-R9	Fracturé-libre	Ardoise calcaire	$3,7 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$
NSF-R8	Fracturé-captif	Shale	$2,8 \times 10^{-8}$	$6,7 \times 10^{-8}$
NSF-R7	Fracturé-libre	Schiste	$5,5 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$
NSF-R6	Fracturé-libre	Schiste	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$
NSF-R5	Fracturé-libre	Schiste	$2,2 \times 10^{-9}$	
NSF-R4	Semi-semi-captif	Ardoise calcaire	$1,4 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-6}$
NSF-R3	Fracturé-libre	Schiste	$4,1 \times 10^{-6}$	$8,2 \times 10^{-6}$
NSF-R2	Semi-captif	Ardoise calcaire	$4,7 \times 10^{-8}$	$7,0 \times 10^{-7}$
NSF-R1	Fracturé-captif	Calcaire shale		$4,1 \times 10^{-7}$
NSF_PZ1	Granulaire-semi-captif	Till sableux		$5,0 \times 10^{-7}$
NSF_PZ2	Fracturé-semi-captif	Ardoise calcaire		$3,7 \times 10^{-6}$
NSF_PZ3	Fracturé-semi-captif	Shale grès		$3,5 \times 10^{-6}$
NSF_PZ4S	Granulaire-libre	Sable		$1,2 \times 10^{-5}$
NSF_PZ4P	Libre	Grès shale		$3,2 \times 10^{-6}$
NSF_PZ5S	Granulaire-libre	Sable et silt		$2,0 \times 10^{-7}$
NSF_PZ5P	Granulaire-captif	Till et sable		$2,8 \times 10^{-7}$
NSF_PZ6	Fracturé-libre	Grès shale		$1,8 \times 10^{-6}$
NSF_PZ7S	Granulaire-libre	Sable et gravier		$4,0 \times 10^{-5}$
NSF_PZ7P	Granulaire-captif	Till		$5,8 \times 10^{-7}$
NSF_PZ8	Fracturé-libre	Ardoise		$7,7 \times 10^{-6}$
NSF_PZ9	Granulaire-libre	Sable		$1,2 \times 10^{-6}$
NSF_PZ20	Fracturé-captif	Ardoise calcaire		$6,2 \times 10^{-6}$

Essais avec obturateurs (packers tests)

Des essais hydrauliques avec obturateurs ont été réalisés dans quatre des 11 puits forés dans le cadre de projet (NSF-R2, NSF-R3, NSF-R4 et NSF-R6) en partenariat avec l'UQAC (**Annexe 7**). 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 pour les puits NSF-R6 et NSF-R2, tandis qu'elle est inférieure pour les puits NSF-R4 et NSF-R3 (**Tableau 17**). Cette différence est principalement due au fait que la conductivité hydraulique des forages NSF-R4 et NSF-R3 est principalement influencée par une seule zone de fracture très conductrice (**Tableau 17**). Par exemple, pour ces deux mêmes puits, la conductivité

hydraulique maximale pour un intervalle est supérieure d'un ordre de grandeur à la moyenne du puits. Le reste de la cavité de ces deux puits comporte peu ou pas de fracture majeure, ce qui fait baisser la conductivité hydraulique moyenne obtenue par tous les essais par obturateur dans un même puits. Les résultats des essais avec obturateurs n'ont pas permis d'identifier de variation de conductivité hydraulique avec la profondeur (voir l'**annexe 7** pour les détails). Des variations de conductivités hydrauliques de plus de deux ordres de grandeur ont été observées dans les quatre forages testés.

Tableau 17 Conductivités hydrauliques obtenues au moyen des essais avec obturateurs

Forage	K moyen de tous les intervalles (m/s)	K maximal (m/s)
NSF-R2	$2,04 \times 10^{-07}$	$3,18 \times 10^{-7}$
NSF-R3	$5,86 \times 10^{-7}$	$4,72 \times 10^{-6}$
NSF-R4	$3,37 \times 10^{-7}$	$4,30 \times 10^{-6}$
NSF-R6	$4,13 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$

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

La base de données du SIH contient des données permettant de calculer la capacité spécifique et d'estimer la transmissivité (T) de l'aquifère. Ces données sont la profondeur du niveau d'eau statique, la profondeur du niveau d'eau dynamique, la durée du pompage et le débit. Plusieurs méthodes ont été proposées pour estimer la transmissivité à partir des données de capacité spécifique. La méthode dérivée de Cooper et Jacob (1946) a été utilisée dans le cadre de ce projet.

Au total, les données de 10 300 forages extraites du SIH se sont avérées pertinentes pour les calculs. Un prétraitement des données a permis de retirer les puits ayant un rabattement (niveau statique moins niveau dynamique) supérieur à 50 m, une durée supérieure ou égale à 1h et une profondeur supérieure à 5 m. Parmi ceux-ci, 8 100 ont été identifiés comme des puits captant l'aquifère fracturé. Les valeurs de T ont été calculées en utilisant la méthode décrite par Richard et al. (2014) selon une variante par itérations de l'équation de Cooper et Jacob (1946):

$$T = \frac{Q}{(h_0 - h)} \frac{2,3}{4\pi} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S} \quad \text{Équation 1}$$

où

T = transmissivité (m²/s)

Q = débit (m³/s)

h_0 = niveau statique (m)

h = niveau dynamique (m)

t = temps (s)

S = emmagasinement (-).

La méthode consiste, par itérations successives, à remplacer le T de l'itération 0 par une valeur approximative (dans le cas présent $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) et à utiliser le résultat du calcul pour l'itération suivante (Bradbury et Rothschild, 1985). La valeur de S est fixée à 0,001, une valeur considérée représentative pour le roc fracturé. La procédure itérative est poursuivie jusqu'à ce que la différence entre deux itérations soit égale ou inférieure à 1 %. La conductivité est ensuite obtenue en divisant la valeur de T par la longueur de la cavité dans le roc (profondeur total – longueur du tubage).

La distribution des $\log(K)$ est quasiment symétrique et les résultats indiquent que la transmissivité moyenne de l'aquifère fracturé pour toute la zone d'étude est de $3,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (**Figure 19**).

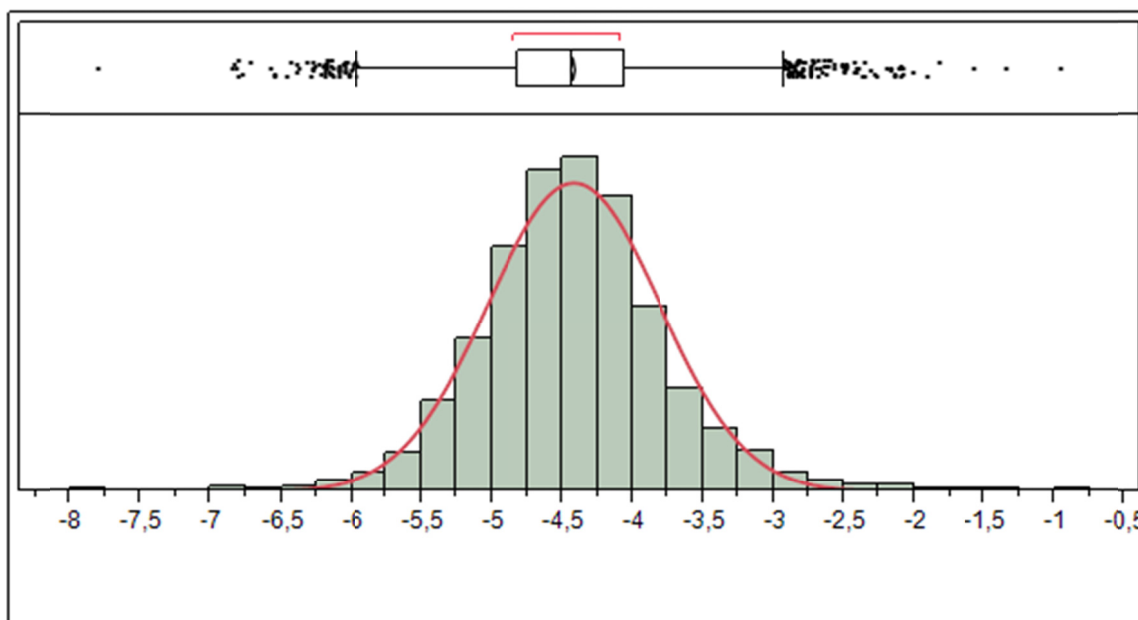


Figure 19 Distribution des conductivités hydrauliques estimées à partir de la capacité spécifique

Les données ont par la suite été spatialisées afin d'extraire la géologie de chacun des puits. Lorsqu'aucune description de la formation n'était disponible, le Groupe ou la lithologie a été utilisé (c.f. **Carte 15**). Les données étant distribuées selon une distribution normale (test KSL = 0,032), une analyse de variance (ANOVA) sur les moyennes des formations géologiques a été conduite afin de déterminer si une différence significative peut être identifiée entre certaines formations. Le **tableau 18** montre la transmissivité moyenne selon la lithologie du roc. Toutes les valeurs varient entre 1×10^{-5} et $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. L'ANOVA a permis de mettre en évidence des formations géologiques qui avaient une T

moyenne différente. Dans le **tableau 19**, les unités géologiques ayant la même lettre ont des conductivités hydrauliques moyennes qui ne sont pas significativement différentes. Un premier groupe (en grisé dans le tableau) a une K moyenne significativement différente ($p < 0,01$) de celle d'un deuxième groupe (en vert dans le tableau). Les Formations de Nicolet et de Granby forment une classe à part puisqu'elles ne peuvent être associées à l'un ou l'autre des autres groupes. Les formations géologiques du deuxième groupe (vert) sont composées de roches métamorphiques (phyllade, schiste et ardoise), tandis que celles du premier groupe (gris) font partie des deux provinces géologiques.

Tableau 18 Conductivité hydraulique moyenne selon la lithologie du roc, tel qu'estimé à l'aide de la capacité spécifique

Unité géologique	Nombre	K moyen (m/s)
Formation de Bourret	92	$5,3 \times 10^{-6}$
Formation de Bécancour	798	$3,6 \times 10^{-6}$
Groupe de Sillery non différencié	57	$3,4 \times 10^{-6}$
Formation de Mawcook	235	$3,3 \times 10^{-6}$
Formations de Sainte-Sabine et de Les Fonds	34	$3,1 \times 10^{-6}$
Formation de Granby	87	$3,1 \times 10^{-6}$
Olistostrome de Drummondville	10	$2,6 \times 10^{-6}$
Formations de Bulstrode et de Melbourne	399	$2,5 \times 10^{-6}$
Formation de Nicolet	320	$1,9 \times 10^{-6}$
Groupe de Stanbridge non différencié	15	$1,7 \times 10^{-6}$
Complexes ophiolitiques	50	$1,6 \times 10^{-6}$
Formation de Pontgravé	124	$1,6 \times 10^{-6}$
Olistostrome de la Rivière Etchemin	22	$1,5 \times 10^{-6}$
Formation de Saint-Daniel	1	$1,4 \times 10^{-6}$
Formation de Sweetsburg	102	$1,3 \times 10^{-6}$
Schiste de Sutton-Bennett	2	$1,3 \times 10^{-6}$
Groupe de Rosaire	109	$1,2 \times 10^{-6}$
Formation de Saint-Victor	256	$1,2 \times 10^{-6}$
Groupe de Caldwell	108	$1,1 \times 10^{-6}$
Formation de Pinnacle	266	$1,1 \times 10^{-6}$
Groupe de Saint-Roch	3	$8,6 \times 10^{-7}$
Formation de Gilman	181	$8,6 \times 10^{-7}$
Formation de Tibbit Hill	57	$8,5 \times 10^{-7}$
Formation de Dunham	560	$8,6 \times 10^{-7}$
Formation de West Sutton	3489	$5,2 \times 10^{-7}$
Schiste de Sutton-Bennett	464	$4,8 \times 10^{-7}$
Schiste de Sutton-Bennett	261	$4,3 \times 10^{-7}$

Cette différence est à considérer avec prudence, car les valeurs de K demeurent relativement semblables et l'erreur sur les données provenant du SIH est importante et difficile à quantifier. Les résultats de cette méthode suggèrent donc que le l'aquifère du roc fracturé, à l'échelle de la zone d'étude, ne comporte pas de différence majeure en ce qui a trait à la transmissivité.

Tableau 19 Résultats de l'analyse ANOVA selon la géologie du roc

Unité géologique	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K m/s
Formation de Bourret	A										$5,3 \times 10^{-6}$
Formation de Bécancour	A	B	C	D							$3,6 \times 10^{-6}$
Groupe de Sillery non différencié		B									$3,4 \times 10^{-6}$
Formation de Mawcook		B	C								$3,3 \times 10^{-6}$
Formations de Sainte-Sabine et de Les Fonds		B	C	D							$3,1 \times 10^{-6}$
Formation de Granby		B	C	D	E						$3,1 \times 10^{-6}$
Olistostrome de Drummondville			C	D							$2,6 \times 10^{-6}$
Formations de Bulstrode et de Melbourne				D							$2,5 \times 10^{-6}$
Formation de Nicolet					E	F					$1,9 \times 10^{-6}$
Groupe de Stanbridge non différencié						F	G				$1,7 \times 10^{-6}$
Complexes ophiolitiques						F	G	H			$1,6 \times 10^{-6}$
Formation de Pontgravé		B	C	D	E	F	G	H	I		$1,6 \times 10^{-6}$
Olistostrome de la Rivière Etchemin					E	F	G	H	I		$1,5 \times 10^{-6}$
Formation de Saint-Daniel						F	G	H			$1,4 \times 10^{-6}$
Formation de Sweetsburg							G	H			$1,3 \times 10^{-6}$
Schiste de Sutton-Bennett						F	G	H	I		$1,3 \times 10^{-6}$
Groupe de Rosaire						F	G	H	I		$1,2 \times 10^{-6}$
Formation de Saint-Victor							G	H	I		$1,2 \times 10^{-6}$
Groupe de Caldwell							G	H	I		$1,1 \times 10^{-6}$
Formation de Pinnacle		B	C	D	E	F	G	H	I	J	$1,1 \times 10^{-6}$
Groupe de Saint-Roch	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	$8,6 \times 10^{-7}$
Formation de Gilman										I	$8,6 \times 10^{-7}$
Formation de Tibbit Hill						F	G	H	I	J	$8,5 \times 10^{-7}$
Formation de Dunham								H	I	J	$8,6 \times 10^{-7}$
Formation de West Sutton										J	$5,2 \times 10^{-7}$
Schiste de Sutton-Bennett	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	$4,8 \times 10^{-7}$
Schiste de Sutton-Bennett	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	$4,3 \times 10^{-7}$

*Les lignes surlignées en vert représentent un groupe significativement différent du groupe formé par les lignes non surlignées.

5.2 Piézométrie et écoulement

La piézométrie de l'aquifère fracturé 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 (**Carte 21**) a été tracée. Compte tenu du manque de données de niveaux d'eau disponibles dans les aquifères granulaires de la zone d'étude, ainsi que leur discontinuité spatiale, aucune carte piézométrique n'a été produite pour ceux-ci.

Les niveaux piézométriques sur la zone d'étude varient d'un maximum de 670 m en zone amont à un minimum de 0 m en zone aval. La profondeur moyenne du niveau par rapport au sol est de 4,8 m. 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 (zones de recharge) aux creux de vallées (zones de décharge) qui sont souvent occupées par les cours d'eau et les plans d'eau. Dans la partie appalachienne de la zone d'étude, le gradient hydraulique varie entre 0,01 et 0,1 m/m. Les gradients les plus forts se retrouvent là où la topographie est très accidentée. Dans la partie aval de la zone d'étude, le gradient hydraulique diminue significativement et atteint 0,0002.

Un dôme piézométrique est observé dans le secteur de Notre-Dame-du-Bon-Conseil. Dans cette zone, lorsque les rivières sont suffisamment encaissées dans les dépôts meubles pour atteindre le roc, elles sont alors en contact avec l'aquifère fracturé. Les courbes isopièzes sont ainsi déviées par les rivières Nicolet, Nicolet sud-ouest et Saint-François. À l'inverse, la rivière Saint-Zéphirin coule sur l'argile et n'est pas en contact avec l'aquifère, comme le montre les courbes isopièzes. L'aquifère demeure déconnecté de la surface dans les zones les plus en aval, car l'épaisseur d'argile tend à augmenter dans cette direction. Le puits NSF-R1, situé à 2 km du lac Saint-Pierre, montre une altitude piézométrique moyenne de 6,9 m alors que l'altitude de la surface du roc est de -35 m. L'élévation du lac Saint-Pierre étant de 5 m, il ne semble pas y avoir de lien hydraulique entre l'aquifère fracturé et ce dernier.

L'intervalle de 50 m des courbes piézométriques illustrées sur la **carte 21** ne permet pas de mettre en évidence le contact aquifère-rivière dans la portion centrale de la zone d'étude. Cependant, la couche matricielle (**Carte 21**) montrant la piézométrie en fond de carte indique, par un gradient de couleur, qu'il y a un écoulement de l'eau souterraine vers les rivières et donc émergence de l'aquifère fracturé à plusieurs endroits.

Dans le cadre du projet, 19 stations de suivi 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 20** illustre les séries temporelles de la profondeur du niveau

piézométrique pour différents contextes hydrogéologiques. Elle montre que les différents aquifères ne réagissent pas de manière identique pour un même événement de précipitation. La ligne verte illustre le comportement d'un aquifère granulaire en nappe libre (PZ4S, **figure 20**). Dans ce type d'aquifère, les fluctuations du niveau piézométrique sont moins importantes que dans le cas d'un aquifère de roc fracturé en nappe libre (e.g. NSF-R1, **figure 20**). L'atténuation du signal de précipitation est causée le fait que la porosité (et le coefficient d'emménagement) d'un aquifère granulaire est supérieure à celle d'un aquifère fracturé. Une porosité plus élevée laisse plus d'espace pour l'emménagement de l'eau, ce qui entraîne une plus faible variation de niveau qu'un aquifère fracturé pour une même précipitation.

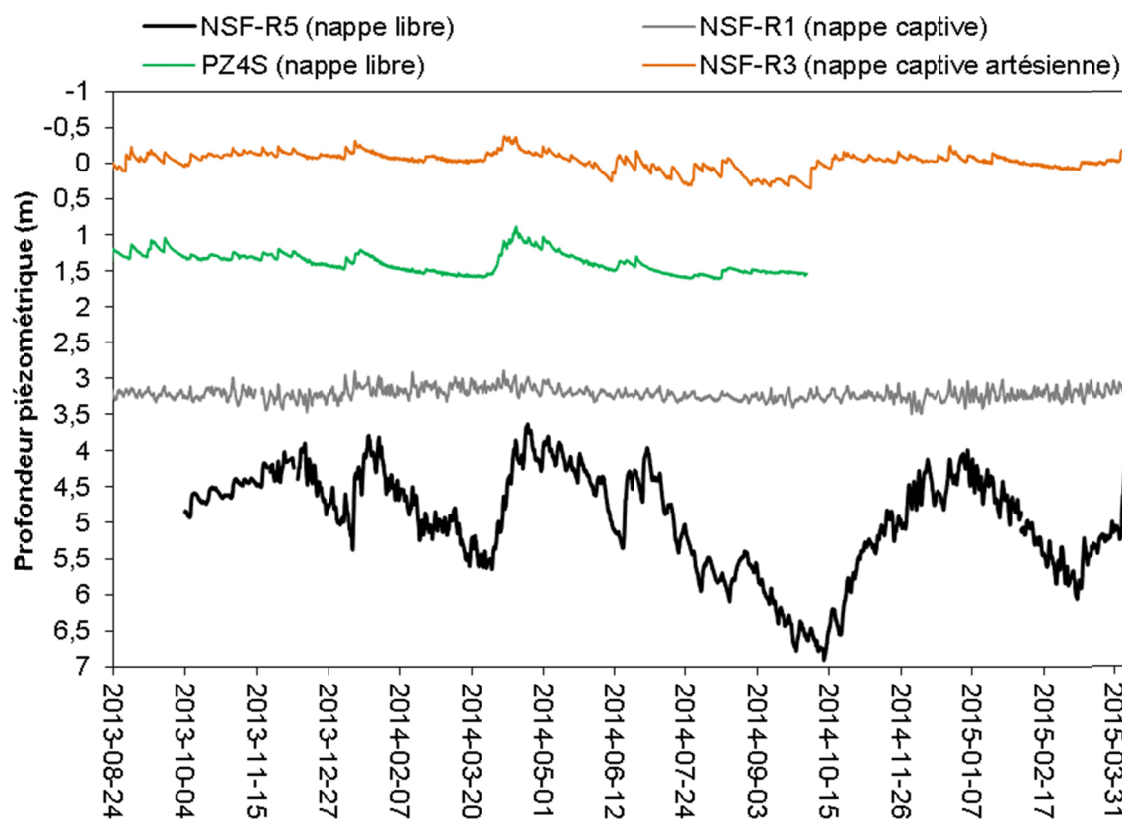
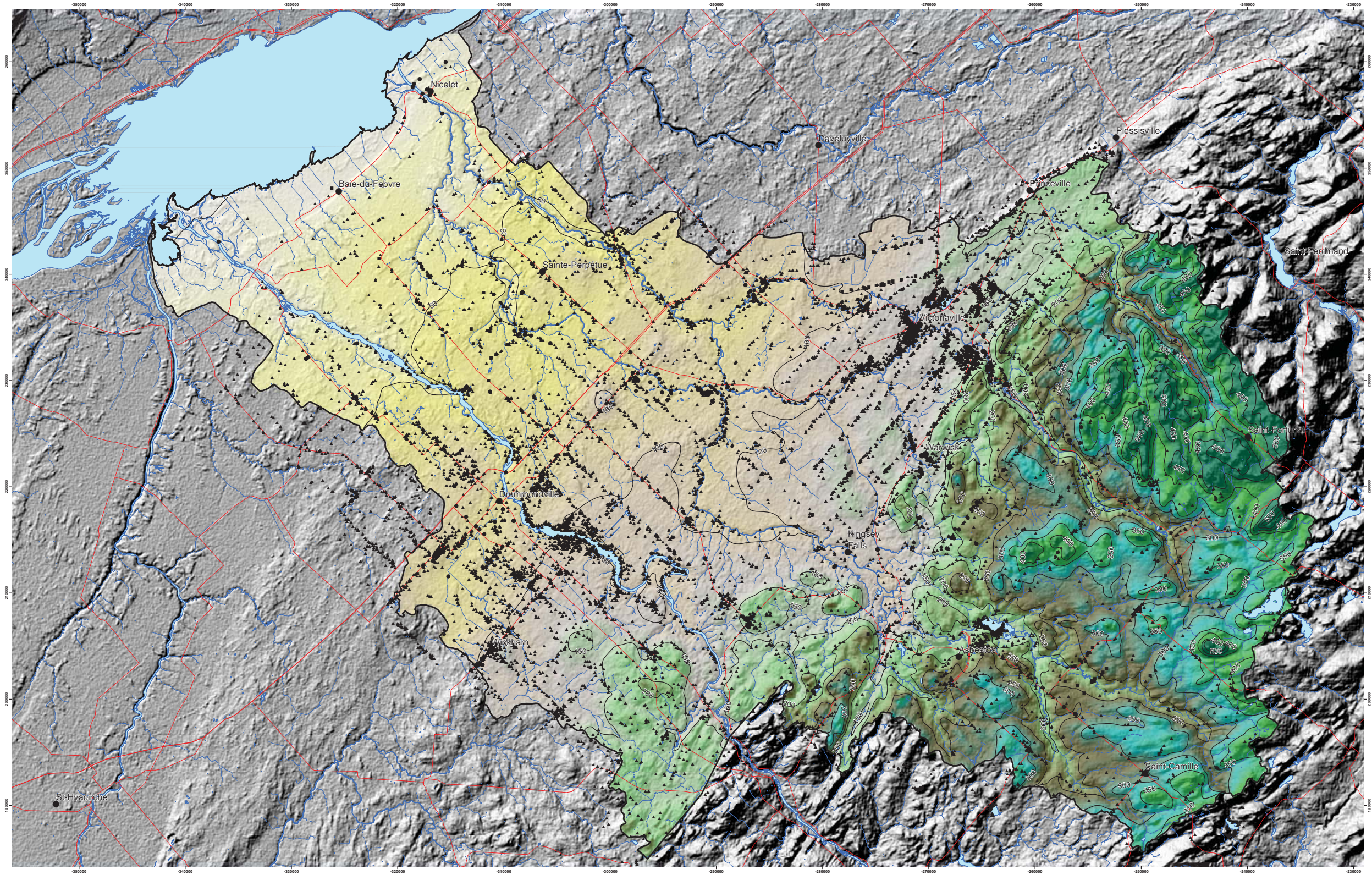


Figure 20 Séries temporelles des niveaux piézométriques dans quatre forages

Les niveaux du puits NSF-R3 (ligne orange sur la **figure 20**) dépassent fréquemment la surface du sol, sans toutefois dépasser le sommet du tubage. Ceci indique que, malgré le fait que le puits soit situé dans un aquifère fracturé d'un secteur montagneux sans aucune couverture de dépôts meubles, la nappe phréatique se comporte comme une nappe captive. Les fluctuations piézométriques y sont faibles comparativement à celles des puits NSF-R5, NSF-R6 et NSF-R7 (voir l'**annexe 12**) qui sont tous les trois dans un aquifère de roc fracturé en condition de nappe libre. Il existe donc, dans ce secteur, un réseau de fractures ayant une faible connectivité verticale et qui serait influencé par un secteur situé

plus en amont ayant une charge piézométrique plus élevée. Dans la partie aval de la zone d'étude, les fluctuations piézométriques du puits NSF-R1 sont de faible amplitude et comportent un certain «bruit» caractéristique d'une nappe en condition captive. Ces fluctuations de haute fréquence sont causées par les variations barométriques qui sont difficiles à corriger lors de la compensation barométrique. L'aquifère du roc fracturé de ce secteur n'est pas influencé par les précipitations et la zone de recharge est située à plus de 1 km en amont.

Les séries temporelles acquises durant le projet ne sont pas suffisamment longues pour observer des impacts anthropiques ou climatiques sur les aquifères. Un suivi sur une plus longue période est donc essentiel afin d'observer des changements de la piézométrie qui pourraient avoir un impact sur les volumes d'eau disponibles.



LÉGENDE

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

Élévation piézométrique (m)

Maximum : 670

Minimum : 0

— Isopièze (intervalle 50 m)

Points utilisés pour l'interpolation

Source

- Consultant
- ▲ SIH
- UQAM



MÉTADONNÉES

Section 5.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 21 Piézométrie dans le roc
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTA 50K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Piézométrie dans le roc : 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 données requises pour diffuser les données régionales à l'échelle locale et offrir aucune garantie quant à l'exactitude ou à l'intégrité des données et des conditions présentées. Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barthelette, D., Mayonnat, G., Gervais, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.

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'eau souterraine 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. Le **Tableau 20** présente certaines caractéristiques des stations de mesure de débits en période d'étiage dans onze cours d'eau non instrumentés de la zone d'étude en septembre 2012, ainsi que les superficies drainées et les types d'aquifères prédominants dans les zones concernant chacune des stations, tandis que la **Figure 21** présente les débits mesurés. Les mesures de débit obtenues en m³/s ont été converties en mm/an en considérant la superficie drainée à chaque bassin versant et la période d'une année. La localisation des stations ayant été présentée dans la **carte 11**. Des mesures de débit ont été faites aussi en 2013 sur trois autres stations, mais les différentes conditions hydrométéorologiques concernant les deux périodes ne permettent pas une comparaison directe des mesures. Pour cette raison le **Tableau 20** ne présente que les résultats de 2012.

Tableau 20 Stations de mesure de débit en période d'étiage

Période	Station	Cours d'eau	Municipalités	Superficie drainée (km ²)	Type d'aquifère prédominant
Septembre 2012	NSF 1	Rivière aux vaches	Saint-François-du-Lac	117	Captif
	NSF 3	Rivière Saint-Germain	Drummondville	269	Libre à Semi-captif
	NSF 4	Rivière Ulverton	Ulverton	171	Libre
	NSF 5	Ruisseau Francoeur	Kingsey-Falls	110	Libre
	NSF 6	Rivière des Saults	Sainte-Brigitte-des-Saults	150	Semi-captif à captif
	NSF 7	Rivière Saint-Zéphirin	La Visitation-de-Yamaska	79	Captif
	NSF 8	Rivière des Pins	Warwick	154	Libre
	NSF 9	Rivière Nicolet	Saint-Albert	786	Libre

Les débits de base mesurés en septembre 2012 varient de 4 mm/an à l'exutoire de la rivière Saint-Zéphirin (NSF 7) concernant un bassin à l'aquifère captif à faible pente en aval de la zone d'étude, à 72 mm/an à la rivière des Pins (NSF 8) où l'aquifère est libre et les pentes sont plus accentuées dans la zone en amont. Les débits de base sur les bassins où l'aquifère est principalement captif (stations NSF 1, NSF 6 et NSF 7) se distinguent de ceux où l'aquifère est libre (NSF 3, NSF 4, NSF 5, NSF 8, NSF 9, NSF 11 et NSF 12) par leurs débits d'étiage plus faibles. Les débits de base générés par le CEHQ sont calculés par séparation d'hydrogramme avec la méthode d'Eckhardt (2005). Le **Tableau 21** montre les débits de base calculés sur trois stations actives et qui possèdent

des données pour la période 1985-2010 dans la zone d'étude. Les débits de base d'une quatrième station active (30106) ne sont pas calculés par le CEHQ vu que son régime n'est pas naturel, voire influencé par la présence d'un barrage.

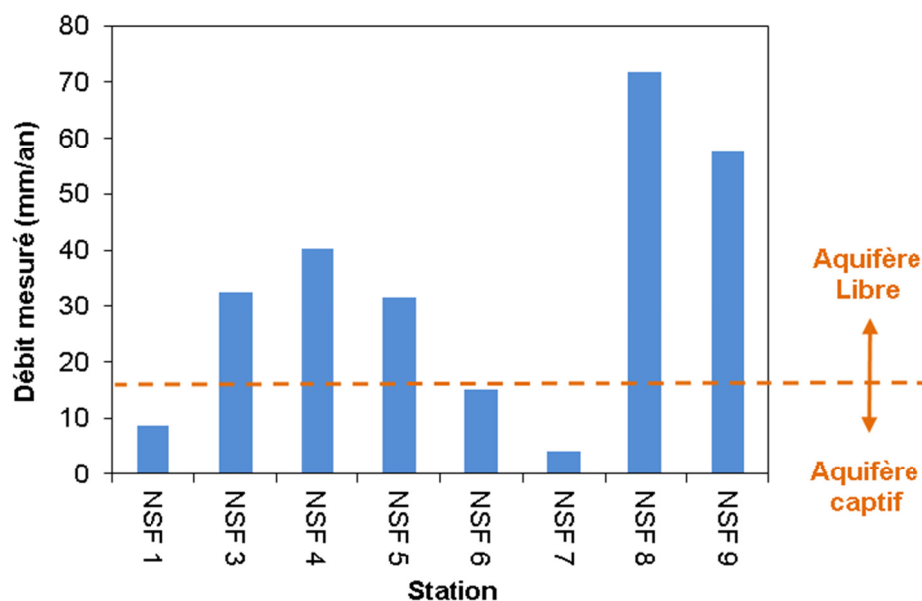


Figure 21 Mesure de débit en étiage

Tableau 21 Statistiques sur les débits de base fournis par le CEHQ 1985-2010

Station	Débit total journalier moyen (m³/s)	Débit de base journalier moyen (m³/s)*	Proportion du débit total (%)	Débit de base mm/an**
30101	11,9	2,9	24	168
30103	33,0	9,7	29	198
30262	4,8	1,1	24	127

* Débit de base estimé par le CEHQ.

** Équivalent en hauteur d'eau sur le bassin versant drainé à l'emplacement de la station hydrométrique.

Les stations montrent une différence assez significative et les équivalents débits exprimés en mm/an montrent un minimum de 127 mm/an (24% du débit total) au bassin 30262 et un maximum de 200 mm/an (29% du débit total) au bassin 30103. Le bassin 30262 s'étend sur 263 km² et est drainé par la rivière Saint-Germain, un tributaire la rivière Saint-François. Le bassin demeure dans une zone à pentes faibles où les aquifères sont libres en amont (49% de la superficie) et semi-captifs (39%) et captifs (12%) en aval. Le bassin 30103 a une superficie drainée par la rivière Nicolet beaucoup plus étendue avec 1550 km². Ce bassin présente des pentes plus importantes dans la zone amont et s'écoule aussi sur des zones d'aquifère semi-captif (16%) et captif (5%) dans sa portion aval. Toutefois, la grande partie du bassin (79%) est constituée d'aquifères en condition de nappe libre. Il est important de souligner que le filtre d'Eckhardt (2005) tend généralement

à surestimer le débit de base provenant strictement de l'aquifère régional, car il inclut en partie l'écoulement hypodermique.

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 MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2006). 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 et non spatialement distribué qui vise à reproduire les débits de surface à l'exutoire d'un bassin versant. Le modèle comprend deux réservoirs souterrains, soit un premier réservoir pour la zone non saturée et un second réservoir pour 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, 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 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 deux sous-bassins versants représentatifs de la zone d'étude, délimités par deux stations limnimétriques où les données ont été jugées suffisamment fiables et continues (voir les **tableaux 3** et **Tableau 21** pour informations sur les stations; voir la **carte 11** pour la position des stations). Pour les deux stations, les chroniques de données de débit journalier retenues comprennent une période de 29 ans de 1985 à 2013. La station 30101 enregistre les débits de l'amont du bassin de la rivière Nicolet Sud-Ouest couvrant une surface de 562 km². Ce bassin se situe totalement sur la zone appalachienne, une zone caractérisée par la présence de dépôts sédimentaires assez minces et d'affleurements rocheux aux altitudes plus élevées. Des dépôts relativement plus épais et assez imperméables se trouvent au fond des vallées. La station 30103 enregistre les débits de la rivière Nicolet et se situe dans la municipalité de Saint-Léonard-d'Aston. Couvrant une surface plus étendue que celle du bassin 30101 avec 1 550 km², ce bassin ne se limite pas seulement à la portion appalachienne de la zone d'étude, mais s'étend aussi sur les sédiments quaternaires qui se situent sur les roches des Basses-Terres du Saint-Laurent.

Les simulations ont été réalisées sur la période correspondante aux séries temporelles disponibles pour les débits des rivières. Le critère de Nash-Sutcliffe (NS; 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 deux stations. Les données météorologiques journalières (neige, pluie, température) appliquées à chacun des deux bassins modélisés ont été établies en fonction des données disponibles aux stations météorologiques présentes sur la zone d'étude. Les stations météorologiques présentant

les plus longues séries continues correspondant aux débits disponibles sont celles d'Arthabaska, de Danville et de Nicolet. La station météorologique Arthabaska se situe au centre du bassin concernant la station de mesure de débits 30103, tandis que la station météorologique de Danville est située en aval de la station de mesure de débit 30101. Plusieurs tests ont été réalisés de façon à identifier les meilleures données pour alimenter le modèle. En raison de la distance entre les stations météorologiques et aussi de leur position dans la zone d'étude, l'utilisation de méthodes d'interpolation n'a pas engendré une amélioration du calage du modèle MOHYSE. L'utilisation des données de précipitation et température de la station Arthabaska a offert les meilleurs résultats pour les deux bassins. 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 **Figure 22** et **Figure 23** illustrent les débits simulés et mesurés pour les bassins délimités par les stations 30101 et 30103. 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 printanière (**Figure 22**) et les pluies intenses automnales (**Figure 23**) provoquent des augmentations significatives du ruissellement tandis que les effets sur le débit de l'aquifère et même sur le ruissellement hypodermique sont beaucoup moins prononcés.

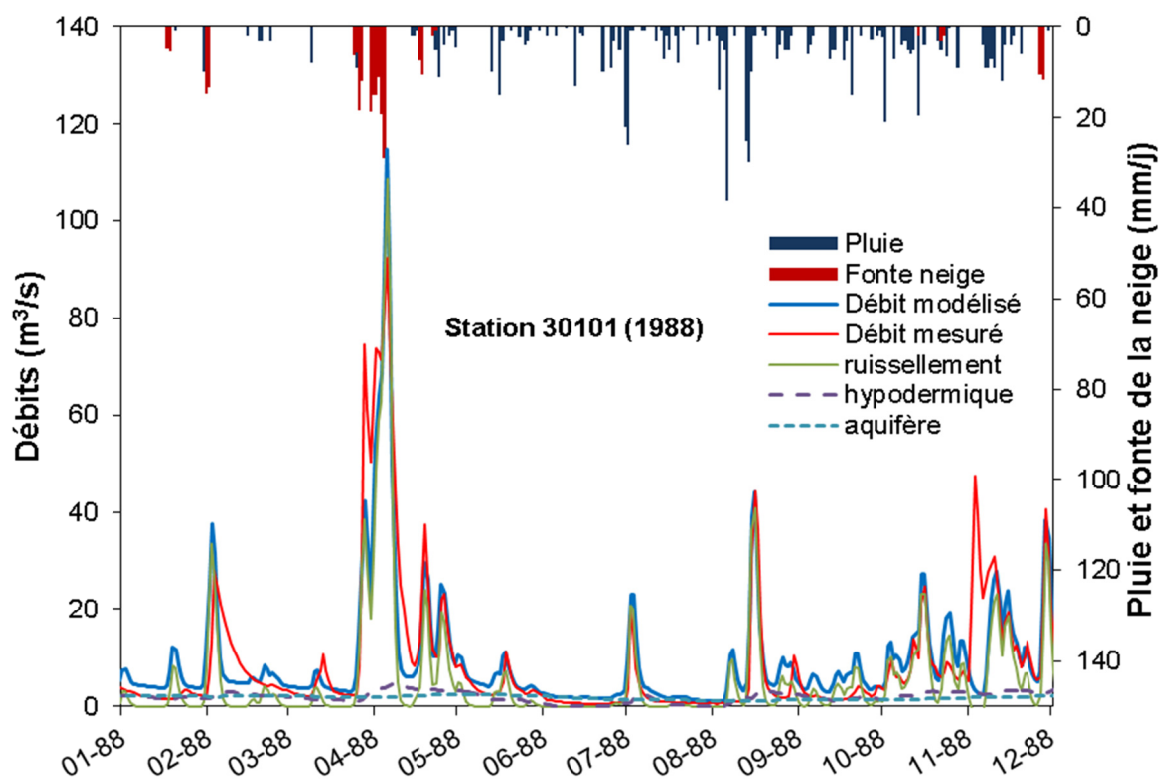


Figure 22 Débits modélisés pour la station 30101 – année 1988

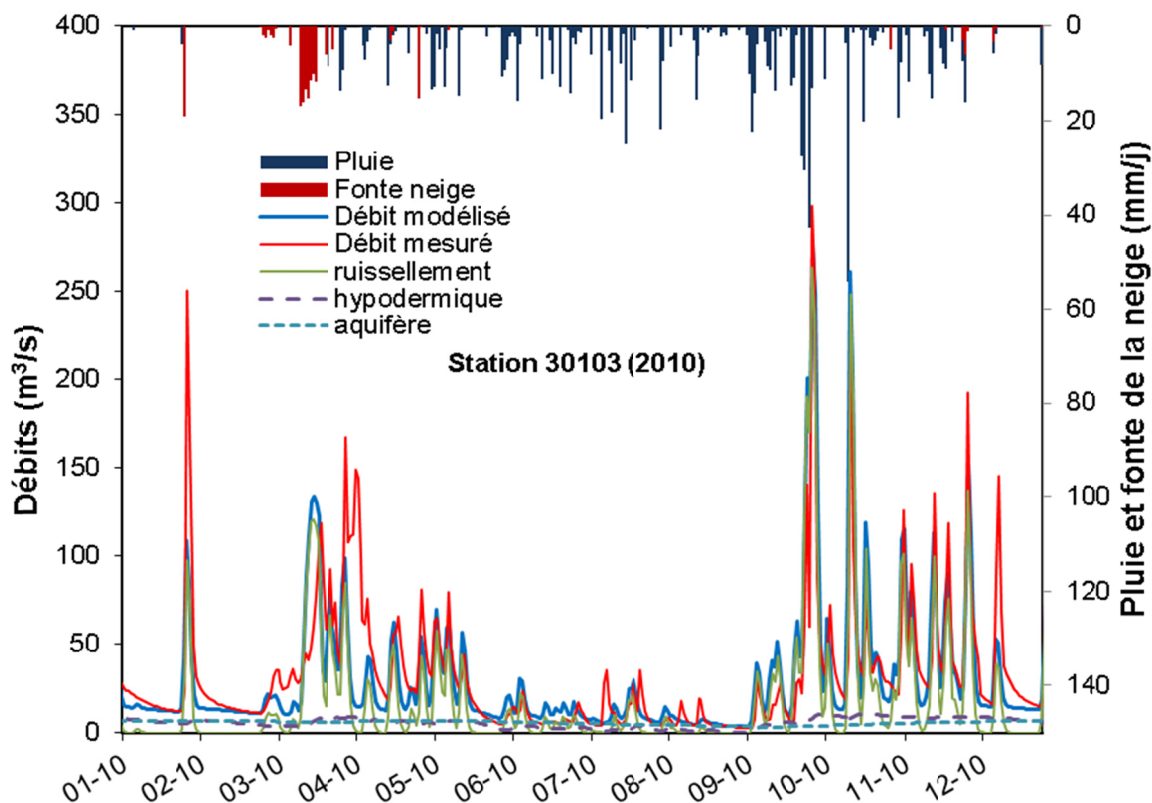


Figure 23 Débits modélisés pour la station 30103 – année 2010

Le bilan hydrique simulé par MOHYSE (**Tableau 22**) indique un ruissellement de 388 mm/an au bassin 30103 et 429 mm/an au bassin 30101, des proportions 34 et 38% des précipitations respectivement. Le ruissellement hypodermique varie de 127 mm/an dans le bassin 30101 à 158 mm/an dans le bassin 30103, soit 11 et 14% des précipitations annuelles respectivement. Pour l'ETP, MOHYSE calcule des proportions équivalentes de 41% (458 mm/an) sur le bassin 30101 et 42% (473 mm/an) sur le bassin 30103 et calcule finalement une recharge de 10% des précipitations pour les deux bassins analysés, 116 mm/an au bassin 30101 et 119 mm/an au bassin 30103.

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	%	
30101	1130	100	429	38	127	11	458	41	116	10	0.67
30103	1139	100	388	34	158	14	473	42	119	10	0.67

*NS : critère de Nash-Sutcliffe

Le calage du modèle MOHYSE aux stations 30101 et 30103 par MOHYSE est assez bon, avec un $NS > 0,65$. Un calage est considéré très bon s'il produit des valeurs de NS plus grandes que 0,75; (Moriassi et al., 2007). Les flux annuels moyens simulés de 1985 à 2013 pour le bassin 30103 (**Figure 24**) montrent que la quantité de précipitations influence directement le flux de ruissellement (Les flux annuels simulés pour le bassin de la station 30101 ne sont pas illustrés ici, mais présentent des caractéristiques similaires). La précipitation varie de 936 mm/an en 2002 à 1470 mm/an en 1990 avec une moyenne de 1131 mm/an. Le ruissellement résultant varie 229 mm/an en 2004 à 674 mm/an en 1990 avec une moyenne de 388 mm/an. La recharge et le flux hypodermique sont influencés par les précipitations, mais selon une amplitude moins marquée que pour le ruissellement. La recharge calculée présente un minimum de 90 mm/an en 1985 et un maximum de 158 mm/an en 1990, avec une moyenne de 119 mm/an tandis que le flux hypodermique varie de 120 mm/an aussi en 1985 à un maximum de 201 mm/an en 1990 la moyenne étant de 158 mm/an. L'évapotranspiration suit une tendance relativement plus indépendante des précipitations. L'évapotranspiration calculée varie de 434 mm/an en 1991 à un maximum de 507 mm/an en 2001 avec une moyenne de 473 mm/an. Les températures moyennes varient de 3,7°C en 1992 à 7,2°C en 2013. La moyenne pour la série temporelle est de 5,6°C.

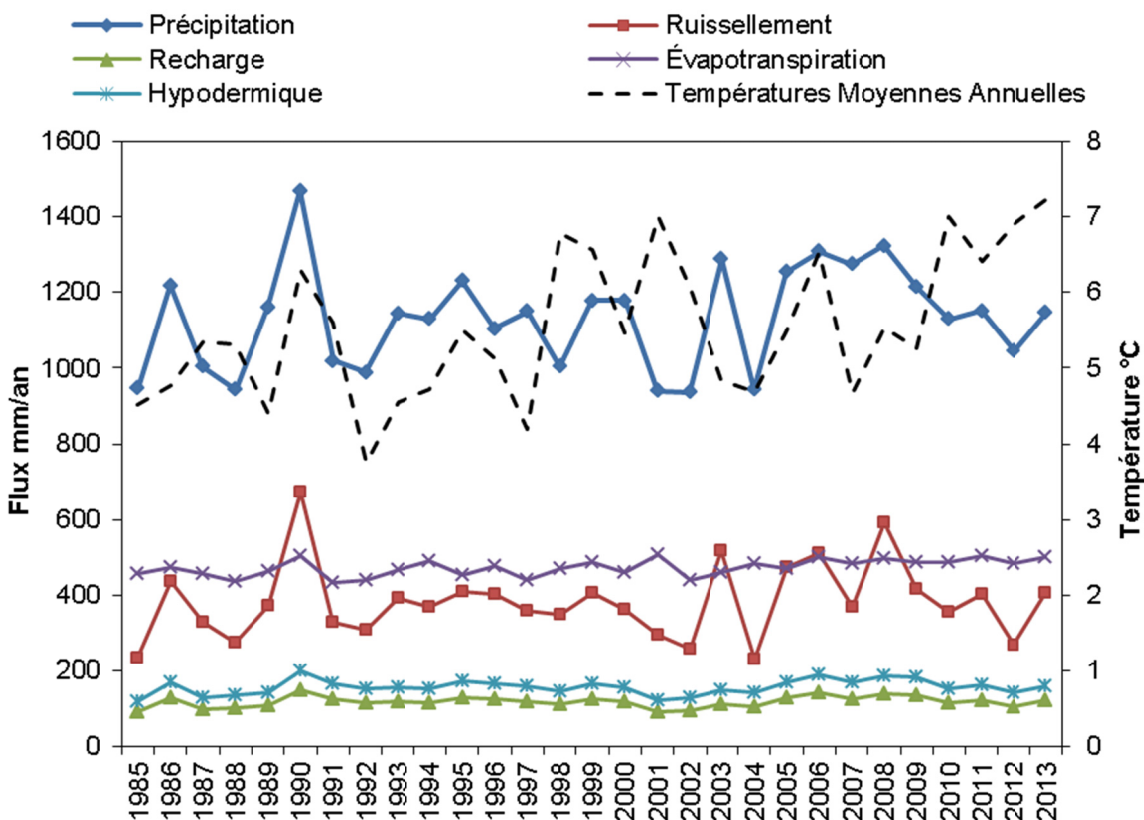


Figure 24 Flux annuels moyens simulés par MOHYSE sur le bassin 30103 entre 1985 et 2013

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 au moyen de cellules de 500 m x 500 m (18 300 cellules sur zone d'étude) sur une période de 21 ans (1989-2009). Pour y parvenir, le modèle de bilan hydrique spatialisé HydroBilan développé à l'UQAM a été utilisé (voir description du modèle à l'**Annexe 13**). Le modèle a d'abord été calé sur le bassin délimité par la station 30103 en raison de la longue chronique de débits disponible à cette station (1985 à 2013) et de la forte prédominance de zones d'aquifère libre (55 %) et semi-captif (40 %). 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 zones de nappe captive, cette recharge ne peut atteindre l'aquifère (recharge alors posée égale à zéro). Dans les zones de nappe semi-captive, 43 % de la recharge calculée par bilan hydrique est considérée comme atteignant l'aquifère rocheux. Cette proportion correspond au ratio de la recharge simulée sur le volume total d'eau infiltrée tel que simulé avec MOHYSE. Les volumes d'eau ainsi interceptés sont redirigés vers le ruissellement de surface et l'écoulement hypodermique. Ces travaux ont fait l'objet d'une présentation par Diogo Barnetche (Barnetche et al., 2015) lors de la Réunion conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC à Montréal au début mai 2015 (**Annexe 3**).

La distribution temporelle de la recharge mensuelle moyenne calculée avec le modèle HydroBilan pour la période 1989-2009 est bimodale (**Figure 25**). La recharge printanière au moment de la fonte de la neige (mars à mai) correspond à 40 % de la recharge annuelle pour le bilan hydrique spatialisé. Pour la période automnale (octobre à décembre), la recharge représente 33 % de la recharge annuelle.

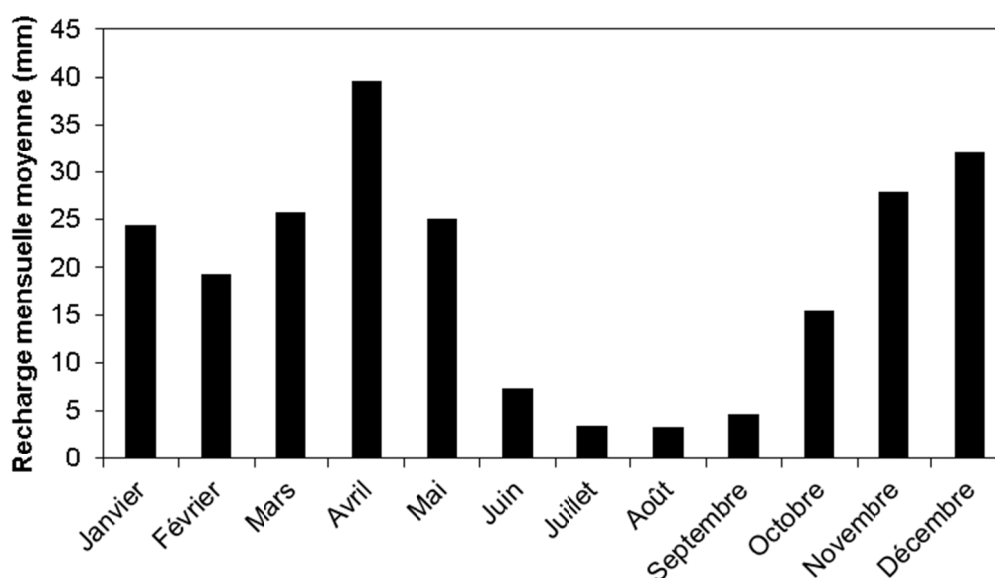


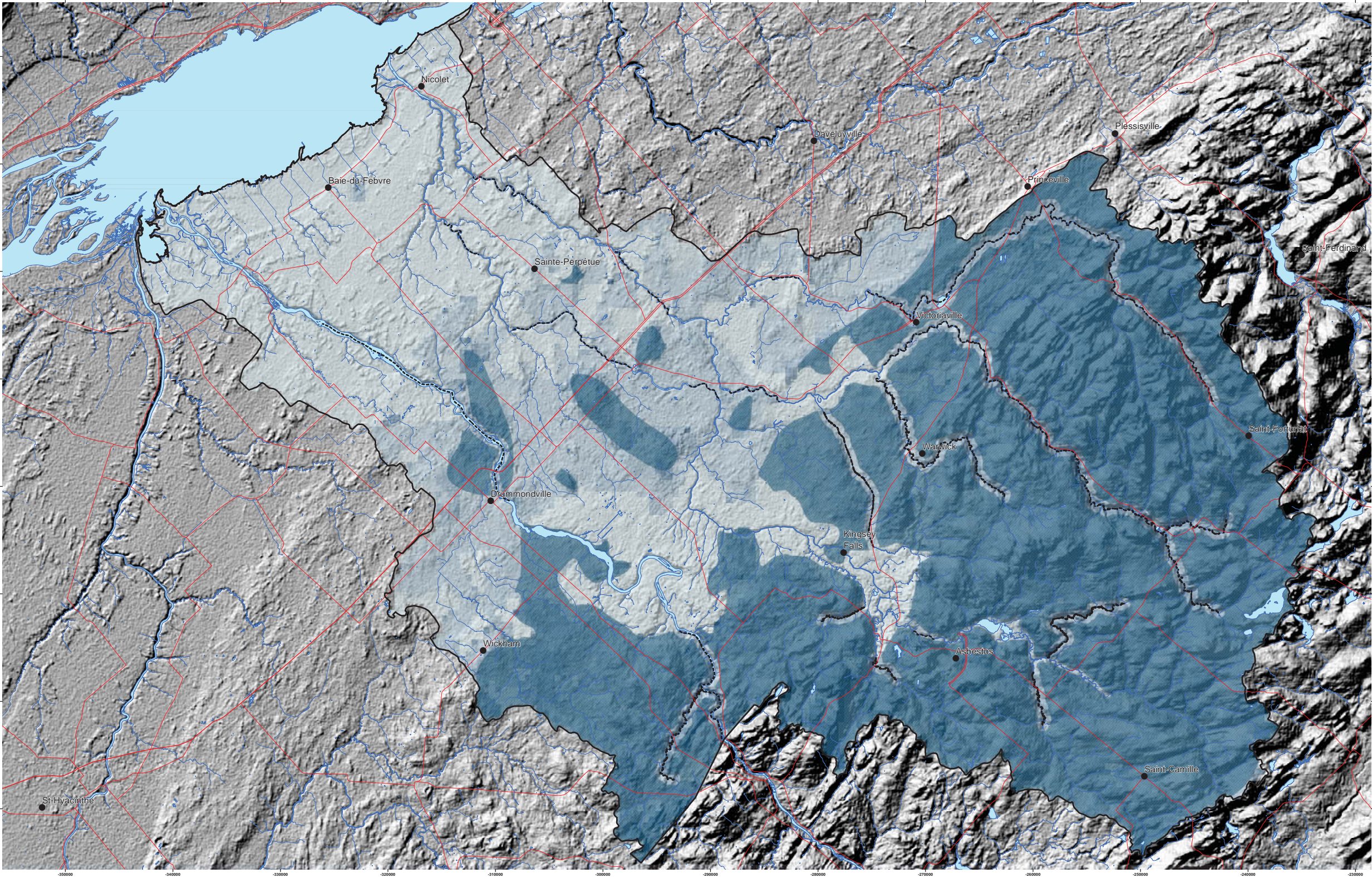
Figure 25 Recharges mensuelles moyennes obtenues par HydroBilan (moyenne 1989-2009)

À l'échelle de la zone d'étude, la distribution de la recharge varie de 0 mm/an à 518 mm/an (**Carte 22**). La moyenne est de 153 mm/an. Les zones de recharge de l'aquifère fracturé les plus importantes sont localisées dans la partie aval de la zone d'étude avec des taux de recharge généralement supérieurs à 200 mm/an. Plus en aval, les zones de recharge sont contrôlées par l'épaisseur des dépôts marins et du till. Le roc affleure à plusieurs endroits au sud de l'autoroute 20 créant des zones de recharge importantes à l'échelle locale.

5.3.4 Zones de recharge préférentielle et de résurgence

Les zones où la recharge est supérieure à 200 mm/an ont été identifiées comme zones de recharge préférentielle de l'aquifère au roc (**Carte 22**). Le seuil de 200 mm/an représente le 47^e percentile des valeurs de recharge spatialisée calculées à l'aide du modèle HydroBilan. 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**). 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 résurgences de l'eau souterraine sont principalement constituées par le réseau hydrographique lorsque ce dernier est en contact avec l'aquifère du roc. Les secteurs où le gradient hydraulique vers les cours d'eau est élevé (**Section 5.2**) constituent généralement des zones de résurgence potentielles de l'eau souterraine. Dans la zone amont, les cours d'eau principaux (rivière Nicolet, Nicolet centre, Nicolet sud-ouest et Bulstrode) sont les zones principales de résurgence. Dans la partie centrale, la présence de dépôts argileux limite la décharge de l'eau souterraine provenant de l'aquifère fracturé en isolant la rivière de l'aquifère. Seulement quelques portions sont en contact avec ce dernier. Plus en aval, la rivière Saint-François, ainsi qu'une partie des rivières Nicolet et Nicolet Sud-Ouest drainent l'eau de l'aquifère. Près du fleuve Saint-Laurent, l'épaisseur des dépôts argileux isole complètement l'aquifère du fleuve empêchant la décharge d'eau souterraine vers le fleuve. Il existe peu de sources répertoriées sur la zone d'étude. Dans les secteurs montagneux, les forts gradients hydrauliques créent des zones potentielles de résurgences. Ces dernières sont parfois utilisées pour alimenter des réseaux privés d'eau potable.



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES

Section 5.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

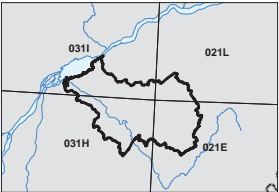
Carte 22 Zones préférentielles de recharge et de résurgences
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Zones préférentielles de recharge et de
résurgence : UQAM

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 données 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 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.

Revision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barmette, D., Meyzonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.

5.4 Bilan hydrique régional

Le bilan hydrique régional (**Figure 26**) a été calculé à l'aide du modèle HydroBilan entre 1989 et 2009 (voir **section 5.3.3**). Pour cette période, les apports verticaux (précipitations + fonte) varient de 893 à 1287 mm/an et sont en moyenne de 1063 mm/an. Le modèle simule un ruissellement total (de surface et hypodermique) moyen pour l'ensemble de la zone d'étude de 271 à 570 mm/an avec une moyenne de 444 mm/an, soit l'équivalent de 42 % des apports verticaux, une proportion relativement plus faible que celle donnée par MOHYSE pour le bassin 30103 (48%). L'évapotranspiration réelle annuelle simulée par le bilan hydrique varie de 421 à 546 mm/an, la moyenne étant de 467 mm/an ou 44 % des apports verticaux, soit une valeur similaire à celle obtenue avec MOHYSE sur le bassin 30103. L'infiltration calculée pour l'ensemble de la zone d'étude varie de 66 à 518 mm/an, avec une moyenne de 242 mm/an. La recharge potentielle ayant été calculée en tenant en compte la présence de zones où l'aquifère fracturé est semi-captif et captif. Ainsi la recharge est considérée nulle dans les zones captives et atteint un maximum de 518 mm/an dans les zones à l'aquifère libre, la moyenne régionale étant de 152 mm/an (14% des apports verticaux). La recharge est minimale où les dépôts de surface sont peu perméables, à l'aval de la zone d'étude et 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 (voir la **carte 22** pour la distribution spatiale). La proportion de la recharge est relativement plus grande que celle simulée avec MOHYSE sur le bassin 30103 (10 %). Cette valeur de recharge est également inférieure au débit de base moyen observé fourni par le CEHQ (200 mm/an pour la station 30103). Il est toutefois important de rappeler que les débits de base fournis par le CEHQ surestiment probablement la recharge puisqu'ils incluent une composante d'écoulement hypodermique.

La variabilité temporelle des flux annuels moyens (**Figure 27**) montre que l'aquifère agit comme un réservoir qui atténue les fluctuations annuelles des apports verticaux. En effet, si le ruissellement de surface varie de manière assez marquée suivant les apports verticaux, l'infiltration 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.

Le débit total pompé à l'aquifère par les grands préleveurs et les particuliers correspond à une hauteur d'eau de 5 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 moins de 3% de la recharge, soit environ 5 mm/an (voir **section 6.1**). Ce flux très faible s'explique par les faibles taux de recharge et les faibles conductivités hydrauliques dans la partie aval de la zone d'étude où des écoulements souterrains très lents ont été mis en évidence par la géochimie (**section 5.6**). Il est probable que l'aquifère soit alimenté de l'amont (des

Appalaches) par un flux d'eau souterraine. Cette valeur n'a toutefois pas pu être quantifiée.

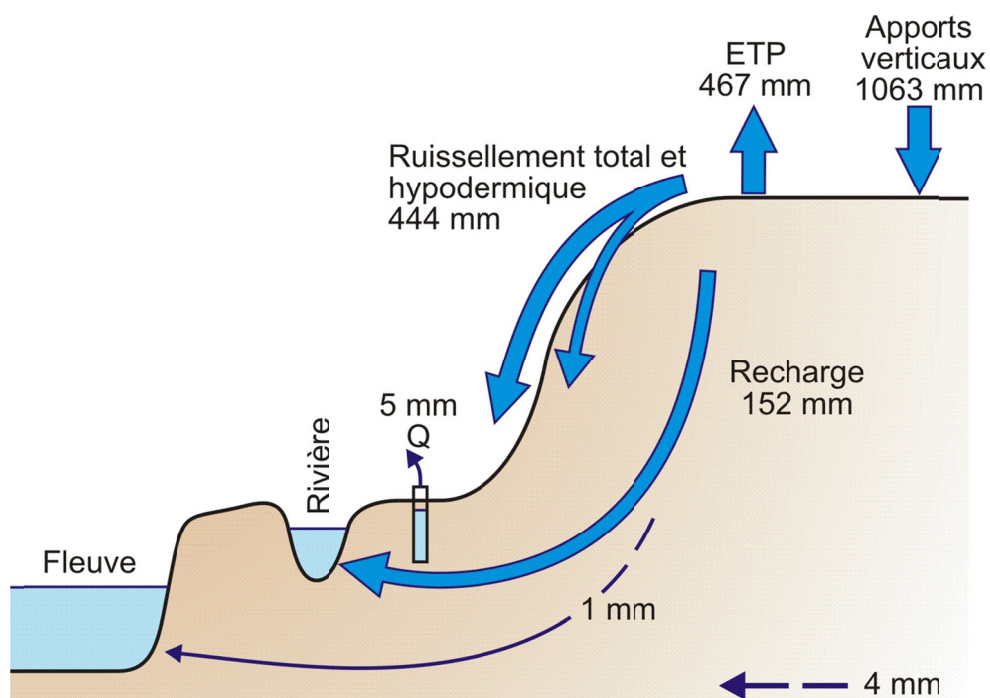


Figure 26 Bilan hydrique de la zone d'étude

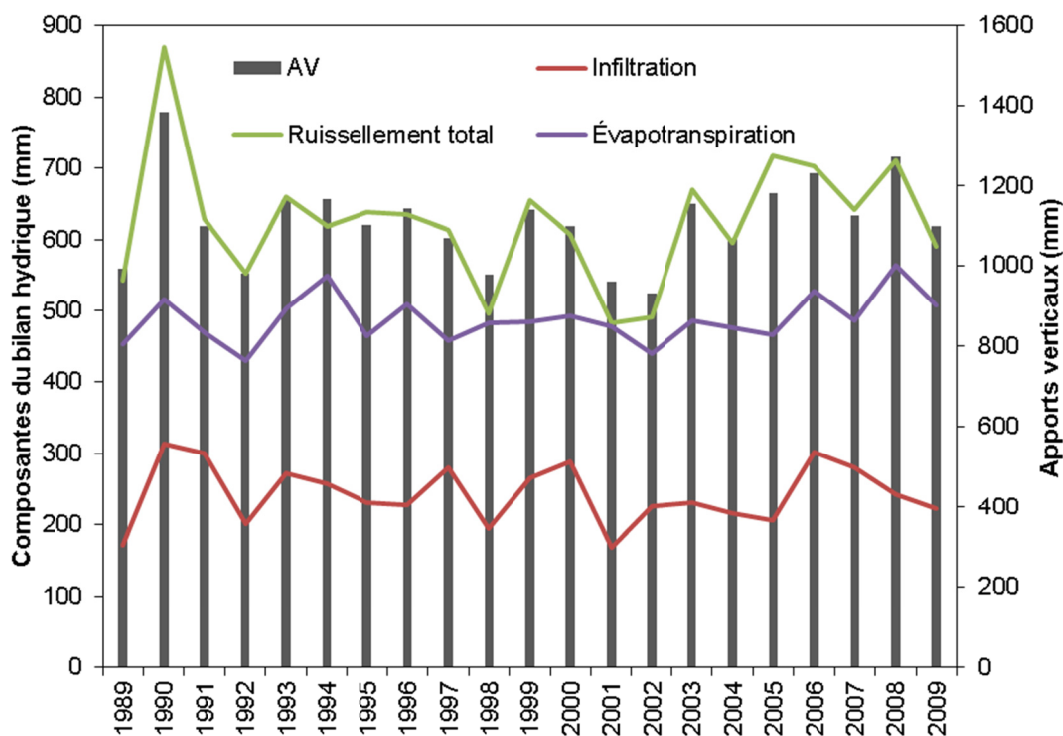


Figure 27 Évolution temporelle des flux moyens du bilan hydrique

5.5 Vulnérabilité des nappes

La vulnérabilité de l'eau souterraine pour la zone Nicolet/Saint-François a été estimée grâce à l'indice DRASTIC, en suivant les règles de l'art de cette méthode développée par Aller et al. (1987). La carte DRASTIC a été réalisée pour l'ensemble du bassin. Une synthèse de l'approche et des calculs intermédiaires est présentée à l'**annexe 14**.

Carte DRASTIC de l'aquifère rocheux

L'indice de vulnérabilité de l'aquifère rocheux varie de 24 à 185 sur la zone d'étude (**Carte 23**~~Erreur ! Source du renvoi introuvable.~~). Vingt-huit pour cent de la zone d'étude présente une vulnérabilité de l'aquifère au roc qui varie de très faible à moyenne (**Figure 28**). Les 72 % restants présentent un indice DRASTIC supérieur à 100 (seuil du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection, 2014 (RPEP)) et seulement 1 % dépasse le seuil de 180 (RPEP).

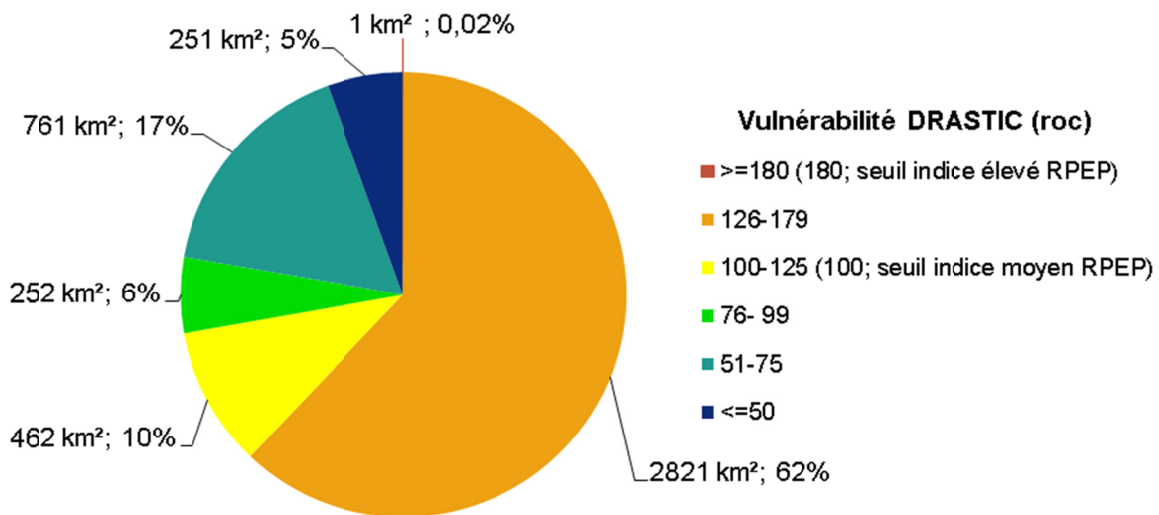


Figure 28 Superficie des classes de vulnérabilité DRASTIC au roc

En aval de la zone d'étude, la méthode DRASTIC indique une vulnérabilité faible à très faible (indice DRASTIC de 24 à 75) pour les secteurs où l'aquifère au roc est en conditions captives, soit pour tout le secteur couvrant l'aval de la zone, de l'axe entre Sainte-Perpétue et Saint-Bonaventure jusqu'au fleuve. Ce secteur est associé à la présence de dépôts argileux qui fournissent généralement peu de points à la cote D (dans le cas d'un aquifère à nappe captive la profondeur de la nappe correspond à la base de l'argile), à la cote R (recharge nulle en présence d'argile), à la cote S (cote minimale quand l'argile se trouve à la surface du sol) et à la cote 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 la cote A (milieu aquifère), pour les différentes formations géologiques. La cote S apporte également quelques variations aux valeurs de DRASTIC, car bien que des dépôts d'argile recouvrent généralement la partie aval de la zone d'étude, des dépôts plus grossiers se superposent aux dépôts argileux par endroits. Il est à noter qu'un important affleurement rocheux dans le secteur de Baie-du-Febvre représente le seul contexte non confiné de la portion aval de la zone d'étude.

Dans la partie centrale de la zone d'étude et vers le piémont appalachien, la méthode DRASTIC indique une vulnérabilité contrastée avec présence simultanée de zones dont la vulnérabilité est faible à très élevée. Les zones les plus vulnérables sont associées à des cotes D, R et I apportant beaucoup de points, particulièrement dans le couloir central délimité par les villes de Warwick, Kingsey Falls, Saint-Cyrille-de-Wendover et Notre-Dame-du-Bon-Conseil, ainsi qu'à l'extrême ouest de la zone. Ainsi, la faible profondeur de la nappe apporte des points avec la cote D dans la partie centrale. Des taux de recharge relativement élevés apportent également des points par l'entremise de la cote R pour de grandes superficies, particulièrement à l'ouest. Les cotes I sont plus élevées 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 la cote R, mais aussi pour les cotes I et S à l'emplacement de zones de confinement locales avec présence de sols plus fins. Ceci est le cas particulièrement pour un grand secteur dans l'axe des villes Danville-Drummondville où l'épaisseur de dépôts argileux est importante. Des dépôts organiques, généralement associés aux milieux humides (p. ex. tourbières) peuvent également faire diminuer la vulnérabilité DRASTIC, car ils sont associés à de faibles taux de recharge. Bien que moins directement observable, ce type de dépôts diminue la valeur de DRASTIC dans certains secteurs à l'est de la portion centrale de la zone d'étude. Ces zones pour lesquelles des points sont perdus marquent des enclaves où la vulnérabilité baisse et devient moyenne (DRASTIC de 76 à 100).

Pour le secteur des Appalaches, la vulnérabilité DRASTIC est généralement élevée (DRASTIC de 126 à 150) à très élevée (DRASTIC de supérieur à 150). Pour cette région, des points de l'indice DRASTIC sont majoritairement apportés grâce aux taux de recharge élevés (indice R). Des profondeurs de nappe (indice D) généralement faibles, c'est-à-dire près de la surface, viennent également ajouter beaucoup de points à l'indice DRASTIC. Des points pour les zones les plus vulnérables sont par ailleurs apportés par la cote A (milieu aquifère), pour les lithologies contrastées retrouvées au sein des Appalaches. La vallée de la rivière Nicolet, dans le secteur de Danville et d'Asbestos, est caractérisée par une vulnérabilité faible étant donné les conditions de nappe captive qui y prévalent. Cette situation est cependant circonscrite au fond de la vallée.

Indice DRASTIC des aquifères granulaires

Étant donné la distribution hétérogène des aquifères granulaires et le manque d'information reliée à celles-ci, aucune carte à l'échelle de la zone d'étude n'a été

réalisée. Cependant une compilation des indices DRASTIC disponibles dans les différents rapports hydrogéologiques qui ont été fournis par les municipalités a été réalisée. Cette compilation indique que les aquifères granulaires en nappe libre ont un indice DRASTIC supérieur à 100 (**Tableau 23**) et sont donc vulnérables. Cette vulnérabilité est causée par la faible profondeur de la nappe phréatique, une recharge élevée et une conductivité hydraulique élevée. Les aquifères granulaires en condition de nappe semi-captive ou captive sont quant à elles moins vulnérables avec des indices DRASTIC inférieurs à 100. Les faibles taux de recharge ainsi que la présence d'un couvert de dépôts argileux contribuent à un indice faible. Donc, à partir de ces informations et des données obtenues dans le Projet, il est possible d'affirmer que les aquifères granulaires en condition de nappe libre sont en général vulnérables à la contamination de surface.

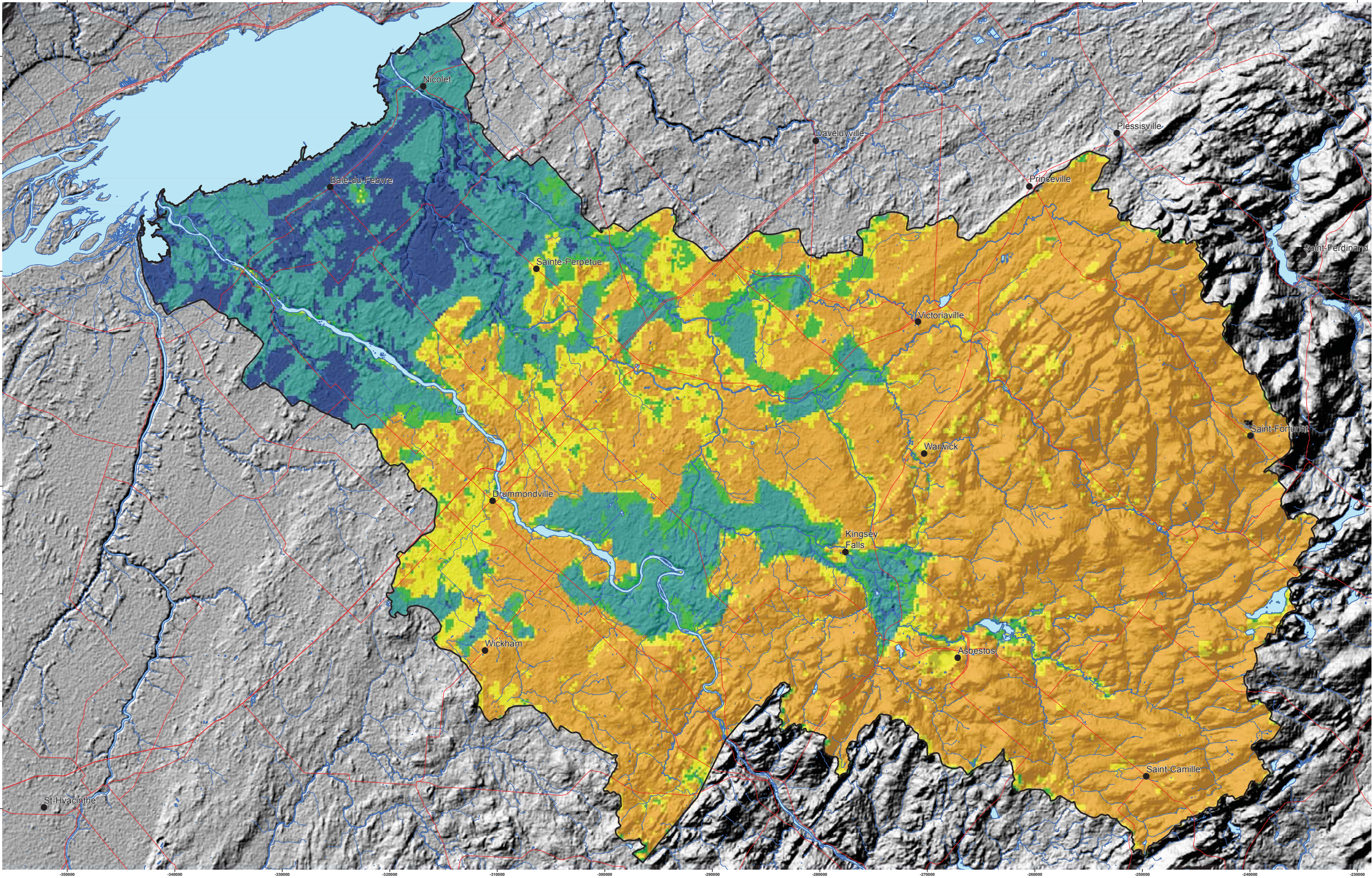
Tableau 23 Indices DRASTIC pour différents aquifères granulaires

Site	confinement	DRASTIC
Durham-Sud	Libre	>150
Kinsey Falls	Libre	>150
Notre-Dame-du-Bon-Conseil	Libre	>150
Saint-Christophe-d'Arthabaska	Libre	>150
Sainte-Perpétue	Captif	<100
Saint-Léonard-d'Aston	Captif	<100
Tingwick	Libre	>150
Victoriaville	Libre	>150
Wickham	Captif	<100
Warwick	Libre	<150

Le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP; (Québec, 2015) qui remplace graduellement le Règlement sur le captage des eaux souterraines, stipule certaines restrictions d'utilisation du sol lié à l'entreposage et à l'utilisation d'amendements agricoles. Celles-ci s'appliquent à l'intérieur du périmètre de protection d'un lieu de captage d'eau souterraine, lorsque l'indice DRASTIC est entre 100 et 180, et supérieur à 180 sur une quelconque portion de cette aire. Au sens du RPEP, 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.

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.



LÉGENDE

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

Indice DRASTIC

- ≥ 180 (180; seuil indice élevé RPEP*)
- 125 - 179
- 100 - 124 (100; seuil indice moyen RPEP)
- 75 - 99
- 50 - 74
- < 50

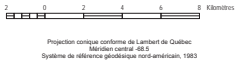
*RPEP: Règlement sur le prélèvement des eaux
et leur protection



MÉTADONNÉES

Section 5.5 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 23 Indice DRASTIC de l'aquifère au roc ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC

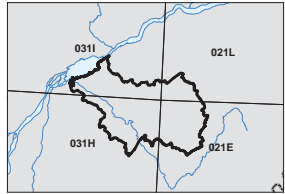


Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Système de référence géodésique NAD 83

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K
Vulnérabilité de l'aquifère du roc régional: UQAM

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 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'attaché 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 données présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meyzonnat, G.,
Gervais, M.-L., Ouellet, M. A. 2015. Profil de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDECC.

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 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ se produisant lors de l'interaction entre l'eau souterraine et la matrice aquifère et; 3) par le mélange avec des eaux résiduelles 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 d'eaux souterraines entre elles. Les types d'eau sont définis en fonction des concentrations en ions majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-}) selon leur prédominance à représenter plus de 50% de la charge de la solution. Les concentrations pour les anions HCO_3^- et CO_3^{2-} ont été calculées à partir de la mesure de l'alcalinité totale et du pH.

L'électro-neutralité de chaque échantillon d'eau a été testée et si les concentrations en cations majeurs (Ca, Mg, Na, K) et en anions majeurs (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl) différaient de plus de 10%, l'analyse était rejetée. Au total, 189 échantillons respectant l'électro-neutralité ont été retenus pour les analyses, soit 94% des échantillons prélevés. Parmi les eaux de signature géochimique peu évoluée, indicatrices des zones de recharge, le type Ca- HCO_3^- est le plus répandu dans la zone d'étude et se retrouve principalement dans les zones d'aquifère libre (**Figure 29**). Ce type d'eau est issu de la dissolution de matériaux carbonatés lors de la recharge et représente 71% des échantillons (108 puits à l'aquifère fracturé et autres 29 à l'aquifère granulaire), totalisant 135 points de prélèvement. Le type d'eau Mg- HCO_3^- est aussi caractéristique des zones de recharge et a été identifié à deux reprises dans des puits à l'aquifère granulaire (1%). Des eaux de type Ca-Cl ont été repérées à cinq sites (3%) dont un en aquifère granulaire et les autres quatre dans l'aquifère fracturé. Ce type d'eau peut être associé aux zones de recharge. La prédominance de l'anion Cl^- et la non-détection de Br dans ces échantillons pourrait encore indiquer une contamination d'origine anthropique, éventuellement par sel de route. Dans les signatures géochimiques indicatrices des zones d'aquifère semi-captif et captif se trouvent les types d'eau Na- HCO_3^- et Na- SO_4^{2-} (20% des échantillons) dénotant que l'eau a subi une évolution depuis la recharge par échange cationique $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$ suite à l'interaction de l'eau avec la matrice aquifère. Le type d'eau Na- HCO_3^- a été observé dans 31 puits atteignant l'aquifère fracturé et à six puits dans l'aquifère granulaire. Les eaux de type Na- SO_4^{2-} ont été observées au puits NSF147 et au forage NSF R8 dans la zone aval du bassin, des forages atteignant les roches du groupe Queenston riches en gypse (CaSO_4). Ce type d'eau pourrait être le résultat d'un mélange entre des eaux salines (Na-Cl) et des eaux de type Ca- SO_4^{2-} . Enfin 5% des échantillons sont des eaux de type Na-Cl. Ce type d'eau se retrouve sur neuf puits dont sept atteignent l'aquifère fracturé. Ce type d'eau représente une eau évoluée avec une influence saline provenant sans doute de l'eau interstitielle des argiles marines de la Mer de Champlain. Ce processus peut être évoqué pour le forage au roc R1, le plus proche du fleuve Saint-Laurent et qui présente

des ratios en mg/L de Br/Cl ($>0,0035$) et de Na/Cl (0,55) concordant avec ceux de l'eau de mer (Hem, 1985). Toutefois les autres échantillons de type Na-Cl proviennent des zones intermédiaires et amonts sur la zone d'étude, i.e. des zones où l'aquifère est semi-captif ou libre. Ces eaux présentent des ratios Na/Cl supérieurs à celui de l'halite (0,65), une indication que les fortes concentrations en Na-Cl peuvent être expliquées par une contamination au sel de déglacage.

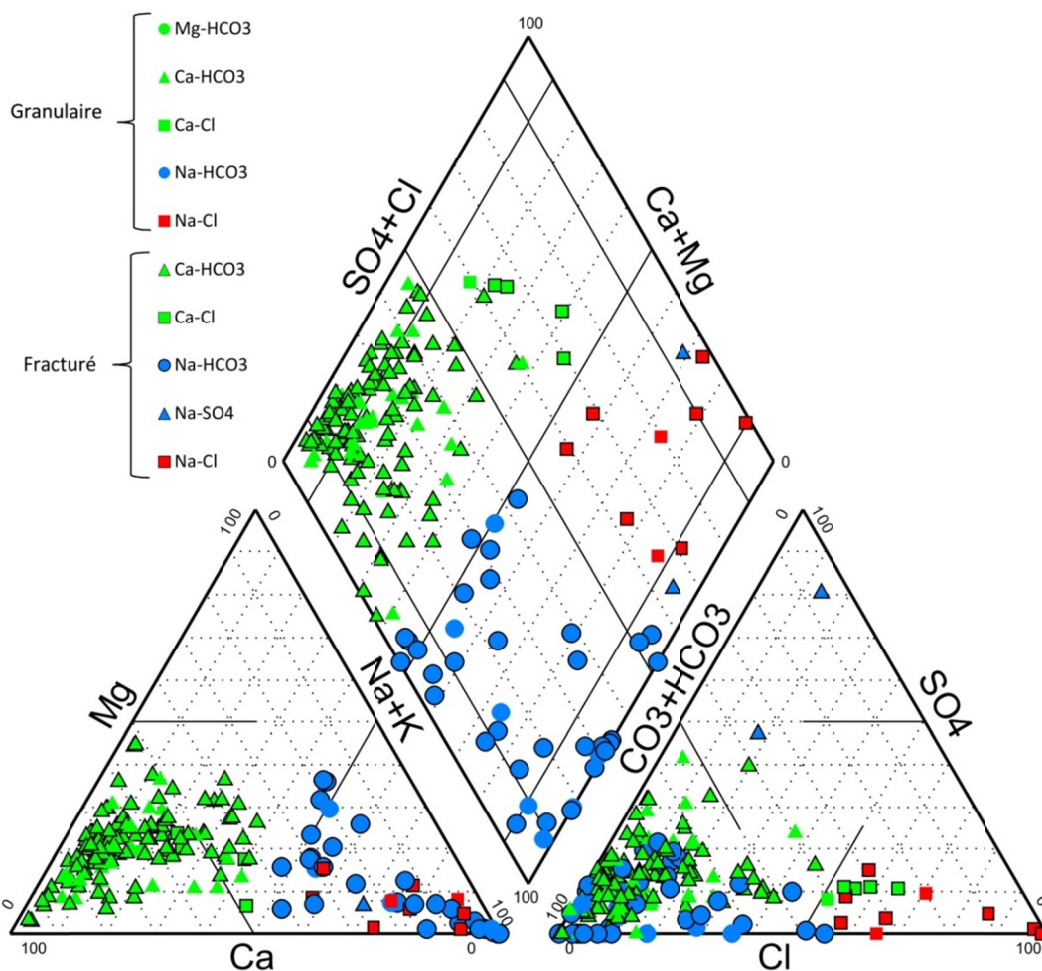


Figure 29 Diagramme de Piper pour les eaux souterraines dans la zone d'étude

La **Figure 30** met en évidence les processus d'échanges cationiques et de mélanges intervenant dans l'eau souterraine. Les points concernant les types d'eau Na-HCO₃ situés au-dessus de la droite Na=Cl sont indicateurs d'un échange cationique, car la concentration de Na⁺ n'est pas corrélée avec celle de Cl⁻. Les eaux de type Na-SO₄, relativement plus chargées en sodium suivent la droite Na=Cl, ce qui indique un mélange avec des eaux de type Na-Cl.

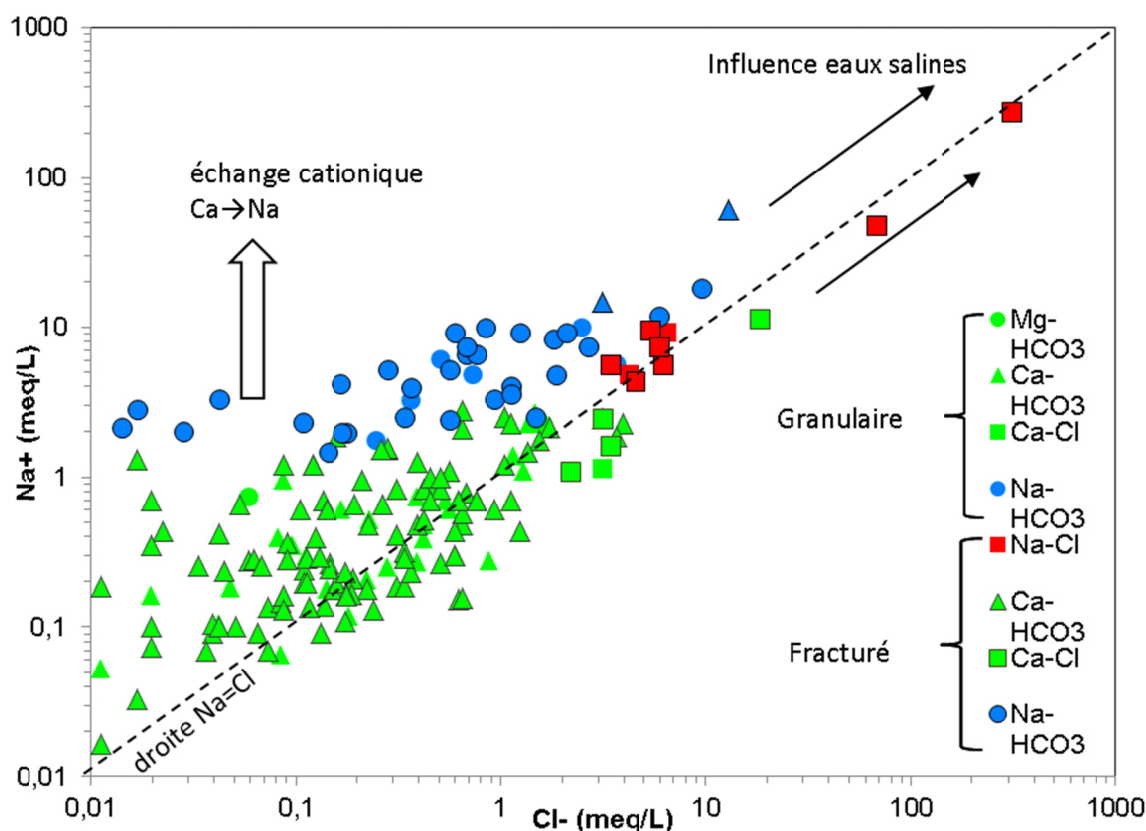
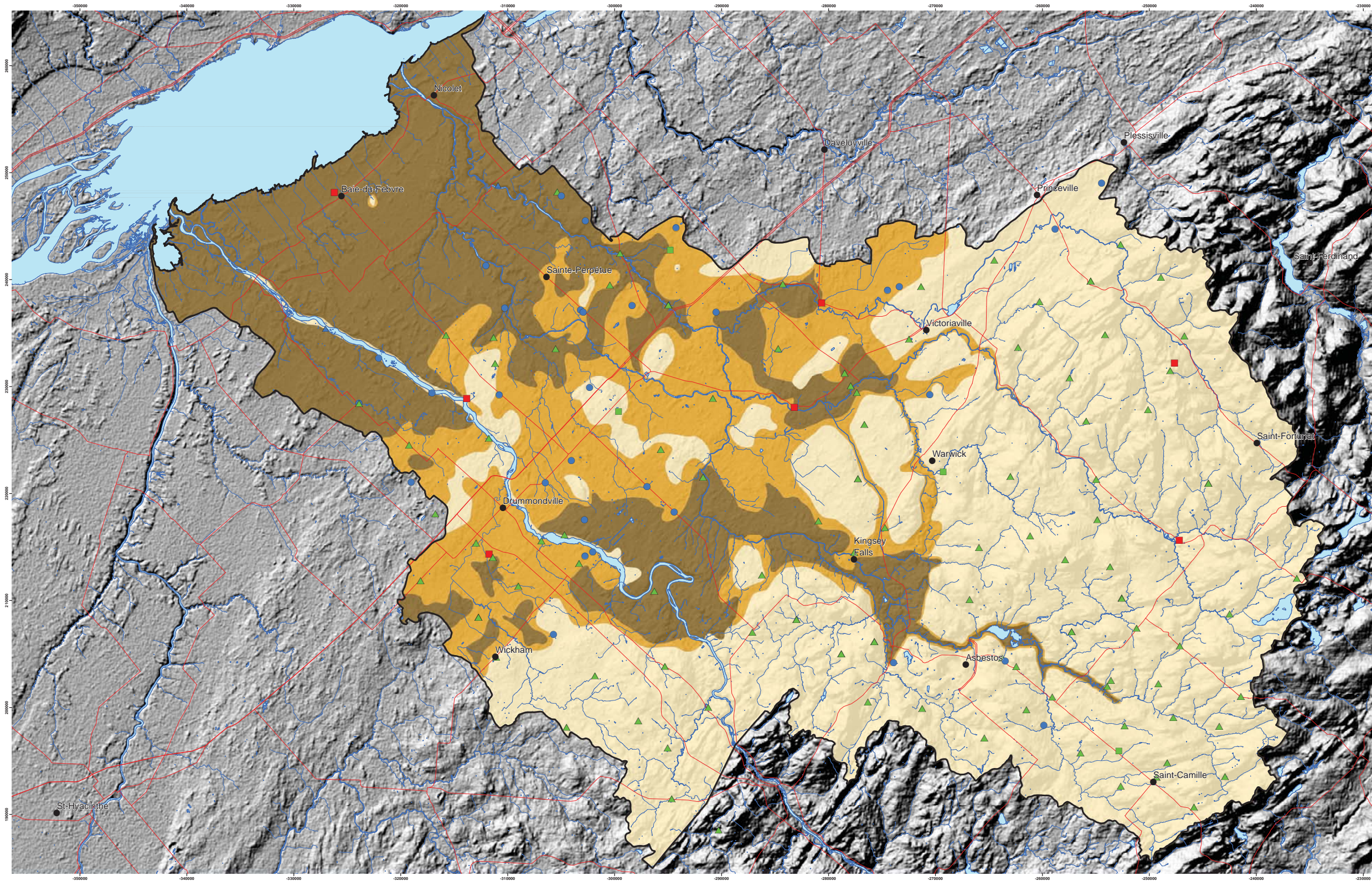


Figure 30 Relation Na^+/Cl^- dans les eaux souterraines au roc

La région amont de la zone d'étude présente une forte prédominance des eaux du type Ca-HCO_3 associé à des eaux de recharge marquant la présence d'un aquifère en conditions libres (**Carte 24**). Le secteur intermédiaire du bassin montre une augmentation graduelle de la présence d'eaux de type Na-HCO_3 , ayant subi une évolution d'échange cationique. Ce secteur est marqué par la transition entre les zones d'aquifères libres et confinés, où les zones d'aquifère semi-captif sont prédominantes et favorisent l'évolution de la signature géochimique des eaux. La présence conjointe d'eaux du type d'eau Ca-HCO_3 y est observée, indiquant ainsi qu'on peut trouver çà et là des zones de recharge selon des conditions présumées semi-captives. Enfin de l'eau saline du type Na-Cl est présente dans la portion aval du bassin. Elle peut être associée 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 eau souterraine

Peu évoluée, recharge

- ▲ Ca-HCO₃ (n=108)
- Ca-Cl (n=4)

Evoluée, semi captif et captif

- Na-HCO₃ (n=31)
- ▲ Na-SO₄ (n=2); Na-SO₄

Strictement captif

- Na-Cl (n=7)



MÉTADONNÉES

Section 5.6 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 24 Types d'eau pour l'aquifère au roc

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS

QUÉBEC

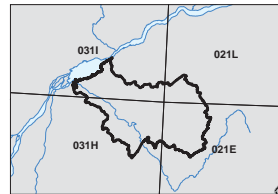
2 0 2 4 Kilomètres

Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Métadonnées central 48.5
Système de référence géographique non-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K
Type eau confinement: UQAM

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 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 données requises pour définir les conditions locales 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'attaché 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 données présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

Notation bibliographique conseillée:
Larocque, M., Gagné, S., Barrette, D., Meyzonnat, G., Gervais, M.-L., Ouellet, M. A., 2015. Profil de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDELC.

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

L'échantillonnage mensuel des précipitations pour l'analyse de la composition en isotopes stables des précipitations a été réalisé entre novembre 2013 et octobre 2014 pour les stations météorologiques d'Arthabaska (en amont) et de Nicolet (en aval). 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 données provenant des deux stations.

Les compositions isotopiques obtenues pour l'eau souterraine s'alignent sur la droite des eaux météoriques, indiquant que l'évaporation de l'eau des précipitations préalablement à son infiltration et dans le sol et la nappe est négligeable (**Figure 31**). La composition isotopique de l'eau souterraine est appauvrie par rapport à la moyenne des précipitations pondérée sur le total mensuel (Arthabaska : $-10,88\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, $-73,57\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$. Nicolet : $-10,1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, $-67,87\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$). L'eau souterraine est donc principalement influencée par les périodes de fontes printanières et les pluies automnales. Il n'y a pas de différence notable entre les échantillons prélevés dans l'aquifère au roc fracturé et ceux des aquifères granulaires superficiels.

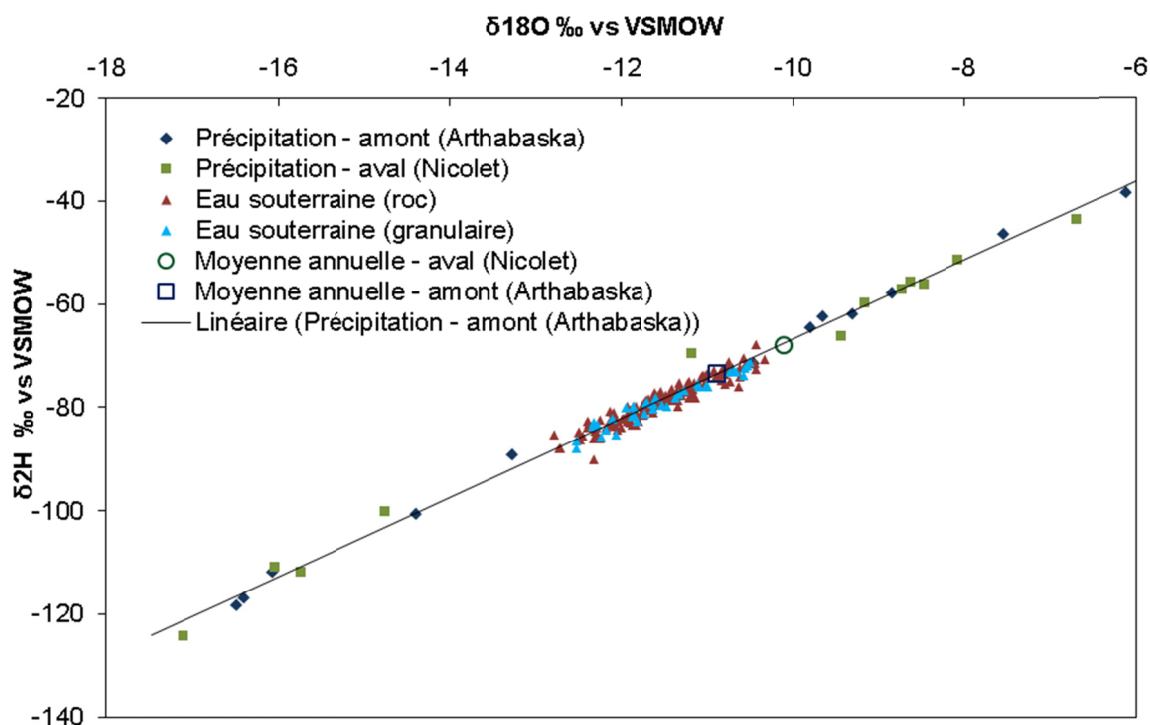


Figure 31 Composition isotopique de l'eau dans la zone d'étude

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

La composition en isotopes stables des nitrates dans les eaux souterraines permet dans certains cas 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 32** présente la composition isotopique des nitrates dans les 17 échantillons ayant montré 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).

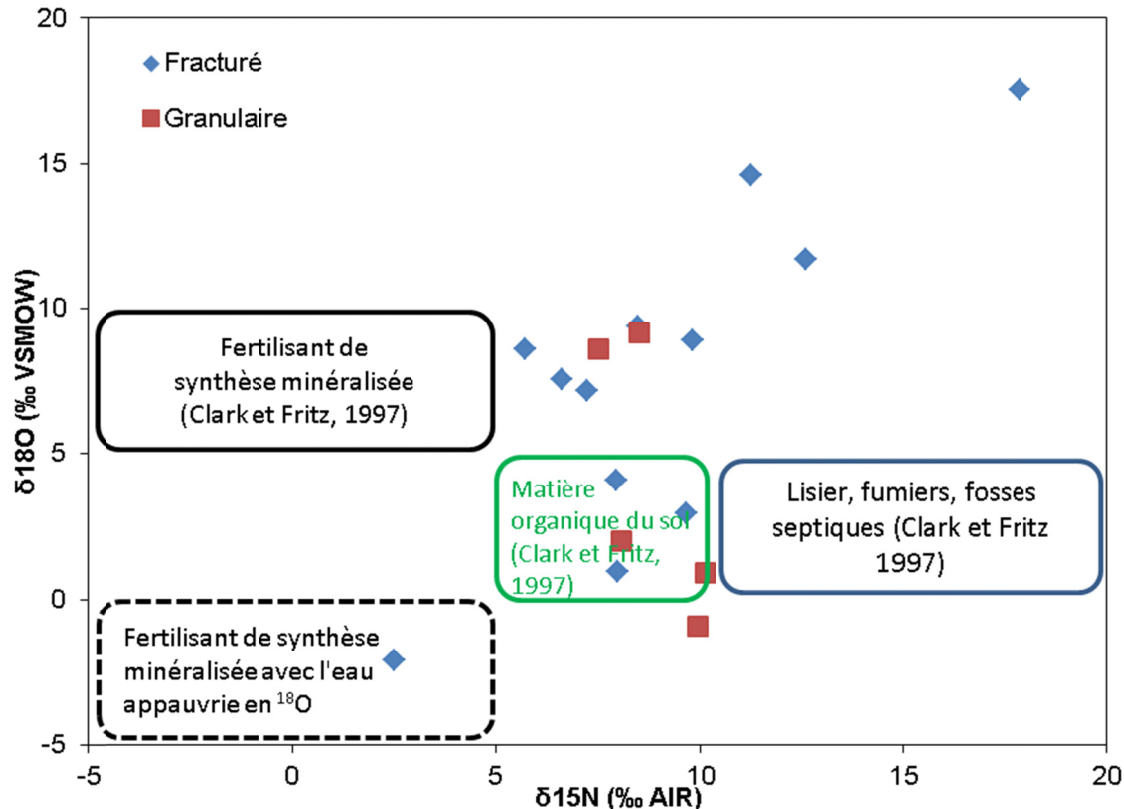


Figure 32 Isotopes des nitrates sur la zone d'étude

Le ^{18}O des nitrates varie en fonction de la composition isotopique de l'eau souterraine, laquelle est toujours inférieure à -10‰. La composition isotopique des nitrates typiquement définie par Clark et Fritz (1997) pour les fertilisants de synthèse pourrait ainsi avoir une composition isotopique en ^{18}O plus appauvrie lorsque des nitrates sont formés dans l'eau souterraine (zone pointillée sur la **Figure 32**). Dans ces conditions, les nitrates détectés sur la zone d'étude proviendraient plutôt de fertilisant chimiques et, dans une moindre mesure, de la matière organique du sol et de fertilisants organiques. L'enrichissement simultané en ^{18}O et ^{15}N des nitrates semble indiquer la présence de dénitrification dans l'eau souterraine pour les échantillons prélevés autant dans les aquifères fracturés que granulaires.

5.6.3 Radon (^{222}Rn)

Les 81 échantillons d'eaux souterraines représentent les aquifères fracturés (83%) et granulaires (17%). L'échantillonnage des eaux de surface a ciblé la rivière Nicolet, et ses affluents, les rivières Bulstrode et Nicolet Sud-Ouest (14 stations) (**Carte 25**). L'origine du ^{222}Rn dans les eaux souterraines semble être contrôlée par les lithologies des différents aquifères. Au niveau de la plateforme du Saint-Laurent (unités sédimentaires ordoviciennes et quaternaires ; carbonates, shales et sables), les activités du ^{222}Rn varient entre 3 et 50 Bq/L, tandis que dans les Appalaches (métasédiments et unités métamorphiques), des activités allant jusqu'à 400 Bq/L ont été mesurées (**Figure 33**). Ces variations spatiales en fonction de l'environnement géologique confirment les résultats de Pinti *et al* (2014). L'activité du ^{222}Rn est naturellement plus faible dans les eaux de surface par rapport aux eaux souterraines et varie de 6,5 à 520 mBq/L, soit trois ordres de grandeur plus faible que les activités retrouvées dans les eaux souterraines. L'activité dans les eaux de surface représente l'équilibre entre les apports de radon des eaux souterraines et le dégazage du radon vers l'atmosphère.

La **Figure 34** représente l'évolution de l'activité du ^{222}Rn et du débit sur le bras amont de la rivière Nicolet. Les résultats montrent une nette augmentation du ^{222}Rn , mais pas du débit autour de 4 km. La diminution du ^{222}Rn est très rapide. À 8 km, le débit et l'activité augmentent de manière synchrone, en raison de la présence d'un affluent ayant une concentration en ^{222}Rn non négligeable et l'activité en ^{222}Rn continue d'augmenter jusqu'à 12,5 km. Il est possible de voir une corrélation entre l'augmentation du ^{222}Rn dans la rivière et la présence de roc affleurant. En effet, les aquifères en connexions avec les lithologies métamorphiques des Appalaches présentent des activités en ^{222}Rn de l'ordre de 50 Bq/L. Il est donc possible d'envisager dans cette zone une production de ^{222}Rn directement dans le lit de la rivière. L'absence d'une augmentation du débit pourrait aussi indiquer que le ^{222}Rn y est directement produit. À 14,5 km, un deuxième petit affluent se jette dans la rivière Nicolet. Celui-ci est relativement appauvri en ^{222}Rn , ce qui entraîne la dilution du signal radon, face à l'augmentation du débit. Par la suite, il y a une stabilisation à la fois des activités radon et des débits jusqu'à 40 km. Les activités ^{222}Rn et les débits recommencent ensuite à augmenter jusqu'à la fin du tronçon étudié.

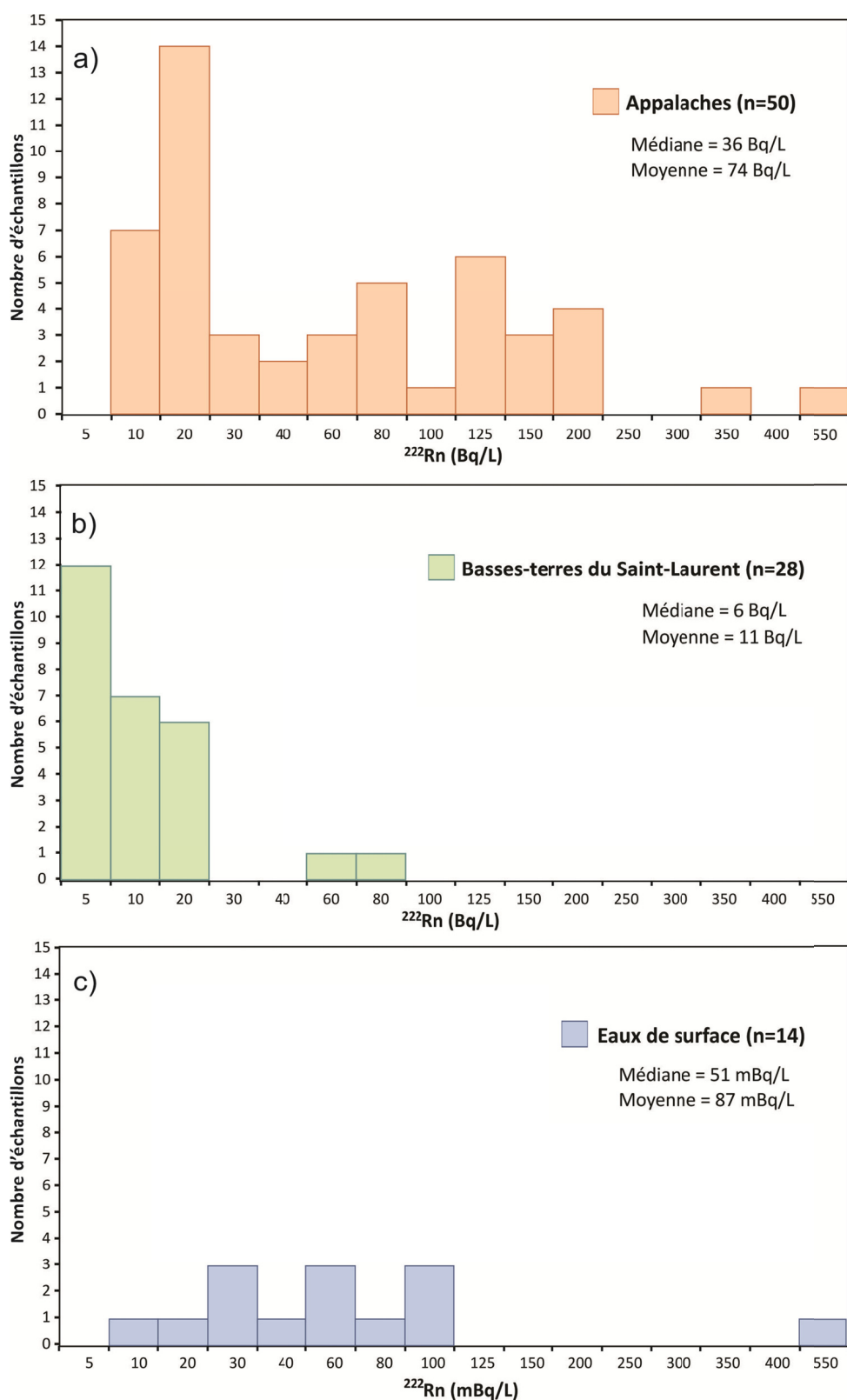


Figure 33 Activité en ^{222}Rn a) Appalaches, b) Basses-terres du Saint-Laurent c) Eaux de surface

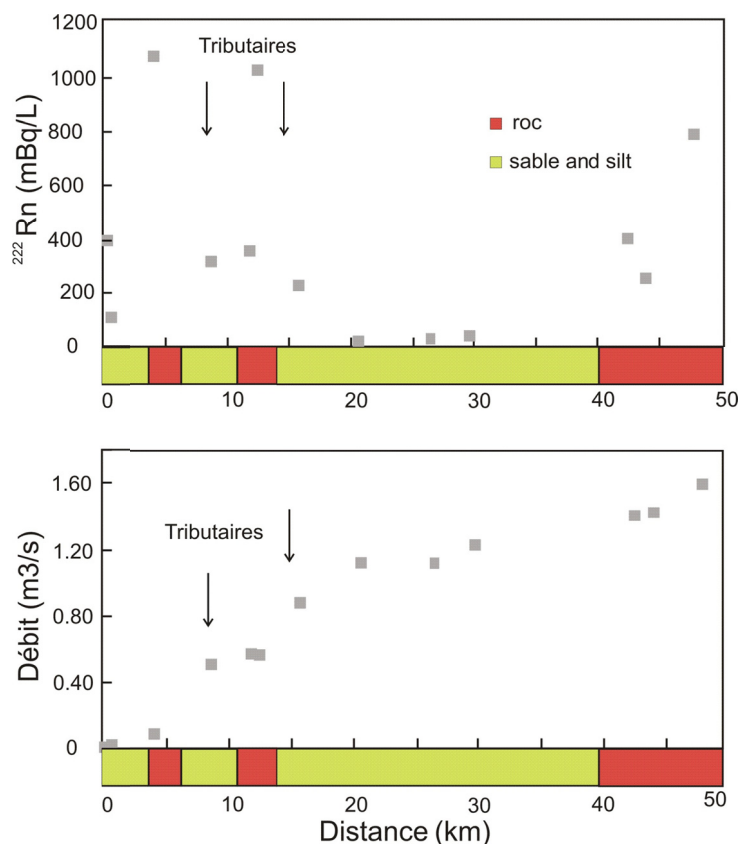
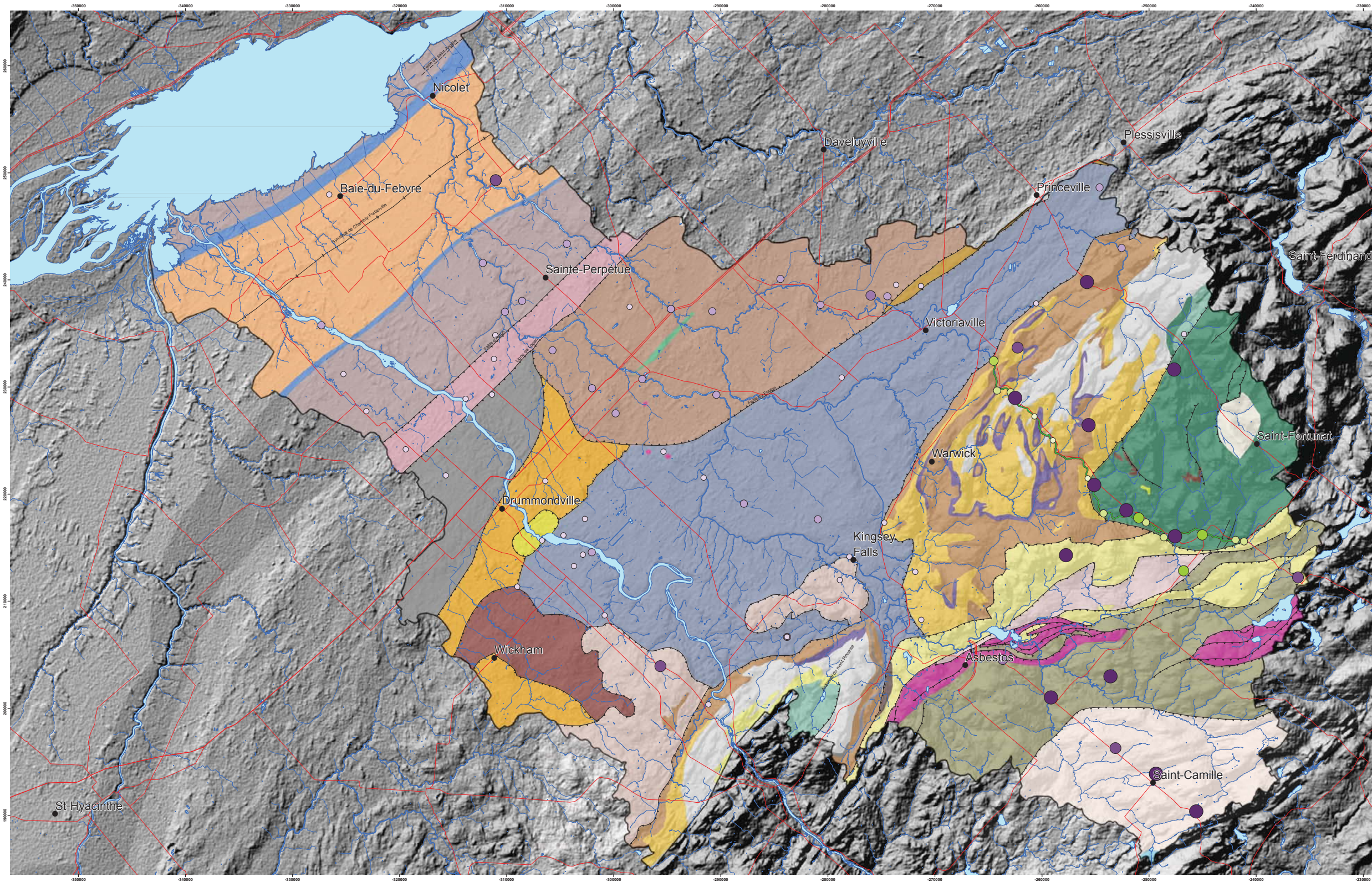


Figure 34 ^{222}Rn et débits mesurés sur le bras amont de la rivière Nicolet le 5 août 2013.

L'évolution du ^{222}Rn tout le long du bras amont de la rivière Nicolet fait présentement l'objet d'une modélisation dans le cadre du projet de maîtrise en sciences de la Terre de Floriane Moreira. Ce projet de recherche vise, entre autres, à quantifier le taux de dégazage du radon vers l'atmosphère au moyen d'une injection de gaz dans le cours d'eau. Ces travaux ont fait l'objet d'une présentation par (Moreira et al., 2015a) lors de la Réunion conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC à Montréal au début mai 2015 (**Annexe 3**).



LÉGENDE

● Ville

— Réseau routier

— Hydrographie linéaire

— Hydrographie surfacique

— Zone d'étude

Activité du ^{222}Rn

^{222}Rn (Bq/L)

● $\geq 70,1$ - < 315

● ≥ 49 - < 70

● ≥ 24 - < 49

● ≥ 11 - < 24

● $\geq 0,3$ - < 11

^{222}Rn (Bq/L)

● ≥ 1 - $< 1,5$

● $\geq 0,5$ - < 1

● $\geq 0,1$ - $< 0,5$

● $< 0,1$

— Profil Radon en rivière



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES

Section 5.6 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 25 Activité du ^{222}Rn dans les eaux souterraines et les eaux de surface

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC

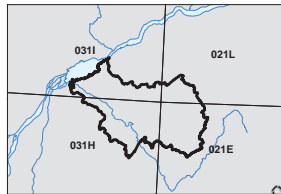
0 2 4 6 8 Kilomètres

Projection cartographique conforme de Lambert du Québec
Métropole centrale (M.C.)
Système de référence géodésique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte: Ombre MERN 20K
Géologie du roc: SIGEOM 250K
Linéaments: SIGEOM 250K

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE

Notation bibliographique conseillée:
Larocque, M., Gagné, S., Barreclough, D., Mayonnat, G.,
Gervais, M., Chiffolleau, M. A. 2015. Projet de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MOELCC.

5.6.4 Géochimie des roches

Des analyses de la géochimie des roches (**Tableau 24**) ont été réalisées dans le cadre du projet de maîtrise en sciences de la Terre de Marion Saby (Saby, 2015) sur la qualité et les temps de séjour des eaux souterraines sur la zone d'étude. Ces résultats ont permis d'expliquer les concentrations élevées en Ba en F, en Mn et en Fe mesurés dans certains puits de la zone à l'étude (**Cartes 29 et 32**).

Ces analyses ont été faites sur sept échantillons prélevés lors des travaux de forage des puits PACES. Les concentrations résultantes pour le Ba varient de 24 à 1055 ppm et celles pour le F varient de 386 à 955 ppm. Les échantillons présentent des concentrations de Fe_2O_3 de 1,27 à 8,55% tandis que les concentrations de MnO varient entre 0,03 et 0,18% de la masse totale de l'échantillon. D'autres études faites dans la région (SIGEOM, 2014) montrent des valeurs maximales supérieures à 1500 ppm pour le Ba et pour le F. Pour le Fe_2O_3 et MnO les concentrations maximales peuvent atteindre des valeurs supérieures à 20% et à 0,25% respectivement pour ces deux composés. (Saby et al., 2015) ont montré que les concentrations en Ba, F, Fe and Mn dans l'eau souterraine proviennent des roches du paléozoïque de la Plate-forme du Saint-Laurent et des Appalaches. Ces éléments auraient été apportés à la surface par la remontée des fluides hydrothermaux le long de failles et se seraient trouvés coincés dans les sédiments au moment de leur déposition et de la diagénèse qui a suivi. En fonction du temps de séjour des eaux souterraines en contact avec ces roches contenant ces éléments chimiques et minéraux, selon aussi les conditions d'oxydoréduction et le pH, les éléments contenus dans la roche peuvent être mis en solution dans l'eau souterraine et présenter des concentrations qui dépassent les normes de potabilité comme dans les cas du Ba et F, ou les objectifs esthétiques pour le Mn et Fe.

Tableau 24 Géochimie des roches

Puits	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TOT/S %	TOT/C %	Ba ppm	F ppm	Fe ₂ O ₃ %	MnO %
NSF-R1	6,62	3,25	1,05	3,3	0,13	1,68	345	896	6,1	0,12
NSF-R2	35,81	1,45	0,4	1	0,35	8,53	244	650	1,7	0,03
NSF-R3	2,76	2,64	1,74	1,04	0,79	1,17	1055	905	4,87	0,16
NSF-R7	1,05	1,7	1,21	3,2	<0,02	0,15	692	717	8,55	0,11
NSF-R8	3,33	3,64	0,99	3,16	0,35	0,82	485	794	5,81	0,18
NSF-R9	39,22	3,14	0,38	0,36	0,1	10,09	124	386	1,27	0,03
NSF-R10	10,69	3,1	0,97	3,68	0,81	3,16	223	955	4,91	0,07

5.6.5 Datation et traçage isotopique

Les analyses concernant la datation et le traçage isotopique des eaux souterraines contribuent à la compréhension de l'infiltration de l'eau et de la recharge des aquifères, ainsi qu'à la circulation de ces eaux à l'échelle régionale. Des analyses ont été faites pour le tritium (^3H), pour les gaz rares (He, Ne, Ar, Kr et Xe), pour le hexafluorure de soufre

(SF₆) et Dichlorodifluoromethane (CFC-12), de même que pour l'activité du radiocarbone (A¹⁴C). Le ³H est un élément radioactif produit naturellement dans l'atmosphère, mais principalement issu des essais nucléaires des années 60 et qui se désintègre en ³He. Le rapport entre ³H et ³He permet de dater les eaux s'étant infiltrées dans les derniers 60 ans. Le SF₆ est un traceur d'origine anthropique (industriels) permettant aussi la datation des eaux jusqu'à environ 60 ans. Les méthodes de datation par ³H/³He et SF₆ et CFC-12 favorisent aussi la compréhension sur la vulnérabilité des aquifères, puisque ces traceurs peuvent indiquer les zones préférentielles pour la recharge, où l'aquifère est plus exposé à une éventuelle contamination. L'activité ¹⁴C à son tour permet de dater des eaux jusqu'à environ 40 000 ans. L'analyse combinée de ces traceurs permet d'évaluer les temps de résidence des eaux aussi les mélanges entre les masses d'eau infiltrées il y a longtemps et les eaux considérées jeunes.

Les résultats des analyses du ³H/³He indiquent des âges apparents (i.e. résultant du mélange des masses d'eau) de 4,4 ans en amont à 66 ans en aval dans la zone d'étude. Les âges apparents obtenus par la méthode au ¹⁴C varient de 285 à 10 200 ans. Les différentes gammes d'âges données par les méthodes au ³H/³He et au ¹⁴C indiquent un mélange entre des eaux infiltrées atteignant l'aquifère il y a des milliers d'années et des eaux jeunes, issues d'une recharge relativement récente. Les échantillons analysés montrent une corrélation assez forte entre l'A¹⁴C et le ³H indiquant qu'il s'agit des eaux résultantes d'un mélange entre un pôle moderne ayant récemment rechargé les aquifères et un pôle ancien, d'eau provenant de la dernière déglaciation (12K-6K; Vautour et al., 2015) (**Figure 35**). Les détails peuvent être consultés dans le mémoire de maîtrise en sciences de la Terre de Marion Saby (Saby, 2015) et dans l'article qui y découle (Saby et al., 2015).

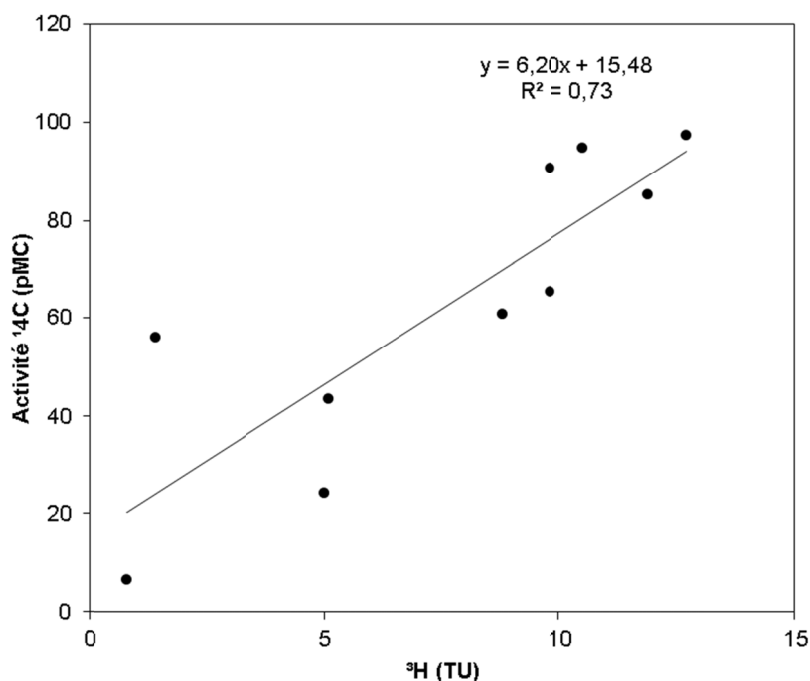


Figure 35 Comparaison de l'activité du ¹⁴C et du ³H

Les résultats d'analyse des SF₆ donnent des âges apparents s'échelonnant entre 1 an pour le puits NSF266 à côté de Victoriaville situé très proche de la rivière Nicolet et 34 ans pour le puits NSF270 situé légèrement plus en aval proche de Drummondville (les données complètes sont incluses dans la base de données transférée au MDDELCC). Les âges apparents SF₆ sont, de manière générale, inférieurs aux âges apparents ³H/³He d'environ 10 ans (**Figure 36**). Bien que les puits échantillonnés pour les analyses SF₆ et ³H/³He soient différents, la tendance reste claire. Ceci pourrait s'expliquer par une surestimation ou une sous-estimation des âges de l'une ou l'autre des méthodes, mais il est impossible de le confirmer pour le moment.

Il est intéressant de constater qu'il existe un lien entre les âges apparents et la recharge associée aux puits (c.f. recharge spatialisée estimée avec le modèle HydroBilan, **section 5.4**). Les puits où les eaux sont les plus jeunes correspondent également aux zones où la recharge est la plus importante. Ce constat reste valable que ce soit pour les âges obtenus avec l'analyse du SF₆ ou le ratio ³H/³He, ce qui tend à confirmer le lien établi.

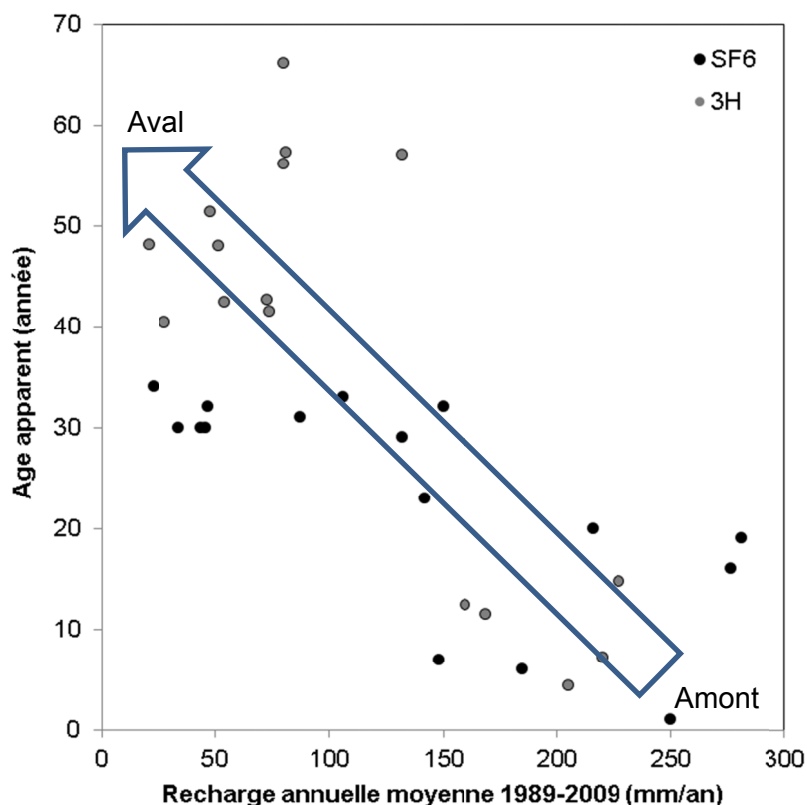


Figure 36 Datation SF₆ et ³H/³He en fonction de la recharge

Il est ainsi possible de retracer une ligne d'écoulement régionale le long de la zone d'étude, avec les points correspondant aux eaux les plus jeunes et à la recharge la plus importante correspondant également aux puits situés en amont de la zone d'étude. À

l'inverse, les points représentant les eaux les plus vieilles et la recharge la plus faible correspondant aux puits situés dans les portions les plus en aval de la zone d'étude, où le couvert argileux est plus important. La comparaison entre les résultats d'analyse des SF₆ et des CFC-12 corrigés pour les excès d'air a permis de mettre en évidence une dégradation des CFC dans l'eau souterraine. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette dégradation dont l'activité biologique, certains processus géochimiques ou la dilution des eaux souterraines, mais il n'a pas été possible de discriminer clairement la source de cette dégradation. Les données de CFC-12 ne peuvent donc pas être utilisées afin de raffiner les âges obtenus à l'aide des SF₆ et du ³H.

5.7 Contextes hydrogéologiques régionaux

L'intégration des données stratigraphiques, géochimiques et hydrogéologiques sous forme de coupes conceptuelles permet de mettre en lumière les caractéristiques hydrogéologiques du territoire à l'étude. La **Figure 37** et la **Figure 38** reprennent la coupe A (**Figure 8**) pour illustrer le modèle conceptuel de l'hydrogéologie de la zone Nicolet et bas Saint-François. 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 37** 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. Dans un contexte de fonds de vallée, principalement dans le bassin de la rivière Nicolet sud-ouest, ce sont retrouvés des dépôts d'argile qui s'épaississent graduellement de la zone amont vers la zone centrale. Ces dépôts créent des conditions d'aquifère semi-captif et captif sur lesquels la rivière s'écoule. Étant donné que l'étendue des dépôts argileux et de till épais se limite aux fonds de vallées, l'effet sur la recharge à l'échelle régionale est minime.

L'aquifère rocheux de cette zone comporte une forte variabilité de la conductivité hydraulique. Les puits NSF-R5 et NSF-R3 témoignent de ce phénomène avec des variations de trois ordres de grandeur de conductivité hydraulique entre les deux puits.

Néanmoins, plusieurs municipalités de cette zone ont éprouvé des difficultés à obtenir des débits convenables dans le roc fracturé. L'unité aquifère la plus importante du secteur amont est l'esker Asbestos-Warwick. Cette formation de sable et gravier s'étend de manière discontinue entre les villes de Danville et de Warwick. Des débits d'eau souterraine très élevés sont extraits de cette formation aquifère. Une deuxième unité aquifère est présente au sud de Kingsey Falls. Il s'agit d'une unité de sable et gravier au contact du roc, en condition de nappe captive. Des débits élevés sont extraits de cette formation.

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. Le type d'eau Ca-HCO_3 est généralement associé 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 (voir **section 5.6**). L'aquifère fracturé de la zone amont est de vulnérabilité moyenne à élevée (voir **section 5.5**). L'eau souterraine circulant dans les sables et graviers de l'esker Asbestos-Warwick est aussi de type Ca-HCO_3 indiquant une eau récemment infiltrée.

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. En plus, par endroits les dépôts argileux créent des conditions de nappe captive, notamment près de la rivière Saint-François et Nicolet sud-ouest, à la jonction des rivières de Pins et Nicolet, de même qu'à la portion de la rivière Bulstrode s'écoulant dans la zone centrale. 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 retrouvés de part et d'autre de l'autoroute 20 et dans la zone située au nord de Drummondville, autour de Saint-Cyrille-de-Wendover et de Notre-Dame-du-Bon-Conseil et au Nord-est de Saint-Samuel-de-Horton. Les secteurs de nappe libre dans la zone centrale sont généralement recouverts d'une unité de sable et ont une

penne 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 (**Figure 38**).

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. La conductivité hydraulique des unités sableuses de surface est élevée. Leur épaisseur inférieure à 10 m et la discontinuité spatiale ne permettent pas l'extraction de volumes d'eau importants, mais suffisent à alimenter quelques petites municipalités.

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 et d'argile devient assez importante pour créer des conditions de nappe semi-captive ou captive, la recharge est plus faible ou presque nulle, l'eau est plus minéralisée et son pH augmente. L'eau de type d'eau Na-HCO_3 est principalement observée dans ces zones (voir **section 5.6**). La vulnérabilité de l'aquifère fracturé en nappe libre et des aquifères granulaires de surface de la zone centrale est élevée à très élevé (voir **section 5.5**).

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, généralement en condition de nappe captive, sous l'argile. 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 puits NSF-R1, le roc est rencontré à une profondeur de 43 m, et le niveau piézométrique n'est qu'à 1,3 m de la surface. La même observation peut être faite pour le puits NSF-R8 où le roc se trouve à 42 m de profondeur et le niveau piézométrique est à 21 m de la surface.

Les roches de la partie aval sont relativement peu fracturées et peu productives. La conductivité hydraulique y est faible. Les aquifères granulaires captifs fournissent cependant des débits élevés.

L'eau s'infiltre dans les zones de recharge à nappe libre et semi-captive (dans une moindre mesure), situées au nord de l'autoroute 20 et dans quelques zones près de Sainte-Perpétue, 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 Saint-François, Nicolet et Nicolet sud-ouest, il y a présence d'un écoulement vertical et résurgence d'eau souterraine dans les rivières.

Peu d'information géochimique de l'eau circulant dans le roc 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-HCO₃, Na-Cl et Ca-Cl. Ces eaux parfois saumâtres ou influencées par les eaux salines 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 recharge 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.

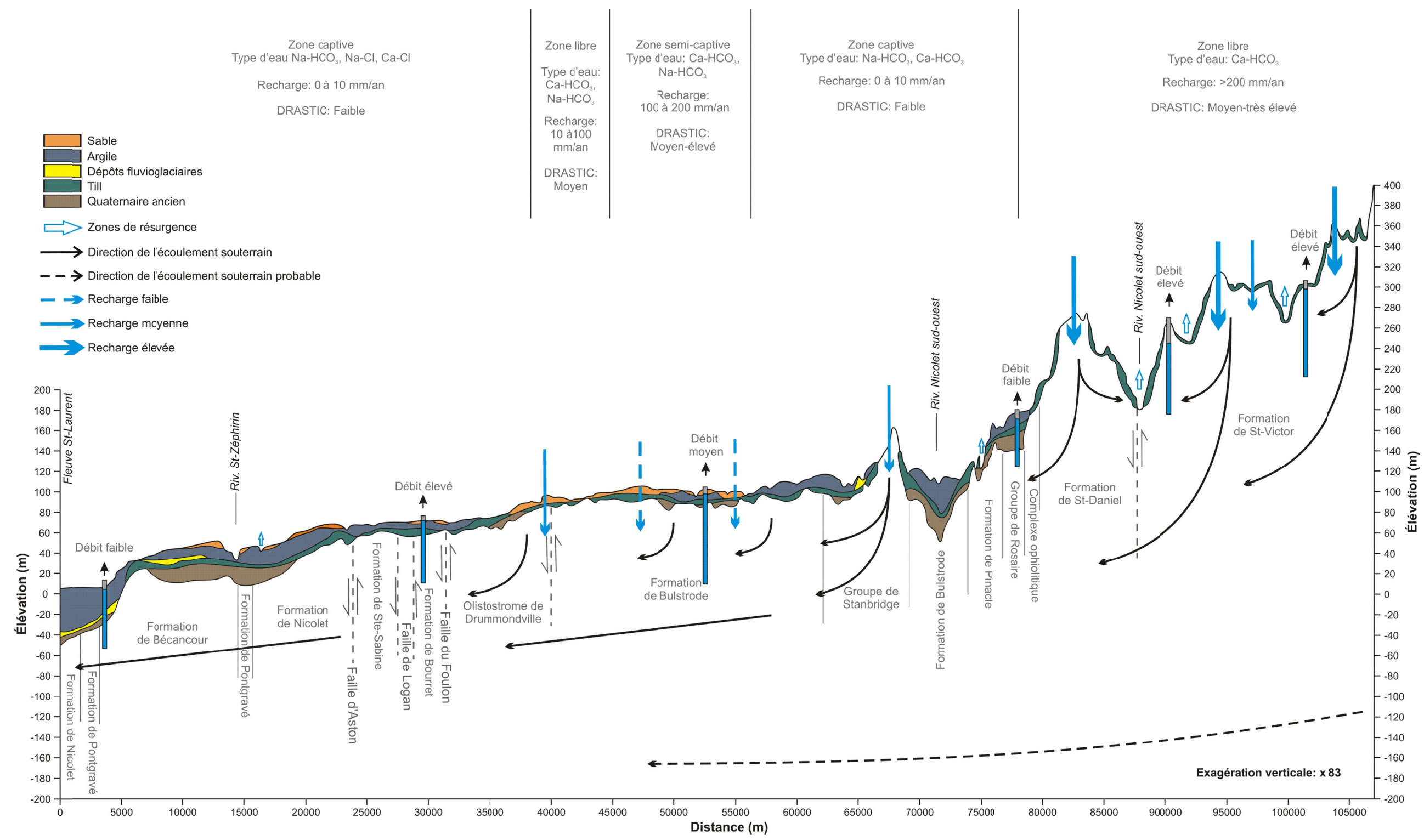


Figure 37 Schémas des contextes hydrogéologiques

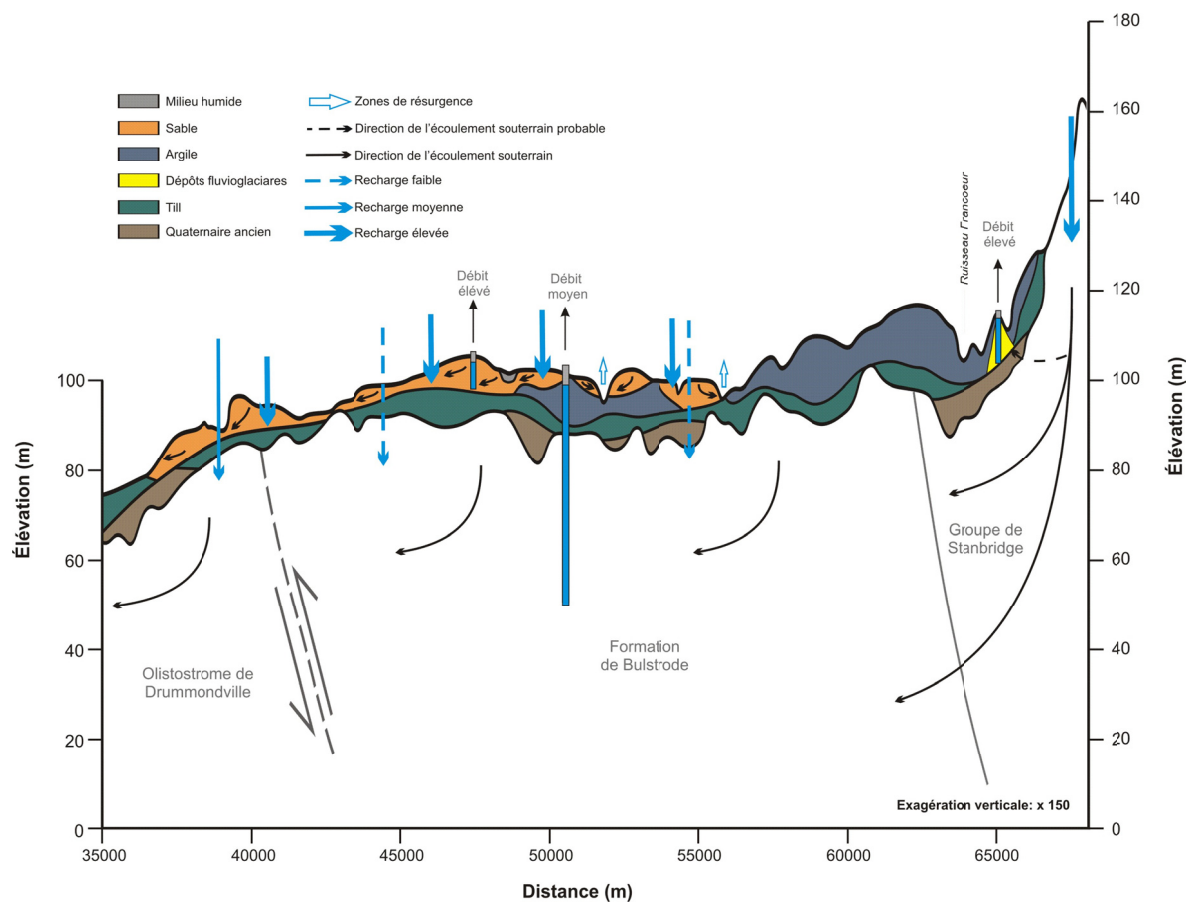


Figure 38 Zoom sur le schéma du contexte régional; zone centrale

6 PROJETS PARTICULIERS

Parallèlement aux travaux réalisés qui étaient nécessaires à la production des livrables PACES, trois projets particuliers ont été entamés au cours des trois dernières années. Ces projets visaient à tirer profit des données acquises pour améliorer la compréhension de différents aspects hydrogéologique de la région étudiée. Le premier projet vise l'étude des milieux humides de la zone d'étude, le second concerne la modélisation des écoulements de l'eau souterraine à l'échelle régionale et le troisième s'intéresse à la modélisation des écoulements de l'eau souterraine à l'échelle locale. Ces projets sont encore en évolution et seront finalisés dans le cadre d'un mémoire de maîtrise et d'une thèse de doctorat, et se concrétiseront dans des articles scientifiques qui seront soumis en 2015.

6.1 Fonctions hydrogéologiques des milieux humides

Ce projet est réalisé dans le cadre du projet de doctorat en sciences de la Terre et de l'atmosphère de Marc-André Bourgault qui a pour objectif de comprendre le rôle que jouent les complexes tourbeux sur l'hydrogéologie régionale de la vallée du Saint-Laurent, tout en développant des outils permettant d'intégrer les complexes tourbeux dans les évaluations environnementales, les plans de gestion intégrée des bassins versants et les plans de conservation. La zone Nicolet/Bas Saint-François est l'une des régions étudiées dans la thèse. Les autres régions sont la zone du Chêne en Chaudière Appalaches, la zone Bécancour dans le Centre-du-Québec et la Montérégie.

Les résultats présentés dans cette section sont préliminaires et partiels, et seront mis à jour dans le doctorat réalisé par Marc-André Bourgault. Ces résultats doivent donc être considérés à titre indicatif seulement de la capacité des approches testées à caractériser les milieux humides et des fonctions hydrologiques de ceux-ci. Ils ne doivent pas être utilisés à des fins de prise de décision.

6.1.1 *Caractérisation des fonctions hydriques et biologiques des complexes tourbeux*

Au cours de l'été 2014, des travaux de terrain ont été réalisés pour évaluer les fonctions hydriques et biologiques des complexes tourbeux à l'échelle régionale en utilisant la méthode Ontario Wetland Evaluation System (OWES; Ontario Ministry of Natural Resources, 2013) ainsi que la méthode Wetland Ecosystem Service Protocole (WESP; Adamus, 2011). Une description sommaire des méthodes est présentée à l'**Annexe 15**. Sept complexes tourbeux (**Figure 39**) comprenant des tourbières ombrotrophes, des tourbières minérotrophes, des tourbières boisées et des marécages ont été caractérisés à l'aide des méthodes OWES et WESP sur la zone Nicolet Saint-François (le travail a été réalisé également dans la région de Chaudière-Appalaches et du Centre du Québec sur 26 complexes tourbeux supplémentaires).

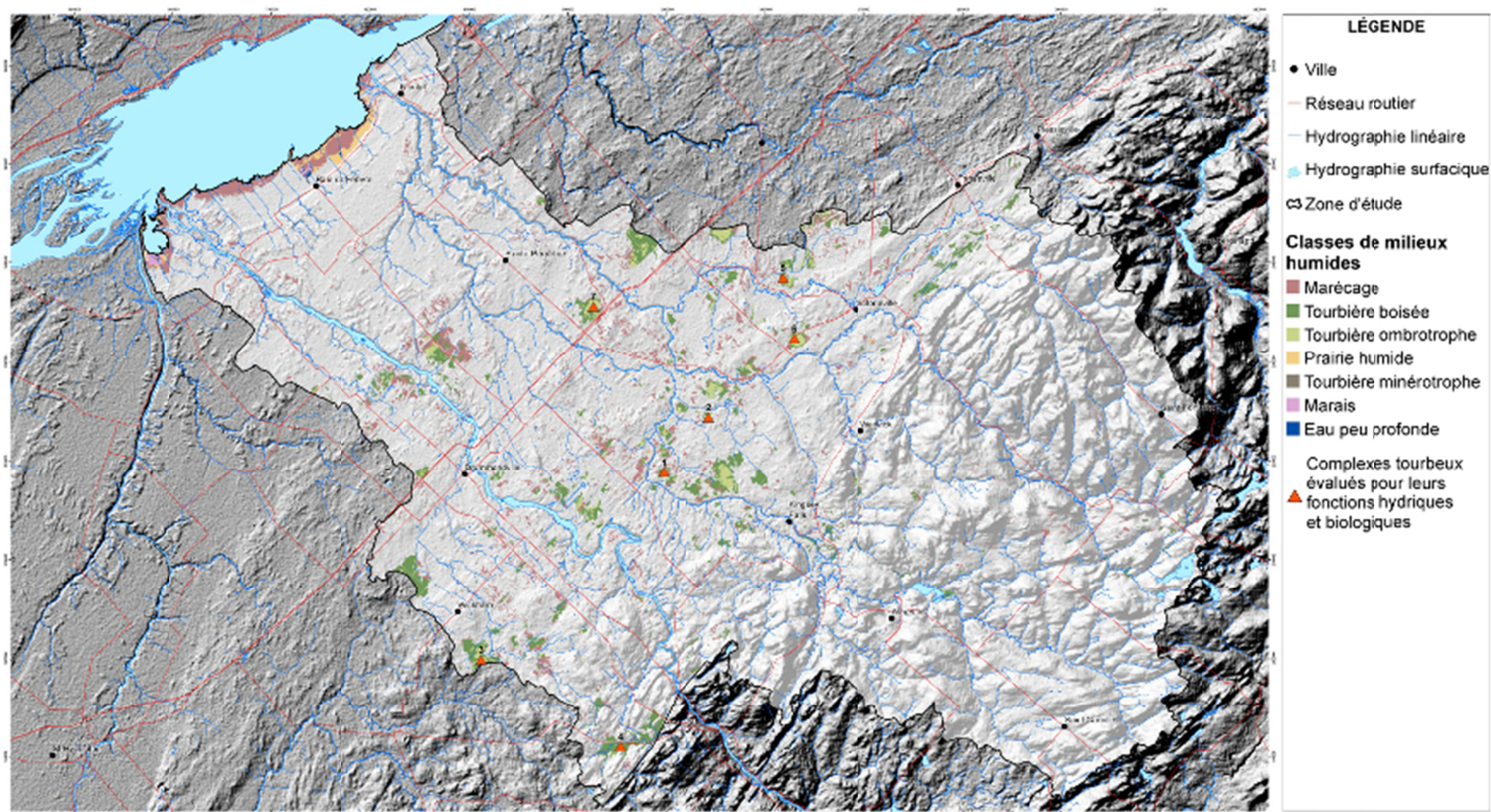


Figure 39 Zones instrumentées à l'aide de piézomètres et l'emplacement des mesures de niveau statique réalisées à l'intérieur (points noirs) et à l'extérieur du complexe tourbeux (points bleus)

Fonction biologique avec la méthode OWES

Le pointage des complexes tourbeux pour la fonction biologique obtenu sur la zone Nicolet/Bas Saint-François varie entre 119 points et 185 points (**Figure 40**). En calculant l'écart type ($\sigma = 19$ points) des pointages obtenus de l'ensemble des complexes tourbeux localisés dans la vallée du Saint-Laurent qui ont été caractérisés à l'aide de la méthode OWES ($n = 33$), le score associé avec la fonction biologique des complexes tourbeux est significatif à ± 9 points avec intervalle de confiance à 99%. Trois catégories se distinguent soit les complexes tourbeux formés de quatre types de milieux humides (no. 2 et 7) obtenant des scores supérieurs à 180 points, les complexes tourbeux formés de deux ou trois types de milieux humides (nos. 1, 3, 5 et 6) ayant une superficie supérieure à 100 ha et les complexes tourbeux formés de deux types de milieux humides ayant une superficie inférieure à 100 ha.

Les scores des fonctions biologiques de la méthode OWES sont attribuables à deux facteurs soit le nombre de types de milieu humide et la superficie des complexes tourbeux. Un complexe tourbeux comprenant plusieurs types de milieux humides et ayant une grande superficie développe une hydrologie plus complexe ce qui favorise la diversité végétale et donc les fonctions biologiques.

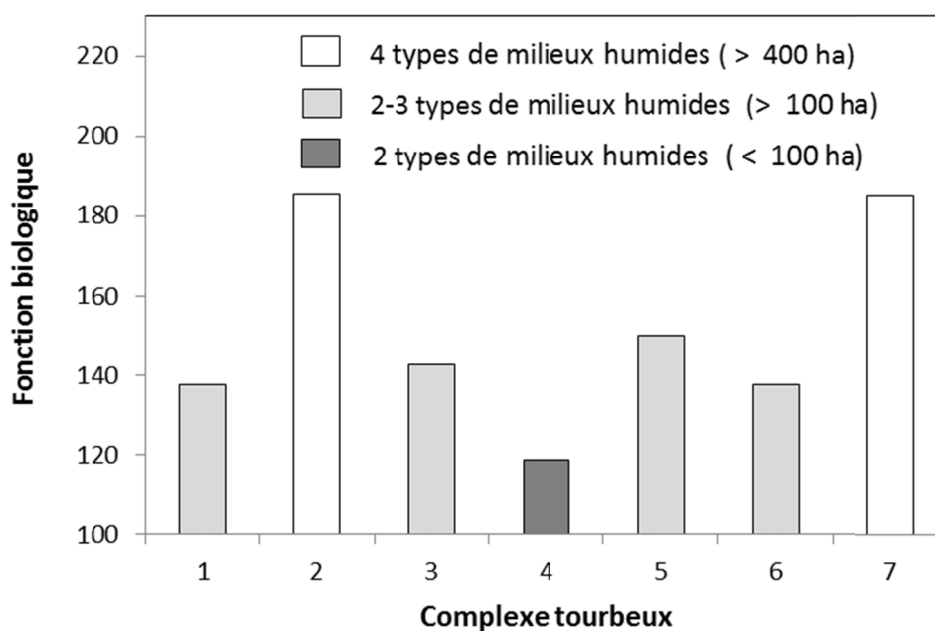


Figure 40. Pointage OWES pour la fonction biologique (119-185 points) des différents complexes tourbeux (1-7)

Fonction hydrologique avec la méthode WESP

Selon le type de milieu humide

Le pointage de l'ensemble des milieux humides pour l'amélioration de la qualité de l'eau varie entre 6 et 10. Les marécages, les tourbières ombrotrophes et les tourbières boisées ont obtenu des scores entre 9 et 10. Pour les marécages, ce score est attribuable au fait que ces milieux humides se développent dans des zones où la microtopographie est accidentée formant de petites zones isolées les unes des autres où l'eau s'accumule. Plutôt que de s'écouler en surface, l'eau accumulée est donc forcée à s'infiltrer dans le sol ce qui change les conditions d'oxydoréduction (Reddy et DeLaune, 2008). Pour les tourbières ombrotrophes et boisées, les niveaux de nappe sont toujours très proches de la surface, ce qui limite l'apport d'oxygène dans les dépôts organiques et favorise des conditions réductrices. Les tourbières minérotrophes obtiennent un score plus faible (6,7) que les autres milieux humides puisqu'elles sont des zones où l'eau circule rapidement et où les variations de niveau d'eau sont faibles comparativement aux autres types de tourbières (ombrotrophe et boisée).

Le pointage de l'ensemble des milieux humides pour la fonction d'emmagasinement des eaux pluviales varie entre 0,5 et 4,5. Les tourbières ombrotrophes et tourbières boisées obtiennent toutes deux un score de 0,5 tandis que les tourbières minérotrophes et les marécages obtiennent un score de 3,3 et de 4,5 respectivement. Selon la méthode WESP, la capacité d'emmagasinement des tourbières ombrotrophes, des tourbières boisées et des tourbières minérotrophes est limitée comparativement à celle des marécages puisqu'ils les tourbières sont constamment saturées en eau, ce qui favorise un écoulement superficiel rapide.

Évaluation par complexe tourbeux

Le pointage des fonctions hydriques a été calculé sur sept complexes tourbeux en pondérant les scores obtenus par milieu humide avec l'aire de chaque type de milieux humides rencontré dans le complexe tourbeux. Les pointages pour l'amélioration de la qualité de l'eau (**Figure 41**) et la capacité d'emmagasinement des eaux pluviales (**Figure 42**) varient entre 8,6 et 9,5 et entre 0,5 et 1,9, respectivement.

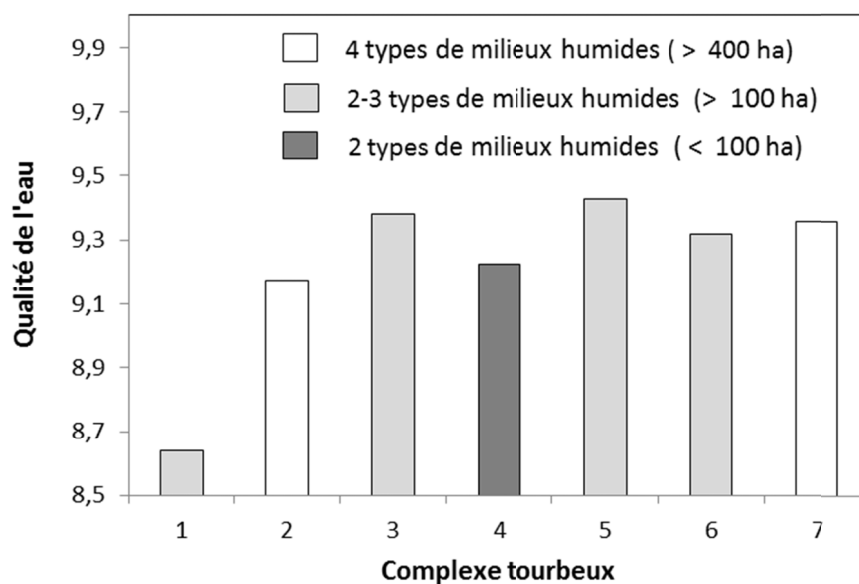


Figure 41. Pointage WESP pour la fonction amélioration de la qualité de l'eau

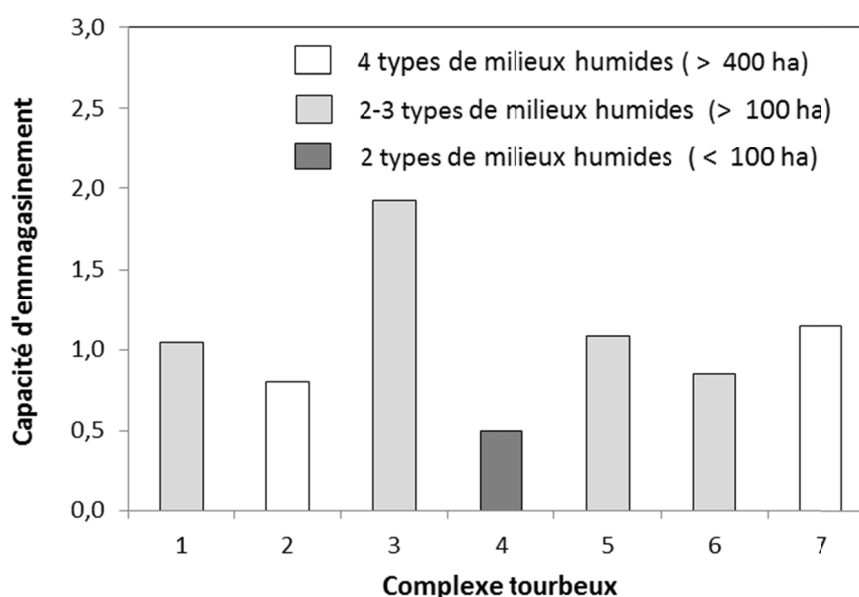


Figure 42. Pointage WESP pour la fonction capacité d'emmagasinement des milieux humides.

Avec une variation considérée comme significative à 0,5 (Adamus, 2011), les variations de pointage des différents complexes tourbeux ne sont pas significatives pour la fonction d'emmagasinement des eaux pluviales et la fonction amélioration de la qualité de l'eau. Néanmoins, le complexe tourbeux 1 se distingue clairement des autres en ce qui concerne la qualité de l'eau. Ceci est attribuable à la proportion de la superficie (16%) qu'occupe la tourbière minérotrophe. Le complexe tourbeux 3 se distingue clairement des autres en ce qui concerne la capacité d'emmagasinement, en raison de l'importante proportion de la superficie (36%) qu'occupe le marécage.

La méthode WESP apparaît donc comme une bonne méthode pour distinguer les fonctions hydriques des différents types de milieux humides, mais ne permet pas de caractérisation complètement les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux de la zone d'étude. Une modification de la méthode et une attention particulière au contexte hydrogéologique seraient nécessaires pour mieux intégrer les fonctions hydriques.

6.1.2 Contexte hydrogéomorphologie des complexes tourbeux

Selon les données recueillies sur le terrain et la compilation de données provenant d'une base de données construite par l'équipe de Stéphanie Pellerin de l'IRBV et de Monique Poulin de l'Université Laval (Figure 1), l'épaisseur des dépôts tourbeux de la zone d'étude varie entre 30 et 522 cm avec une moyenne de 202 cm (**Tableau 25**). Les complexes tourbeux les plus profonds sont localisés dans la zone centrale du bassin versant.

L'analyse visuelle du substratum montre que les complexes tourbeux sont déposés sur des silts, des sables fins à moyens et des dépôts de till qui dans plusieurs des cas possèdent une grande proportion de matrice argilo-silteuse. Toutefois, parmi les complexes tourbeux visités durant l'été 2013-2014, aucun complexe tourbeux ne s'est formé directement sur des dépôts argileux. Les complexes tourbeux déposés sur des silts et des dépôts de till sont classés comme ayant un faible potentiel d'interaction avec les aquifères alors que les complexes tourbeux déposés sur des sables fins à moyen sont classés comme des complexes tourbeux ayant un fort potentiel d'interaction avec les aquifères. Par ailleurs, les tourbières déposées uniquement sur des silts sont classées comme des complexes tourbeux ayant un potentiel d'interaction intermédiaires (**Tableau 25**).

De façon générale, les complexes tourbeux occupent cinq fonctions hydrogéologiques distinctes. Par exemple, ils peuvent recharger les aquifères (R), être alimentés par les aquifères (A), participer aux débits de rivières (DR), maintenir les débits de base des rivières (DB) et/ou maintenir les niveaux d'eau des aquifères qui alimentent les rivières de la zone du chêne (MA). La présence d'une tourbière minérotrophe permet d'identifier les complexes qui sont alimentés par les eaux souterraines (A) (7) et les complexes qui alimentent les débits de base des rivières (DB) (1-2-3) dans le cas où les tourbières minérotrophes sont riveraines.

Puisqu'ils se sont formées sur des dépôts ayant un potentiel aquifère élevé à intermédiaire les complexes tourbeux maintiennent tous les niveaux d'eau des aquifères, à l'exception du complexe tourbeux no. 1 qui s'est développé sur des dépôts de till considérés peu perméables.

Tableau 25 Contexte hydrostratigraphique des complexes tourbeux étudiés sur la zone Nicolet/Bas Saint-François

Sites	Épaisseur max (cm)	Substratum	Niveau statique (cm)	Type milieu humide	Potentiel interaction	Fonction hydrogéologique
1	261	till	37-67	2,3*	faible	DB,DR
2	190	sable fin à moyen	0-70	1,2,3*,4	fort	R,MA,DB
3	75	sable fin-sable oxidé	35-75	1,2,3*	fort	R, MA,DB
4	190	sable oxidé	13-77	1	fort	R, MA
5	330	sable fin à moyen	30-100	1,2,4	fort	R, MA
6	320	silt	45-85	1,2,4	intermédiaire	R, MA
7	522	silt, sable fin à moyen, till	20-80	1,2,3,4	fort	R, MA, A

* Type de milieux humide : 1=bog, 2=tourbière boisée, 3=tourbière minérotrophe, 3*=tourbière minérotrophe riveraine 4=marécage

Fonction hydrogéologique : R=recharge, MA=maintien des niveaux, DR=contribution aux rivières, A=alimenté par l'aquifère, DB=maintien des débits de base

6.1.3 Poursuite des travaux

Au cours de l'année 2015 et 2016, les données récoltées seront analysées de manière détaillée, afin d'approfondir les connaissances sur les fonctions hydriques des complexes tourbeux de la région Nicolet Saint-François. Des travaux complémentaires seront mis en œuvre pour adapter une méthode de caractérisation fonctionnelle s'inspirant de la méthode OWES pour la caractérisation des fonctions biologiques et de la méthode WESP pour la caractérisation des fonctions hydriques des différents milieux humides. Un travail important sera requis pour arrimer les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux, les données hydrogéologiques disponibles suite aux travaux de terrain réalisés du projet NSF, de même que les travaux de terrain sur les milieux humides de la thèse de Marc-André Bourgault.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont 1) de quantifier les variations spatiales des propriétés hydrodynamiques des tourbières comme facteur explicatif des variations des niveaux d'eau intra- et inter-complexe tourbeux, 2) d'évaluer l'influence des contextes hydrogéomorphologiques sur les échanges aquifère-tourbière, les variations spatio-temporelles de l'emmagasinement et les hydropériodes de sept complexes tourbeux et 3) de développer des indicateurs topographiques permettant de différencier les fonctions hydrogéologiques des complexes tourbeux.

Parmi les sept complexes tourbeux sélectionnés, dans les régions de la Montérégie (2), du Centre-du-Québec (3) et dans la région de Chaudière-Appalaches (2), trois sont situés dans la zone Nicolet/Bas Saint-François (tourbières de Sainte-Séraphine, Lac au Cyprès et Victoriaville). Dans chaque complexe tourbeux, six zones ont été instrumentées et caractérisées (**Figure 43**). Quatre zones sont comprises à l'intérieur de la tourbière (secteurs amont, intermédiaire et aval de l'écoulement qui a lieu au sein de la tourbière, et zone de décharge de l'aquifère dans la tourbière) et deux zones sont situées à l'extérieur de la tourbière (secteurs de recharge de l'aquifère par la tourbière et secteur où a lieu l'infiltration).

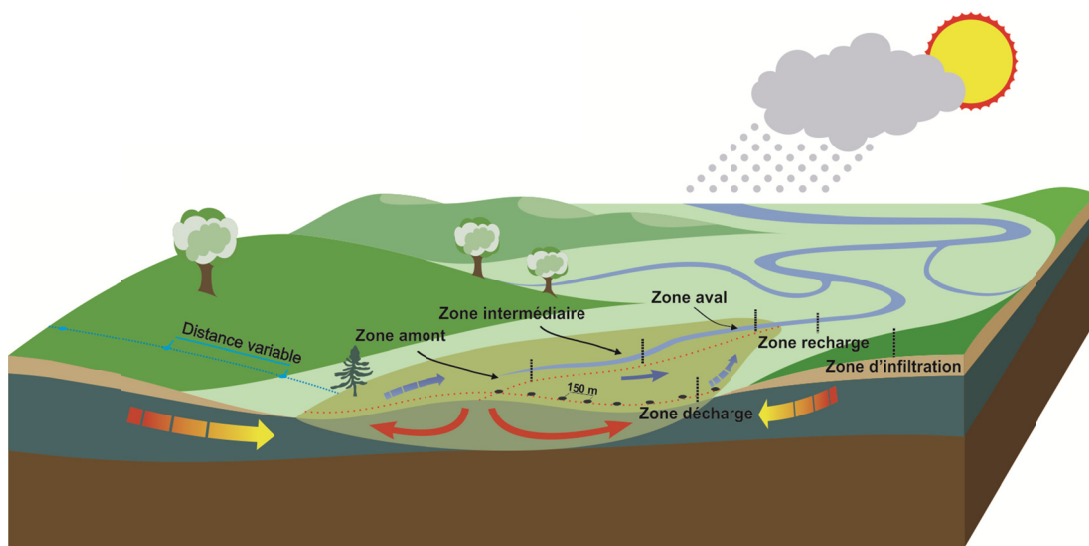


Figure 43. Zones instrumentées à l'aide de piézomètres et l'emplacement des mesures de niveau statique réalisées à l'intérieur (points noirs) et à l'extérieur du complexe tourbeux (points bleus)

L'instrumentation et la caractérisation *in situ* des sites sont similaires dans les sept complexes tourbeux:

- Des mesures de profondeur des dépôts organiques à chaque 100 m;
- L'identification du substratum à chaque 100 m;
- La mesure de niveaux statiques a été réalisée sur deux transects à chaque 100 m à l'intérieur et à des distances variables en périphérie du complexe tourbeux ;
- L'installation de piézomètres instrumentés de sondes Solinst permettant la mesure en continu des niveaux d'eau (secteurs amont, intermédiaire, aval, de décharge, de recharge et infiltration);
- L'installation d'un pluviomètre à bascule et d'un baromètre;
- L'échantillonnage de trois carottes de tourbes de 1 m à l'aide d'un BoxCorer (secteurs amont, intermédiaire, aval) pour des analyses de densité, de conductivité hydraulique et de concentration en matière organique.

Les échantillons et les données recueillies ont permis de réaliser les travaux suivants :

- Des mesures de conductivités hydrauliques en laboratoire sur les dépôts tourbeux à l'aide de la méthode des cubes (travaux réalisés à l'UQAM);
- Des mesures de densité des dépôts tourbeux à l'aide d'un banc d'analyse «Multi Sensor Core Logger (MSCL)», un instrumenté géophysique encore jamais utilisé sur des carottes de tourbes (travaux réalisés à l'UQAR);
- Des mesures de concentration de carbone et de la densité à l'aide d'une méthode par séchage et de perte au feu (travaux réalisés à l'UQAM);
- Des essais de perméabilité *in situ* dans les dépôts organiques dans tous les piézomètres installés dans les différentes sections de chaque complexe tourbeux;
- Le développement d'un programme en langage R permettant de calculer la porosité effective de la tourbe à l'aide des variations de niveaux d'eau et des précipitations.

Les données récoltées pendant les travaux de terrain, de laboratoire et d'analyse numérique réalisés dans le cadre de cette thèse sont présentement en traitement et ne sont pas présentées ici. L'analyse préliminaire des données a fait l'objet de deux communications orales (Bourgault et Larocque, 2014; Bourgault et al., 2014) et deux affiches (Bourgault et al., 2015; Roux et al., 2015) (voir résumés à l'**Annexe 3**).

6.2 Modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle régionale

Ce projet vise à intégrer toutes les données acquises durant les projets PACES Bécancour et Nicolet-Bas Saint-François dans un modèle régional de l'écoulement souterrain, afin 1) d'améliorer la compréhension de la dynamique supra-régionale de l'eau souterraine et 2) de valider les flux de recharge de l'aquifère fracturé, les flux d'eau souterraine dans les cours d'eau et l'écoulement régional profond. La zone modélisée couvre le bassin versant de la rivière Nicolet et celui des rivières Bécancour, Gentilly, aux Orignaux, aux Glaises, petite du Chêne ainsi que des petits bassins versants se jetant directement dans le fleuve Saint-Laurent. La partie basse de la rivière Saint-François n'a pas été incluse dans la modélisation puisqu'elle ne couvrirait pas l'entière du bassin versant de la rivière Saint-François. La combinaison des deux zones d'étude permet de développer un modèle dont les limites sont plus naturelles, n'étant pas restreintes à un seul grand bassin versant. La modélisation est réalisée en régime permanent à l'aide du logiciel GMS 10 (Aquaveo, 2014) qui utilise le modèle MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005). Les travaux liés à ce projet ont été présentés par Sylvain Gagné (Gagné et al., 2015) à la Réunion conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC à Montréal au début mai 2015 (**Annexe 3**).

Maillage

La zone modélisée couvre une superficie de 7452 km². La discrétisation horizontale du modèle est représentée selon un maillage de 250 m par 250 m (cf. la coupe amont-aval

illustrée à la (**Figure 44**). La surface topographique a été extraite du modèle numérique altimétrique (section 2.2.1). Verticalement, le modèle est constitué de 15 couches d'épaisseurs variables (épaisseur moyenne de 20 m). La première couche (couche 1) est limitée à son sommet par la surface du sol. Les autres couches suivent parallèlement la base de la couche 1. La base du modèle (couche 15) est une surface plane en pente avec une élévation de -100 m dans la partie amont et de -200 m au fleuve Saint-Laurent. L'épaisseur maximale du modèle est de 800 m en amont et de 200 m en aval.

Paramètres hydrogéologiques

La distribution spatiale de la conductivité hydraulique (K) a été basée sur la géologie du socle rocheux (section 4.1) pour les couches 2 à 15 et sur les indices de confinement pour la couche 1) (4.3). Les propriétés hydrogéologiques du roc ont été séparées en deux zones qui représentent les couches dites « superficielles » (couches 2 à 7) et les couches dites « profondes » (couches 8 à 15). Dans la couche 1, les variations spatiales de la conductivité hydraulique sont représentées au moyen de trois zones correspondant aux secteurs captifs, semi-captifs et libres.

Conditions limites

Les conditions limites du modèle hydrogéologique sont présentées à la **Figure 45**. Le réseau hydrographique à l'échelle du 1 :50000 est représenté avec le module RIVER de MODFLOW. Le niveau de l'eau dans les cours d'eau correspond à la topographie du sol et son lit à 2 m sous la surface du sol. Des charges constantes (couches 1 à 3) sont utilisées pour représenter les principaux lacs et pour le fleuve Saint-Laurent (altitude de 4 m, couches 1-15). Les limites amont, nord-est, sud-ouest, ainsi que la base du modèle sont des limites à flux nul. Le module RECHARGE est utilisé comme condition limite à la surface du modèle (**Figure 45**). La recharge annuelle moyenne (période 1989-2009) spatialisée calculée dans le cadre du présent projet (section 5.3.3) et dans le PACES-Bécancour (Larocque et al., 2013) a été utilisée.

Observations

Tous les points de niveaux d'eau utilisés pour la réalisation des cartes piézométriques des projets PACES Nicolet-Bas Saint-François et Bécancour sont utilisés comme points de comparaison avec les charges hydrauliques modélisées et comme cible de calage. Au total, environ 11 000 niveaux d'eau proviennent du SIH sont disponibles, de même que 286 niveaux issus de rapports de consultant et 285 ayant été mesuré dans le cadre des deux projets (**Annexe 11**).

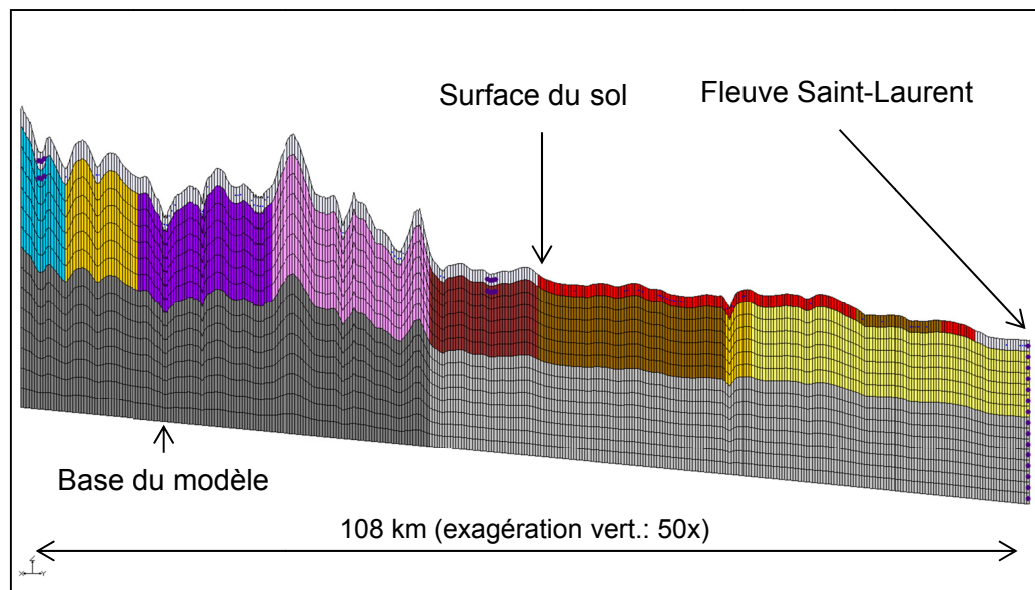


Figure 44 Maillage du modèle

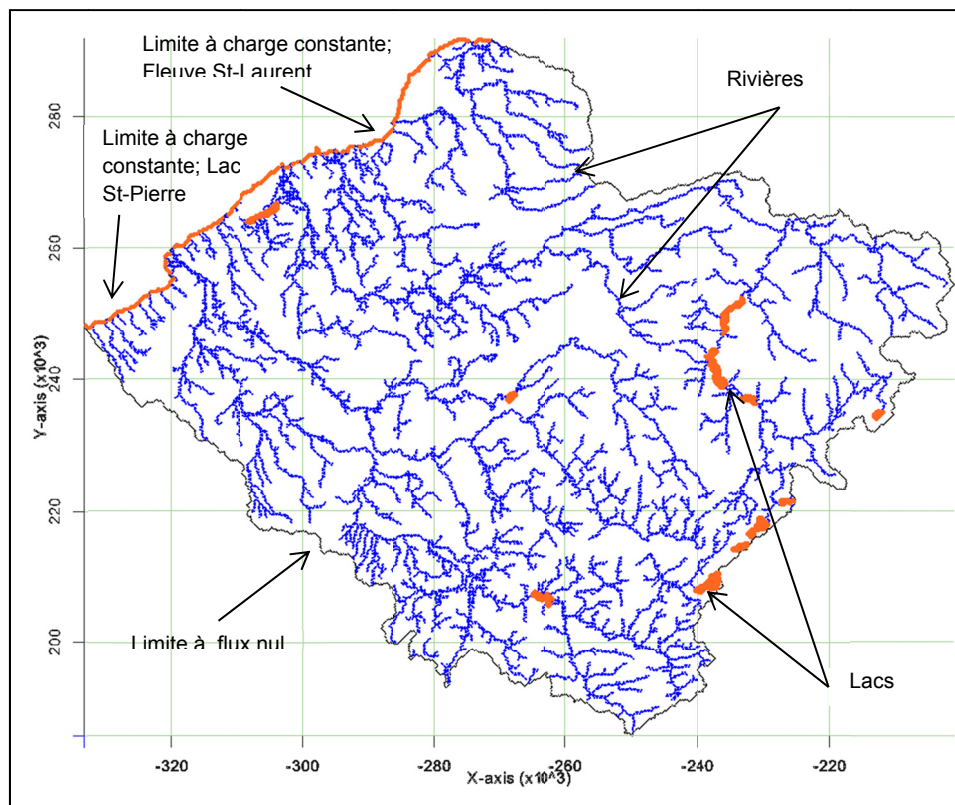


Figure 45 Conditions limites du modèle

6.2.1 Résultats

Charges simulées

Les résultats du calage du modèle sont présentés à la L'erreur moyenne sur les charges hydrauliques est de 0,8 m, l'erreur moyenne absolue de 7,8 m et le RMSE de 13,7 m (**Figure 46**). Les erreurs sont bien distribuées le long de l'axe $X = Y$, ce qui indique qu'il n'y a pas de biais majeur au niveau de la distribution spatiale des erreurs. L'erreur moyenne absolue est inférieure à 10 m ce qui est satisfaisant compte tenu de la gamme des valeurs (0 m à 700 m) et de l'incertitude associée aux mesures piézométriques provenant du SIH. Aucune modification de la recharge n'a été nécessaire pour caler le modèle.

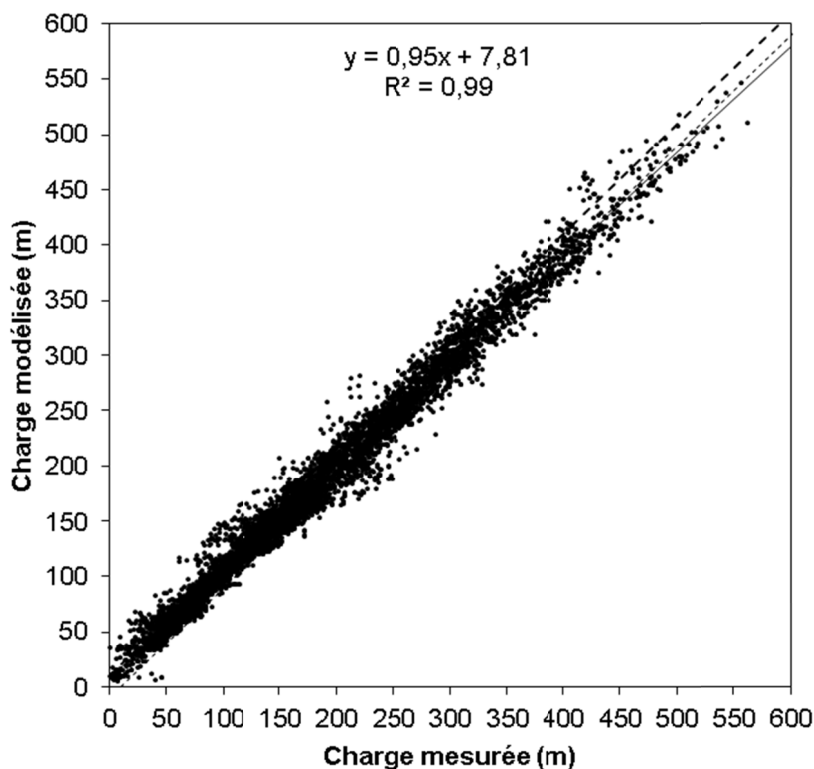


Figure 46 Comparaison des charges hydrauliques mesurées et modélisées

Bilan hydrique

Le bilan hydrologique des différentes composantes du modèle hydrogéologique est présenté au **Tableau 26**. Les résultats sont présentés spécifiquement pour le bassin versant de la rivière Nicolet. Ils montrent que le flux d'eau souterraine qui se décharge

dans le réseau hydrographique représente la majeure partie du bilan et représente plus de 95 % (154 mm) de la recharge. Un flux représentant environ 1 % (2 mm) de la recharge est échangé entre les bassins versants Nicolet (0,9 mm) et Bécancour (0,8 mm). Finalement, l'écoulement régional vers le lac Saint-Pierre est faible et représente moins de 0,1 % (0,1 mm) de la recharge. L'écoulement régional vers le fleuve Saint-Laurent à partir de la zone Bécancour représente 0,5 % (1 mm) de la recharge.

Tableau 26 Bilan hydrologique du modèle

Composante du bilan	Flux (mm/year)	% de la recharge
Recharge	162	100,0%
Discharge to river network	154	94,7%
Discharge to lakes	6	3,7%
Discharge to St-Lawrence River	1	0,6%
Flux to Nicolet Watershed	0,9	0,6%
Flux to Bécancour Watershed	0,8	0,5%
Discharge to St-Pierre Lake	0,1	0,1%

Les résultats du bilan hydrique correspondent bien aux conclusions hydrogéologiques présentées dans la section qui porte sur la géochimie (**section 5.6**). En effet, les données géochimiques montrent que l'eau souterraine dans la partie aval est très minéralisée et même saumâtre. Ceci implique un taux de recharge faible et un faible taux de renouvellement de l'aquifère dans cette zone, comme en témoigne le taux de décharge simulé au lac Saint-Pierre (0,7 mm/an). L'intégration de deux grands bassins versant dans un seul modèle hydrogéologique a permis de mettre en évidence l'existence de flux entre ces bassins. Bien que faibles à l'échelle de la zone d'étude, les volumes d'eau échangés peuvent être importants à l'échelle locale et apportent un éclairage nouveau sur l'approche de gestion par bassins versants dans les zones limitrophes. Les valeurs de K obtenues par la calibration du modèle sont présentées au **Tableau 27**.

Tableau 27 Propriétés hydraulique du modèle hydrogéologique régionale

	Kh (m/jour)	Anisotropie verticale
Libre	5	10
Semi captif	0,5	5
Captif	0,01	5
Roc BTSL surface	0,8	5
Roc BTSL profond	0,05	5
Roc Appalaches surface	0,03	5
Roc Appalaches profond	0,05	100

Les résultats montrent un aquifère aux propriétés hydrauliques homogènes. C'est résultats consolident les résultats de la section 5.1 selon lesquelles il n'y a pas de différences marquées de K entre les unités géologiques du socle rocheux. Les valeurs de K issues de la calibration varient de 0,01 m/jour pour le roc profond à 5 m/jour pour les matériaux granulaires perméables. L'anisotropie verticale (K_h/K_v) varie quant à elle de 5 à 100.

Poursuite des travaux

Ce projet particulier est en cours de finalisation. Les prochaines étapes consisteront à poursuivre le calage de manière à reproduire les débits de base mesurés en rivière au moment des étiages (section 60). Les zones où des flux d'eau sont échangés entre les deux bassins versant seront identifiées précisément afin de comprendre les facteurs qui favorisent ces transferts. Finalement, une comparaison des temps de parcours du modèle (traçage de particules avec MODPATH (Pollock, 2012)) avec les différents âges obtenus à partir des traceurs géochimiques et isotopiques sera réalisée.

6.3 Modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine à l'échelle locale

La modélisation numérique de l'écoulement des eaux souterraines à l'échelle locale est au cœur de ce projet de maîtrise en sciences de la Terre d'Olivier Ferland, réalisé dans le cadre du projet PACES Nicolet-bas-Saint-François. Les objectifs de ce travail de recherche sont 1) de quantifier la recharge et l'émergence des eaux souterraines à l'échelle locale dans trois contextes types des Basses-Terres du Saint-Laurent et du piémont des Appalaches, et 2) d'identifier les caractéristiques du milieu qui déterminent les conditions d'écoulement. Les simulations ont été faites à l'aide du logiciel GMS 9.2 (Aquaveo, 2014) qui utilise le modèle MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005).

La représentation conceptuelle de la géologie 3D des trois différents contextes provient de données de terrains récoltés durant l'été 2013 et de rapports de consultants. Une partie des résultats a été comptabilisée dans ce rapport sous la forme de coupes topogéologiques (**section 4.2.4**). Les zones modélisées représentent trois contextes hydrogéologiques différents, soit une zone semi-captive (zone 1), une zone à nappe libre (zone 2) et une zone de vallée en U avec une épaisseur importante de dépôt meubles (zone 3). Les trois sont localisées sur le bassin de la rivière Nicolet : la zone 1 est située en aval de bassin, près de la rivière des Saults, la zone 2 est en milieu de bassin, près de la rivière Noire, et la zone 3 est en amont dans la vallée de la rivière Nicolet Centre (voir localisation à la section 3.2.7). La géologie des dépôts meubles et celle du roc ont été représentées de façon précise afin de reproduire l'hétérogénéité de la couverture de dépôts meubles.

Maillage

Les modèles développés représentent des coupes verticales en deux dimensions (**section 4.2.4**), suivant une ligne d'écoulement locale de l'eau souterraine. Les cellules sont de surfaces égales de 10 m (dans le sens de l'écoulement) par 100 m (perpendiculairement à l'écoulement), leurs épaisseurs varient entre 0,5 m et 1,1 m (**Figure 47**). La zone 1 est composée de 76 couches atteignant une profondeur de 3 m par rapport au niveau de la mer. La zone 2 a 80 couches pour une profondeur de 50 m et la zone 3 a 146 couches pour une profondeur 195 m. L'épaisseur des trois modèles est différente puisque les variations de dénivelés sont très différentes. La topographie utilisée provient des données LiDAR pour les deux premières zones et du MNA pour la zone 3. Les trois zones sont circonscrites à l'amont et sur les côtés par des limites à flux nul. Les limites aval des zones 1 et 3 sont définies par des cours d'eau représentés avec le module RIVER de MODFLOW, tandis que celle de la zone 2 est une tourbière qui est représentée par une charge constante sur la première couche. Les profils des zones 1 et 2 mesurent 8 km pour et celui de la zone 3 mesure 3 km. La recharge utilisée pour la simulation transitoire provient du modèle HydroBilan (**section 5.3**) qui a été modifié en fonction des indices de confinements sur chaque profil. Elle est représentée avec le module RECHARGE de MODFLOW (**Figure 47**).

Tableau 28 Conductivités hydrauliques provenant du régime permanent pour les trois zones

Matériel hydrogéologique	Kh (m/s)	Kv (m/s)
Tourbe	1×10^{-2} à 1×10^{-3}	1×10^{-3}
Argile*	$3,0 \times 10^{-8}$ à $1,1 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-8}$ à $1,1 \times 10^{-7}$
Sable	$7,0 \times 10^{-6}$ à $1,1 \times 10^{-04}$	$7,0 \times 10^{-6}$ à $1,1 \times 10^{-3}$
Gravier	$6,0 \times 10^{-5}$ à $5,0 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-5}$ à $5,0 \times 10^{-3}$
Till	$5,0 \times 10^{-7}$ à $1,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-7}$ à $6,0 \times 10^{-4}$
Till Remanié	$8,0 \times 10^{-7}$ à $5,0 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-7}$ à $5,0 \times 10^{-6}$
Silt	$9,5 \times 10^{-8}$ à $2,0 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-8}$ à $2,0 \times 10^{-7}$

*Valeur de référence de la littérature

Paramétrisation du milieu

La plupart données de conductivités hydrauliques proviennent des résultats du projet. Les valeurs manquantes pour certains matériaux géologiques, de même que les coefficients d'emménagement proviennent de la littérature. Les conductances de lits de rivières ont été définies en fonction des matériaux qui les constituaient et des conductivités hydrauliques connues. Le coefficient d'emménagement calé varie de 0,1% à 35% pour les matériaux en nappe libre et de 1% à 0,00001% pour les conditions captives.

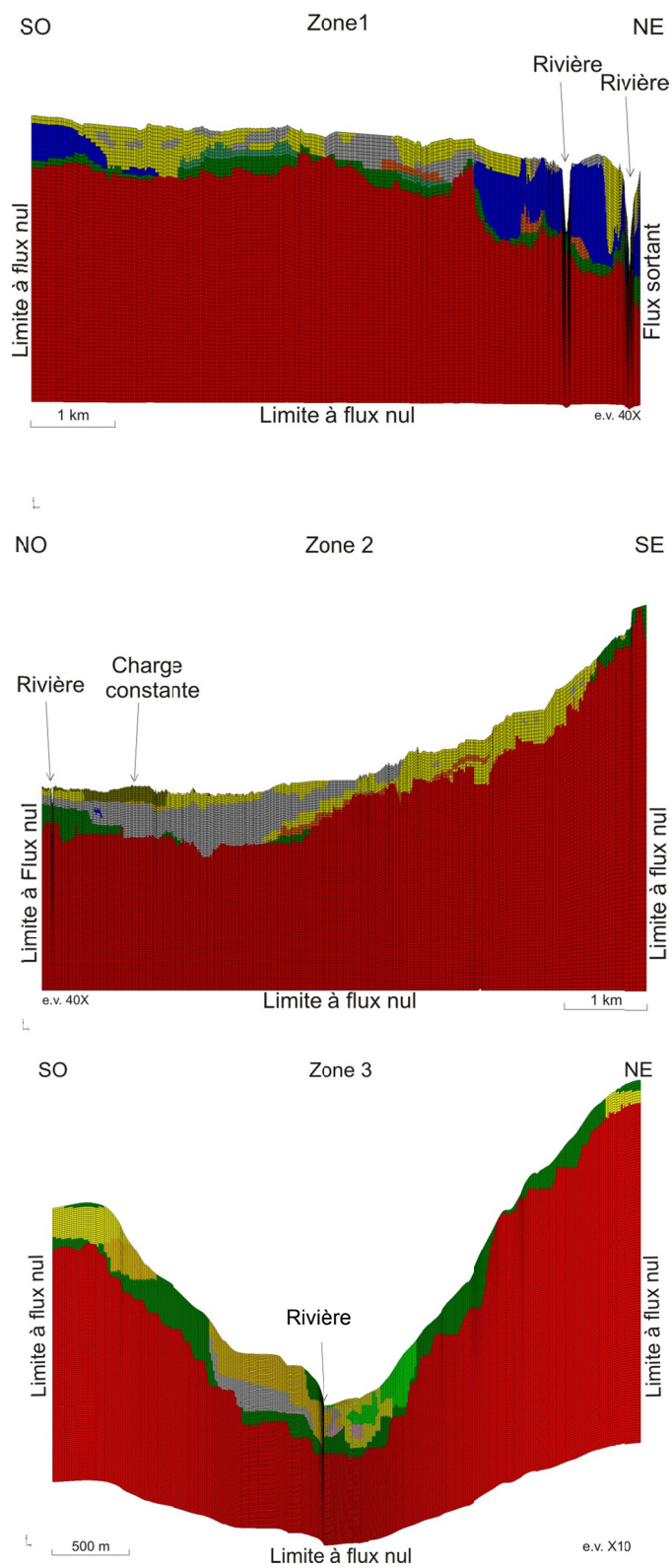


Figure 47 Conditions limites pour les zones 1, 2 et 3

Simulation et calage du modèle

Les trois modèles de chacune des zones ont d'abord été calés en régime permanent et ensuite le calage a été raffiné en régime transitoire. La calibration en régime permanent des zones 1, 2 et 3 est basée respectivement sur 14, 18 et 11 points d'observations de charges piézométriques mesurés manuellement à l'été 2013. La recharge a été calée en fonction de la recharge moyenne du bassin versant en entier. Les simulations en régime transitoire ont été réalisées pour la période du 9 août 2013 au 8 août 2014. Elles ont été générées avec des périodes hebdomadaires et un pas de temps de calcul temps journalier. Le calage a été réalisé de manière à reproduire des observations piézométriques horaires disponibles pour trois piézomètres sur chaque zone, pour deux sondes de rivières pour les zones 1 et 3 et pour une charge à niveau constant pour la zone 2. Ceci a été effectué en ajustant les conductivités hydrauliques obtenues lors du calage en régime permanent et les coefficients d'emménagement. La recharge obtenue à partir d'HydroBilan a été également calée à partir des amplitudes et des fréquences des niveaux piézométriques.

6.3.1 Résultats

Régime permanent

Les simulations en permanents ne reproduisent pas parfaitement les charges simulées pour toutes les zones (**Figure 48**). La RMSE est de 1,02 m pour la zone 1, de 2,40 m pour la zone 2 et de 4,74 m pour la zone 3. Les plus grandes variations de RMSE sont causées par les variations topographiques qui sont plus importantes pour les zones 2 et 3. Les RMSE normalisés en fonction de l'élévation montrent des valeurs similaires, 0,02, 0,04 et 0,05 m pour les zones 1, 2 et 3 respectivement. Les recharges obtenues pour le calage en régime permanent sont de 48, 155 et 434 mm/an pour les zones 1, 2 et 3.

Régime transitoire

Les simulations en régimes transitoires représentent généralement bien les variations de recharge pour les trois profils. L'amplitude et la fréquence des niveaux simulés comparées aux niveaux mesurés sont semblables pour la plupart des piézomètres sauf pour le PZ8 où le modèle reproduit des variations de charges trop grandes et pour le PZ9 où le modèle ne peut reproduire les moins bien ou trop aux recharges. Les charges maximales mesurées et simulées pour la majorité des piézomètres simulés sont au printemps 2014 tandis que les charges minimales sont à l'hiver 2014. De manière générale, les niveaux simulés sont similaires aux niveaux mesurés pour toute la période simulée (**Figure 48**). Les RMSE pour les zones 1 à 3 sont faibles, 0,38, 0,63 et 1,20 m pour les zones 1, 2 et 3 respectivement.

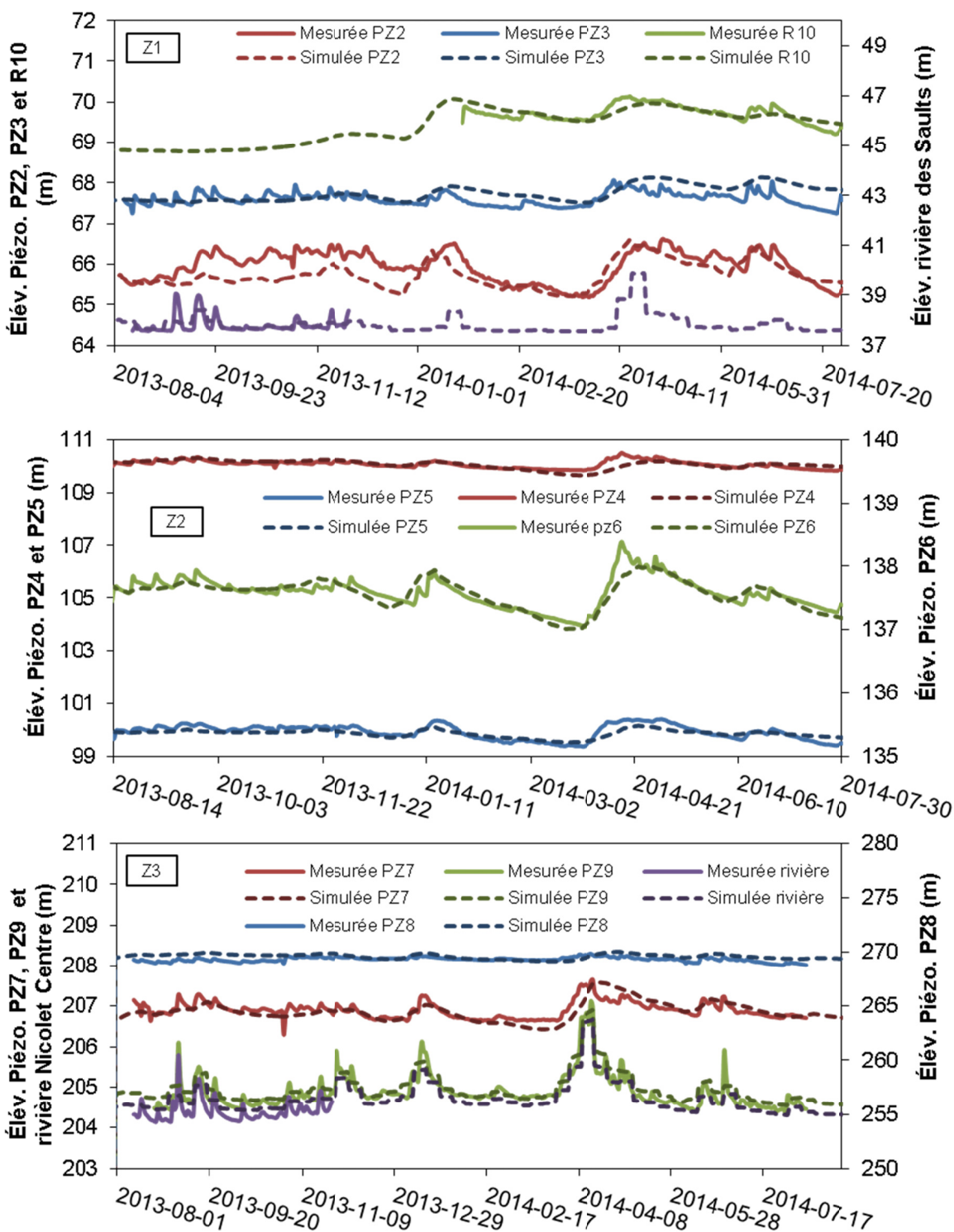


Figure 48 Niveaux mesurés vs. simulés pour les zones 1, 2 et 3

La modélisation en transitoire a permis d'identifier précisément les zones de recharges principales pour chacun des profils. Celles-ci se trouvent en amont des profils sur les

dépôts perméables et semi-perméables. La zone de recharge est de faible étendue pour la zone 1, couvrant moins d'un kilomètre de long pour l'entièreté du profil. Pour les deux autres profils, la recharge couvre presque une bonne partie de la superficie sauf pour les endroits où des matériaux imperméables sont présents. Les recharges varient pour les trois profils de 103 mm/an (zone 1), à 134 mm/an (zone 2) et à 230 mm/an (zone 3).

6.3.2 Poursuite des travaux

Ce projet particulier est encore en cours. Une analyse de sensibilité sera réalisée afin de déterminer quels sont les paramètres qui influencent le plus l'écoulement souterrain dans chacun des trois contextes géologiques. Les flux d'eau souterraine qui émergent aux limites aval des profils seront quantifiés pour comprendre comment ils sont influencés par le contexte géologique ainsi que par la recharge. Les résultats finaux de ce projet seront présentés dans le mémoire de maîtrise d'Olivier Ferland.

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 (MDDELCC, 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 (MDDELCC, MAMOT, MAPAQ et Statistiques Canada) ont été compilées par municipalité. La méthode utilisée pour analyser les données peut être consultée à l'**annexe 16**.

Au total sur la zone d'étude, plus de 71 millions de mètres cubes d'eau sont consommés chaque année, 33 % provenant de l'eau souterraine et 67 % provenant d'eaux superficielles (**Tableau 30 et Carte 24**). Les MRC de Drummond et d'Arthabaska sont celles où la consommation d'eau est la plus importante, avec 51% et 30% de toute l'eau consommée sur la zone d'étude, respectivement (**Tableau 30**). En raison du petit nombre de personnes qui habitent les MRC de Pierre-de-Saurel, de Bécancour et d'Acton sur la zone d'étude, la consommation de celles-ci est faible (Pierre-de-Saurel, 0,06 %, Bécancour, 0,03 % et Acton, 0,004 % de toute l'eau consommée sur la zone d'étude).

Sur la zone d'étude, l'eau souterraine consommée correspond à un prélèvement de 5 mm/an, tandis que la consommation totale d'eau sur la zone d'étude correspond à 15 mm/an. Le pourcentage d'utilisation de l'eau souterraine (33 %) est supérieur au 20 % estimé pour l'ensemble de la province par le MDDELCC (2013b). Le pourcentage d'alimentation à partir d'eau souterraine est toutefois très variable sur la zone d'étude : 16 % dans la MRC de Drummond, 34 % dans la MRC de L'Érable, 54 % dans la MRC d'Arthabaska, et jusqu'à 100 % dans les MRC d'Acton, Bécancour, Le Val-Saint-François, Les Appalaches et Pierre-de-Saurel (portions incluses dans la zone d'étude) (**Carte 25**).

La **carte 26** et le **Tableau 29** présentent la consommation d'eau par type d'utilisation pour les MRC de la zone d'étude. Sur l'ensemble de la zone d'étude, la consommation d'eau par type d'utilisation se répartit de la manière suivante : 40 % pour l'utilisation résidentielle, 38 % pour les utilisations industrielle, commerciale et institutionnelle (ICI, incluant les pertes dans le réseau de distribution) et 22 % pour l'utilisation agricole. L'utilisation de l'eau pour des fins agricoles sur la zone d'étude est majoritairement dédiée à la culture de la canneberge (54 %) et à l'élevage (34 %). 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-Lucien (3 606 591 m³), Sainte-Séraphine (1 441 375 m³) et Saint-Cyrille-de-Wendover (1 356 437 m³). Dans ces trois 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.

Tableau 29 Consommation d'eau par type d'utilisation pour les MRC de la zone d'étude

MRC	Résidentielle (m³/an)	ICI et pertes (m³/an)	Agricole (m³/an)
Acton	791	101	1989
Arthabaska	11295775	6170275	4110773
Bécancour	13072	3399	3465
Drummond	11897995	17341022	7161665
Le Haut-Saint-François	56241	6112	9499
Le Val-Saint-François	83243	10041	40671
L'Érable	1170877	2026805	1036855
Les Appalaches	26999	4758	546235
Les Sources	1568091	420402	437334
Nicolet-Yamaska	2530754	685160	2364554
Pierre-De Saurel	19617	2511	23216
Total	28663454	26670585	15736256

Les villes où l'utilisation d'eau à des fins résidentielles est la plus importante sont également les plus peuplées: Drummondville (approvisionnement de surface à partir de la rivière Saint-François) et Victoriaville (approvisionnement mixte à partir du réservoir Beaudet à la rivière Bulstrode et des stations de pompage d'eau souterraine de Victoriaville et Arthabaska).

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 Saint-Fortunat (542 189 m³), Wickham (304 872 m³) et Saint-Pie-de-Guire (238 729 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 Notre-Dame-du-Bon-Conseil (12 044 154 m³), Drummondville (4 705 625 m³), Victoriaville (2 730 330 m³), Kingsey Falls (2 439 029 m³) et Princeville (2 012 001 m³) où les usages industriels sont principalement retrouvés.

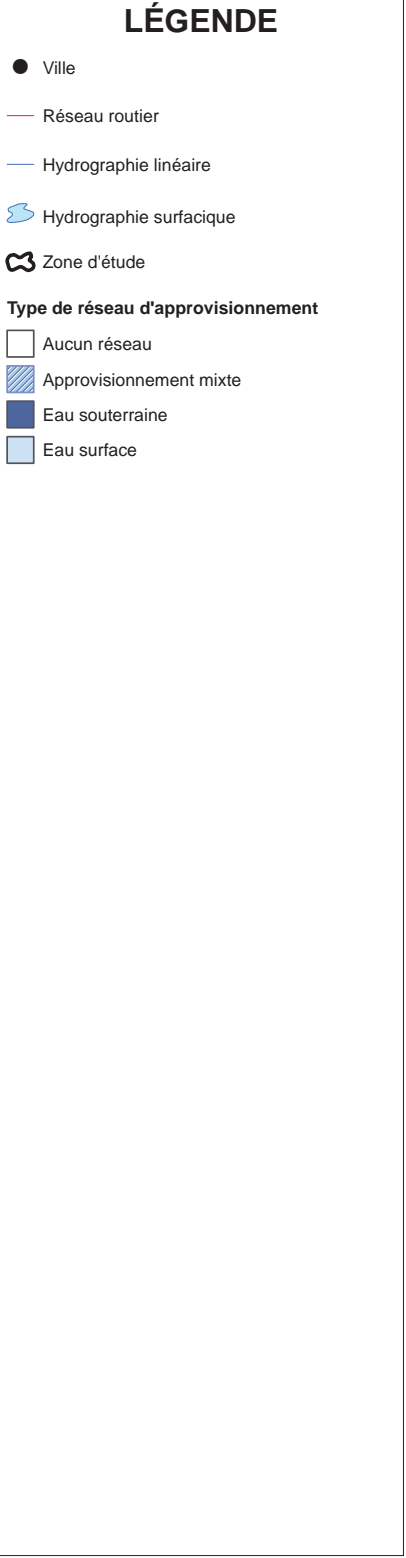
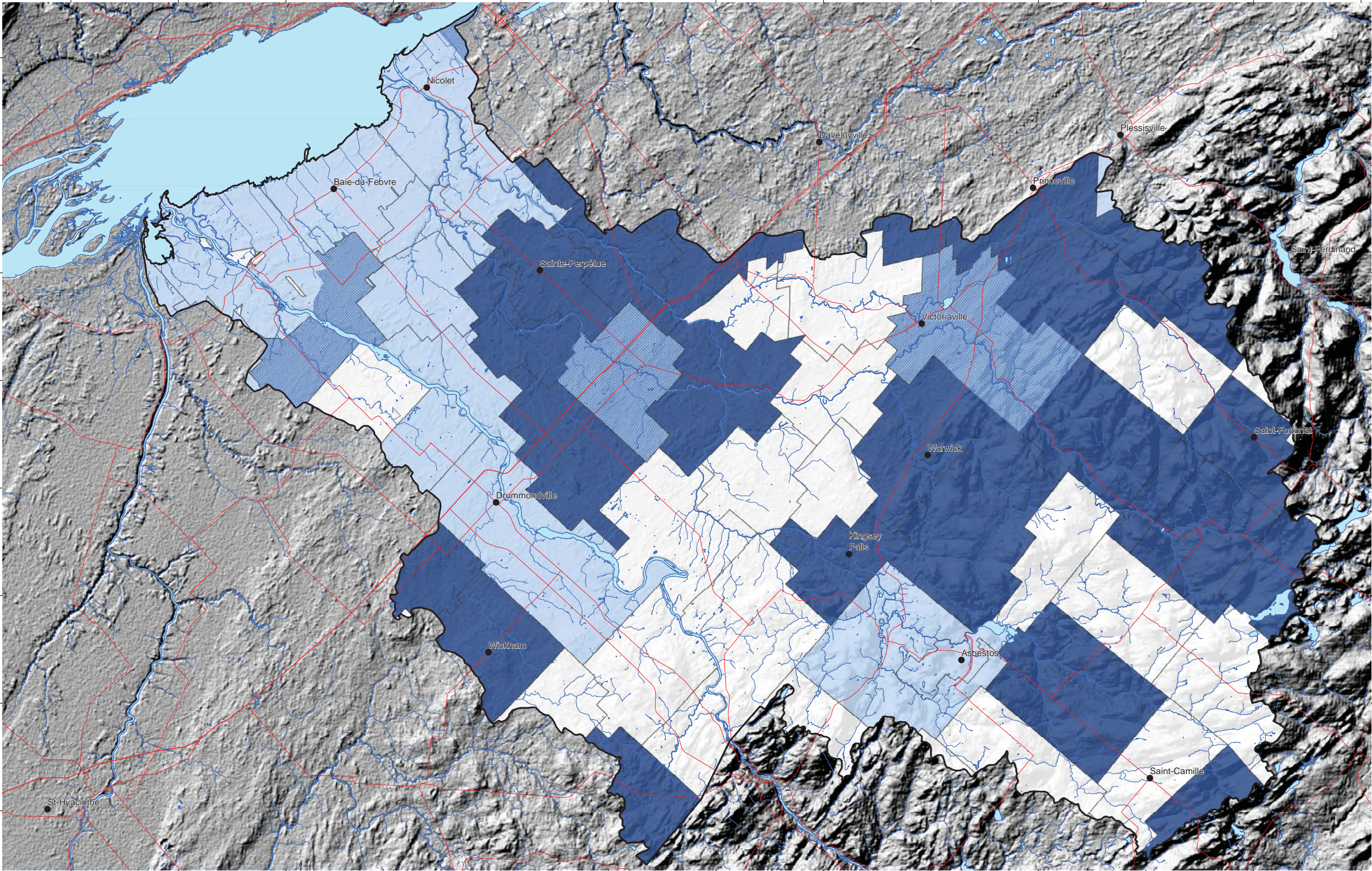
Tableau 30 Résumé de l'utilisation de l'eau souterraine

MRC	Municipalité	Utilisation de l'eau [m ³ /année]		
		Totale	Eau	Eau de
Acton	-	2 881	2 881	-
	Saint-Nazaire-d'Acton*	2816	2816	-
	Saint-Théodore-d'Acton*	65	65	-
Arthabaska	-	21 576 823	11 608 823	9 968 000
	Chesterville	227 324	227 324	-
	Ham-Nord	122 900	122 900	-
	Kingsey Falls	2 733 950	340 017	2 393 933
	Notre-Dame-de-Ham	60 544	60 544	-
	Saint-Albert	343 798	343 798	-
	Saint-Christophe-d'Arthabaska	3 704 715	3 703 302	1 413
	Sainte-Anne-du-Sault*	533	533	-
	Sainte-Clotilde-de-Horton	818 630	326 960	491 670
	Sainte-Élizabéth-de-Warwick	145 416	145 416	-
	Sainte-Hélène-de-Chester	84 779	84 779	-
	Sainte-Séraphine	1 480 515	144 150	1 336 365
	Saint-Norbert-d'Arthabaska	314 119	314 119	-
	Saint-Rémi-de-Tingwick	127 248	127 248	-
	Saint-Rosaire*	308 716	31 098	277 618
	Saint-Samuel	169 728	169 728	-
	Saints-Martyrs-Canadiens*	13 615	13 615	-
	Saint-Valère*	419 131	220 000	199 131
	Tingwick	458 289	300 905	157 384
	Victoriaville	8 296 408	3 185 923	5 110 485
	Warwick	1 746 466	1 746 466	-
Bécancour	-	19 936	19 936	-
	Bécancour*	19 936	19 936	-
Drummond	-	36 400 682	5 965 958	30 434 724
	Drummondville*	14 295 449	612 760	13 682 689
	Durham-Sud*	122 055	122 055	-
	L'Avenir	251 192	251 192	-
	Lefebvre*	78 700	78 700	-
	Notre-Dame-du-Bon-Conseil	13 059 414	1 129 453	11 929 961
	Saint-Bonaventure*	169 580	169 580	-
	Saint-Cyrille-de-Wendover	2 120 889	902 350	1 218 539
	Sainte-Brigitte-des-Saults	553 233	553 233	-
	Saint-Félix-de-Kingsey	284 410	284 410	-
	Saint-Germain-de-Grantham*	603 992	603 992	-
	Saint-Lucien	3 775 409	200 744	3 574 665
	Saint-Majorique-de-Grantham*	135 105	116 977	18 128
	Saint-Pie-de-Guire*	383 180	372 439	10 741
	Wickham*	568 074	568 074	-
Le Haut-Saint-François	-	71 852	68 036	3 817
	Dudswell	41 001	41 001	-
	Weedon	30 852	27 035	3 817

MRC	Municipalité	Utilisation de l'eau [m ³ /année]		
		Totale	Eau	Eau de
Le Val-Saint-François	-	133 955	133 955	-
	Cleveland	64 926	64 926	-
	Melbourne	83	83	-
	Saint-Claude	7 531	7 531	-
	Stoke	152	152	-
	Ulverton	61 262	61 262	-
L'Érable	-	4 234 537	1 429 278	2 805 259
	Plessisville*	52 626	52 626	-
	Princeville*	**	1 276 696	**
	Sainte-Sophie-d'Halifax*	26 519	26 519	-
	Saint-Ferdinand*	73 436	73 436	-
Les Appalaches	-	577 992	577 992	-
	Saint-Fortunat	570 089	570 089	-
	Saint-Jacques-le-Majeur-de-	689	689	-
	Saint-Julien	7 214	7 214	-
Les Sources	-	2 425 827	977 594	1 448 233
	Asbestos	1 248 512	55 492	1 193 020
	Danville	539 300	284 087	255 213
	Ham-Sud	21 425	21 425	-
	Saint-Adrien	74 620	74 620	-
	Saint-Camille	98 989	98 989	-
	Saint-Georges-de-Windsor	136 247	136 247	-
	Wotton	306 734	306 734	-
Nicolet-Yamaska	-	5 580 468	2 527 104	3 053 364
	Baie-du-Febvre*	356 303	147 699	208 604
	Grand-Saint-Esprit*	56 895	56 895	-
	La Visitation-de-Yamaska	200 304	159 490	40 814
	Nicolet*	1 408 602	161 514	1 247 088
	Odanak*	48 410	48 410	-
	Pierreville*	958 071	199 309	758 763
	Saint-Célestin*	13	13	-
	Sainte-Eulalie*	411 610	69 803	341 807
	Saint-Elphège	93 514	87 770	5 744
	Sainte-Monique*	196 194	121 974	74 221
	Sainte-Perpétue	361 832	280 204	81 628
	Saint-François-du-Lac*	749 309	517 043	232 266
	Saint-Léonard-d'Aston*	452 320	452 320	-
	Saint-Wenceslas*	17 262	17 262	-
	Saint-Zéphirin-de-Courval	269 827	207 397	62 430
Pierre-de-Saurel	-	45 344	45 344	-
	Saint-David*	4 735	4 735	-
	Saint-Gérard-Majella*	9 110	9 110	-
	Yamaska*	31 498	31 498	-
TOTAL		71 070 295	23 356 900	47 713 396

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

**Données non publiques



MÉTADONNÉES
Section 7.1 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

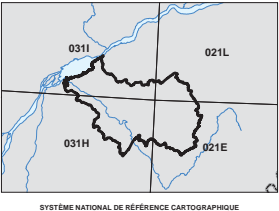
Carte 26 Approvisionnements municipaux
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

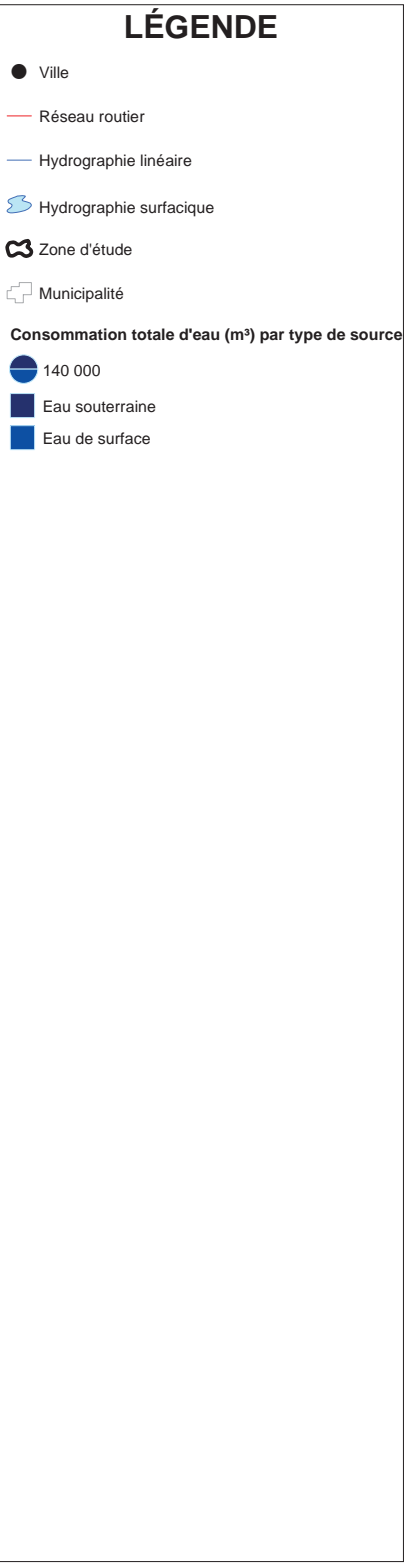
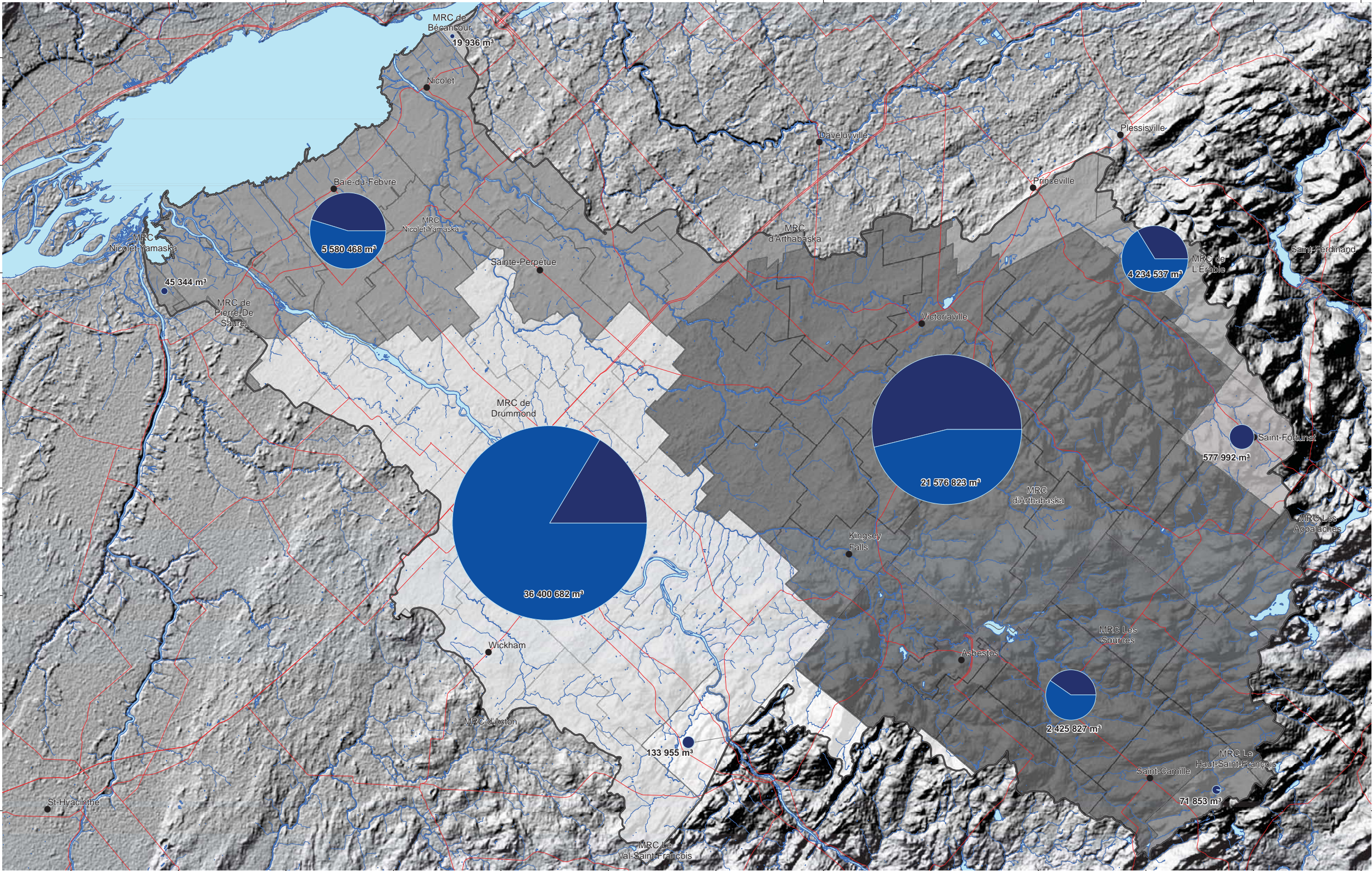
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Informations sur la consommation d'eau :
MDELCC

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



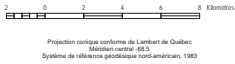
Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et 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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Nomenclature bibliographique consultée :
Larocque, M., Gagné, S., Barthelette, D., Meyzonnat, G.,
Gervais, M. L., Choulet, M. A. 2015. Projet de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDELCC.



MÉTADONNÉES
Section 7.1 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

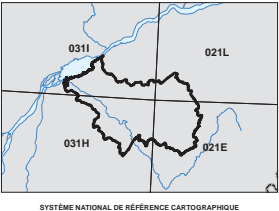
Carte 27 Consommation d'eau par type de source
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

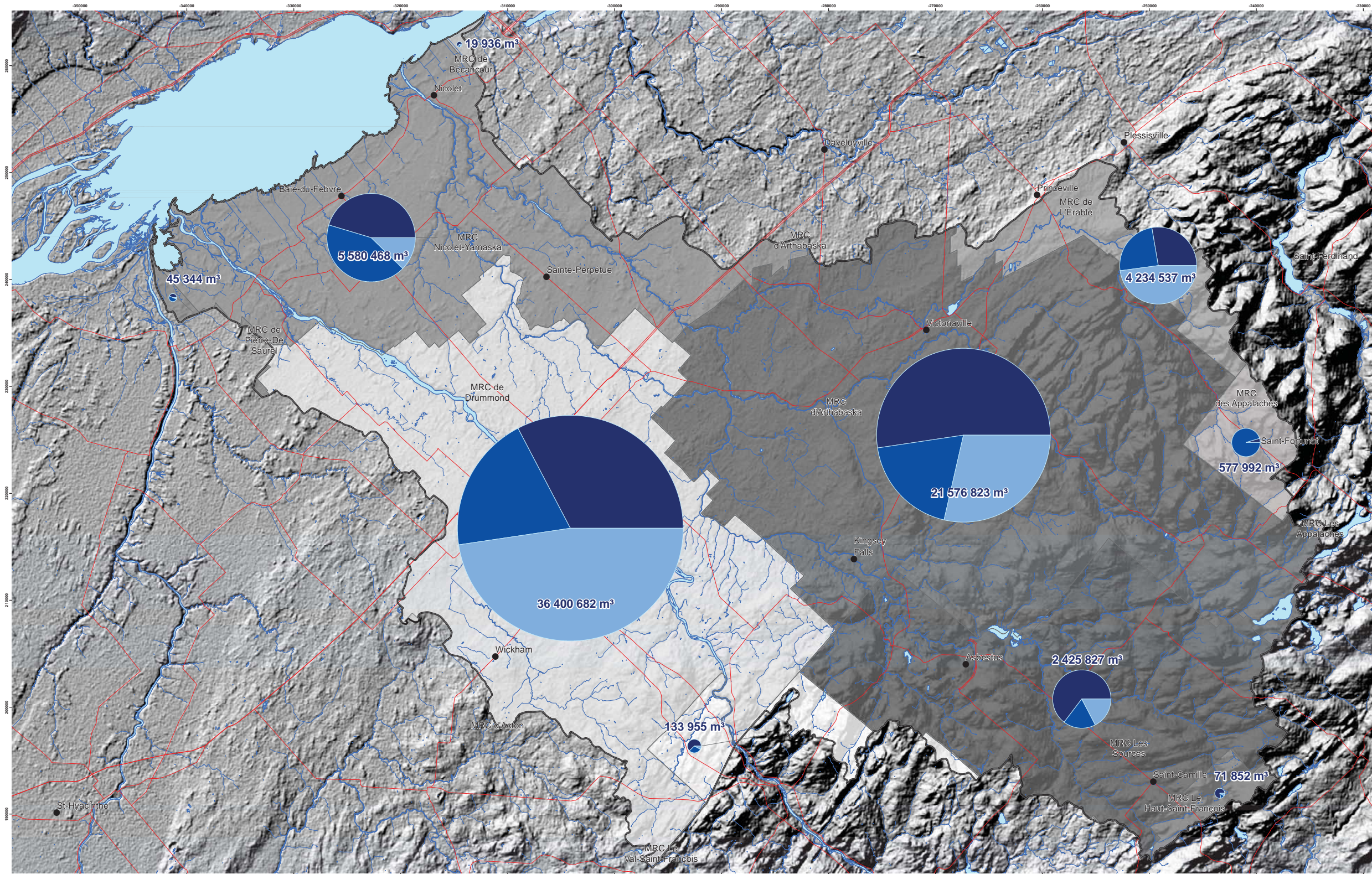
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Informations sur la consommation d'eau :
MDELCC, Statistiques Canada, MAPAQ

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Version bibliographique conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barthelet, D., Meyzonnat, G.,
Groulx, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDELCC.



MÉTADONNÉES
Section 7.1 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 28 Consommation d'eau par type d'utilisation
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Informations sur la consommation d'eau :
MDELCC, 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'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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Révision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barmetste, D., Moynat, G.,
Gravelle, M., H., Côté, M. A. 2015. Profil de connaissance
des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie
basale de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport
présenté au MDELCC.

7.2 Qualité de la ressource

Les données de qualité de l'eau ont été traitées suivant le protocole de traitement et de représentation des données géochimiques (voir l'**annexe 17**). Les résultats présentés ci-après ont fait l'objet de deux présentations orales par Guillaume Meyzonnat et Diogo Barnetche (Meyzonnat et al., 2014a; Meyzonnat et al., 2014b): l'une au colloque du RQES « Des projets d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines à la gestion intégrée de l'eau » au congrès de l'ACFAS en mai 2014 et l'autre au Congrès de l'Est du Canada de recherche sur la qualité de l'eau en octobre 2014 (**Annexe 3**).

7.2.1 Normes de potabilité

Trente-cinq dépassements de normes de potabilité ont été relevés sur les 201 puits échantillonnés (**Tableau 31 et Carte 27**). Seize de ces dépassements concernent le baryum, 13 l'arsenic, deux le fluor, deux le plomb, un le nitrate et un l'uranium. Les dépassements concernant l'uranium et la grande partie de ceux reliés au baryum, à l'arsenic et au fluor 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 et fonction 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. Les dépassements en arsenic se retrouvent dans la zone appalachienne et seraient vraisemblablement d'origine naturelle, principalement par l'altération des minéraux contenant de l'arsenic.

Tableau 31 Sommaire des dépassements de normes*, **

Paramètres	Nb	Statistiques (mg/L)				Critères de potabilité (mg/L)	NB dépassements	Proportion (%)
		Min	Médiane	Max	Écart-type			
Arsenic (As)	201	0	0	0,037	0,01	0,01	13	6,5
Bore (B)	201	0	0,025	3,4	0,3	5	0	0,0
Baryum (Ba)	201	0	0,081	90	6,4	1	16	8,0
Cadmium (Cd)	201	0	0	0,0014	0,0001	0,005	0	0,0
Chrome (Cr)	201	0	0	0,017	0,002	0,05	0	0,0
Fluor (F)	201	0	0,1	2	0,3	1,5	2	1,0
Nitrites/Nitrates (NO ₂ -NO ₃ , mg N/L)	201	0	0	12	1,6	10	1	0,5
Plomb (Pb)	201	0	0,00019	0,027	0,005	0,01	2	1,0
Antimoine (Sb)	201	0	0	0,0023	0,0002	0,006	0	0,0
Sélénium (Se)	201	0	0	0,0057	0,001	0,01	0	0,0
Uranium (U)	201	0	0	0,031	0,003	0,02	1	0,5

*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 (2001)

Les dépassements en plomb ont été repérés dans l'aquifère au roc et dans l'aquifère granulaire, tandis que le dépassement en nitrate a eu lieu dans une pointe de surface installée dans un aquifère granulaire.

À l'échelle régionale, les contaminants d'origine anthropique qui sont le plus souvent analysés pour être mis en perspective avec le niveau de vulnérabilité des aquifères sont les contaminants provenant de sources diffuses, caractérisés par des charges modérées réparties de manière hétérogène, mais sur de grandes superficies. Pour l'eau souterraine, les contaminants diffus les plus courants résultant des activités anthropiques sont les nitrates, une large gamme de pesticides (fongicides, herbicides, insecticides), ainsi que plus récemment, certains composés pharmaceutiques persistants qui se retrouvent à l'état de traces dans l'eau. Bien que les nitrates ne soient pas de parfaits traceurs, car ils peuvent se dégrader (i.e. dénitrification), leur solubilité élevée dans l'eau ainsi que leur fort potentiel de lixiviation dans les sols fait que ces derniers sont généralement très utilisés pour évaluer l'impact des activités anthropiques sur la qualité de l'eau souterraine. Les nitrates peuvent être d'origine naturelle, mais on considère qu'au-delà de 1 mg/L N-NO₃ dans l'eau, la source est vraisemblablement d'origine anthropique (Dubrovsky et al. 2010).

Dans le cadre de ce projet, les nitrates ont été systématiquement analysés dans les 201 puits échantillonnés. Pour la zone d'étude, 62 % des échantillons ne présentaient pas des concentrations détectables de nitrate, 46 échantillons (23 %) ont présenté des valeurs plus petites que 1 mg/L et 31 puits (15 %) présentaient des concentrations plus grandes que 1 mg/L. Un seul puits (NSF250) présente une concentration en nitrates qui dépasse la norme de potabilité de 10 mg/L N-NO₃ (MDDELCC, 2001) (**Carte 28**).

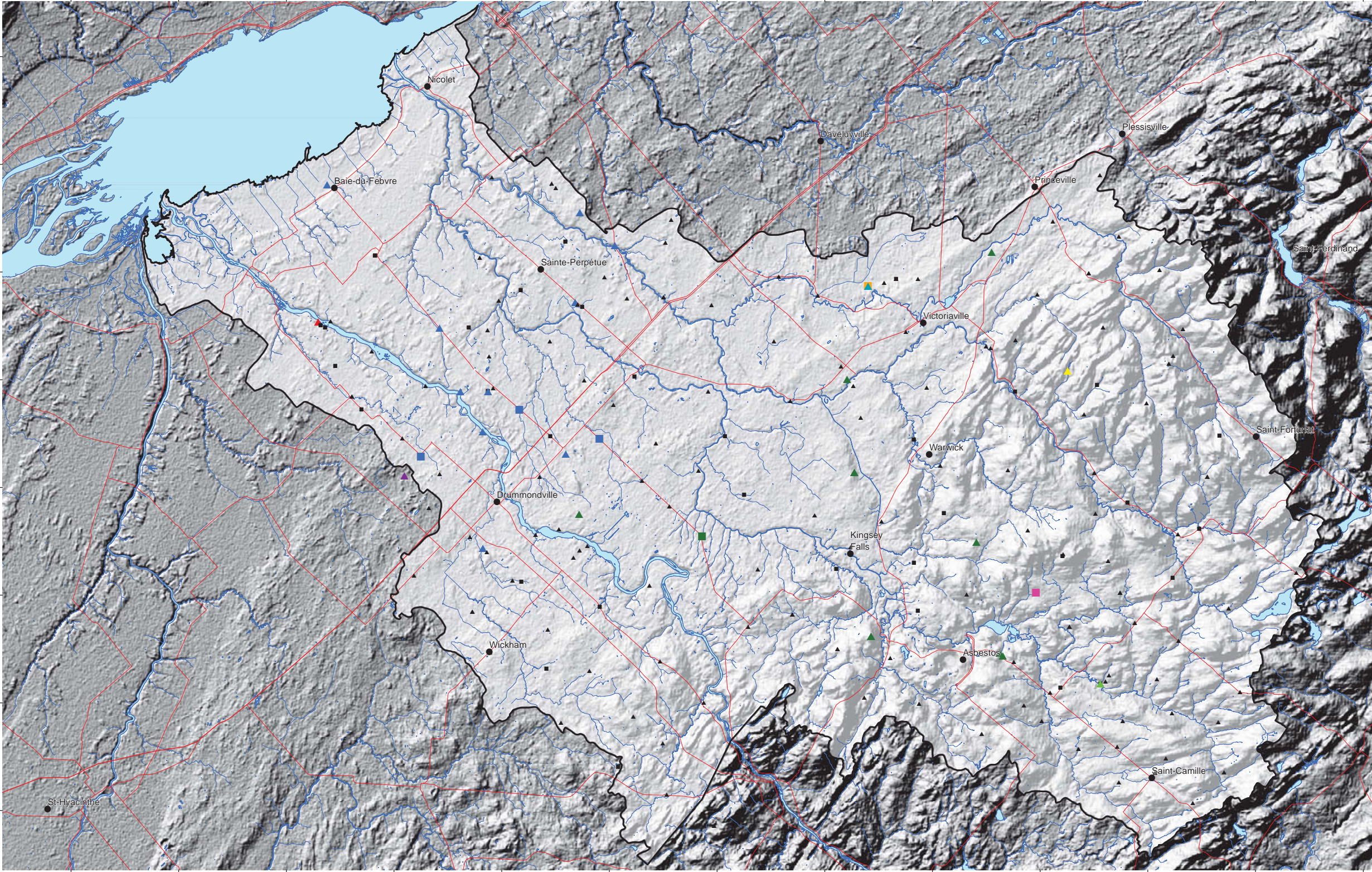
Dans le cadre du projet, les échantillons d'eau souterraine ont également été analysés pour les paramètres bactériologiques. Bien que découlant directement de conditions très locales (état et entretien du puits, présence d'une source de contamination ponctuelle voisine du puits), les contaminations bactériologiques dans l'eau souterraine dépendent également du contexte hydrogéologique régional et de la vulnérabilité des aquifères. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 32** et dans la **carte 29**. Le règlement sur la qualité de l'eau potable indique que l'eau doit être exempte d'organismes pathogènes et d'indicateurs de contamination fécale. L'eau est non potable s'il y a détection d'*Escherichia coli* et/ou d'entérocoques fécaux dans l'échantillon prélevé. Dans ce cas, le puits doit être désinfecté, et un avis d'ébullition est émis si le puits alimente un réseau de distribution. Si l'eau contient plus de 10 coliformes totaux sur un volume de 100 mL et/ou présente plus de 200 bactéries atypiques sur un volume de 100 mL, l'eau est non conforme. Il faut noter que la présence de colonies atypiques en concentration trop importante peut masquer le comptage des bactéries pathogènes dans l'eau. Dans le cas d'eau non conforme, une désinfection du puits ainsi que la surveillance de la qualité de l'eau sont recommandées.

Des dépassements de norme ont été repérés dans tous les quatre paramètres analysés. Les dépassements de coliformes totaux (36), de bactéries atypiques (35) et la présence

d'entérocoques (31) sont ceux les plus fréquents. La présence d'*Escherichia coli* est moins fréquente, mais assez préoccupante aussi. Il est important remarquer que parfois un puits peut présenter plusieurs dépassements en même temps. Pour cette raison les 125 dépassements de norme repérés se concentrent dans 78 puits, une proportion de 45 % des puits analysés. Les analyses bactériologiques indiquent entre autres choses l'état de l'entretien du puits plutôt que les conditions de l'aquifère à une échelle plus étendue.

Tableau 32 Dépassements de niveau bactériologique

Paramètre	NB	CMA	NB Dépassements	Proportion (%)
Bactéries atypiques	173	<200	35	20
Coliformes totaux	173	<10	36	21
Escherichia coli	173	<1	23	13
Entérocoques fécaux	173	<1	31	18
Puits avec au moins un dépassement			78	45



LÉGENDE

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

Dépassement de la norme de qualité de l'eau potable

Éléments inorganiques

- Granulaire - aucun dépassement
- ▲ Roc - aucun dépassement

Granulaire

- Arsenic
- Baryum
- Nitrites/Nitrates
- Plomb

Roc

- ▲ Arsenic
- ▲ Arsenic et Plomb
- ▲ Arsenic et Baryum
- ▲ Baryum
- ▲ Baryum et Fluor
- ▲ Fluor
- ▲ Uranium



MÉTADONNÉES

Section 7.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 29 Qualité de l'eau souterraine - Critères de potabilité

Éléments inorganiques

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS

QUÉBEC

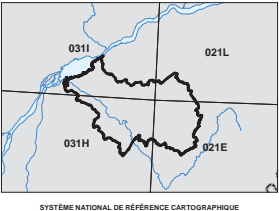
Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Méridian central 48.5
Système de référence géographique nord-américain, 1983

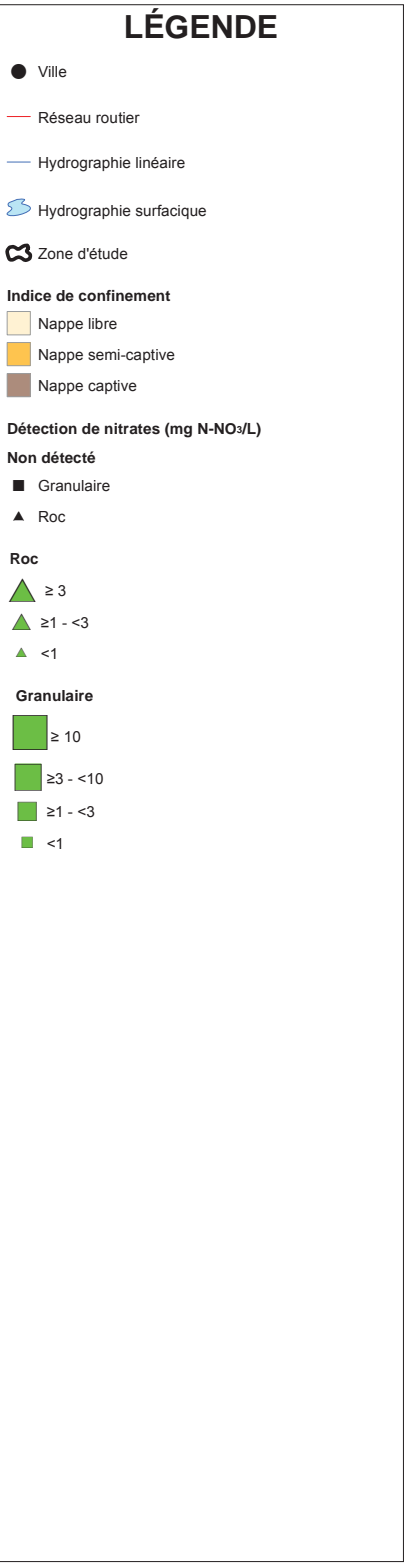
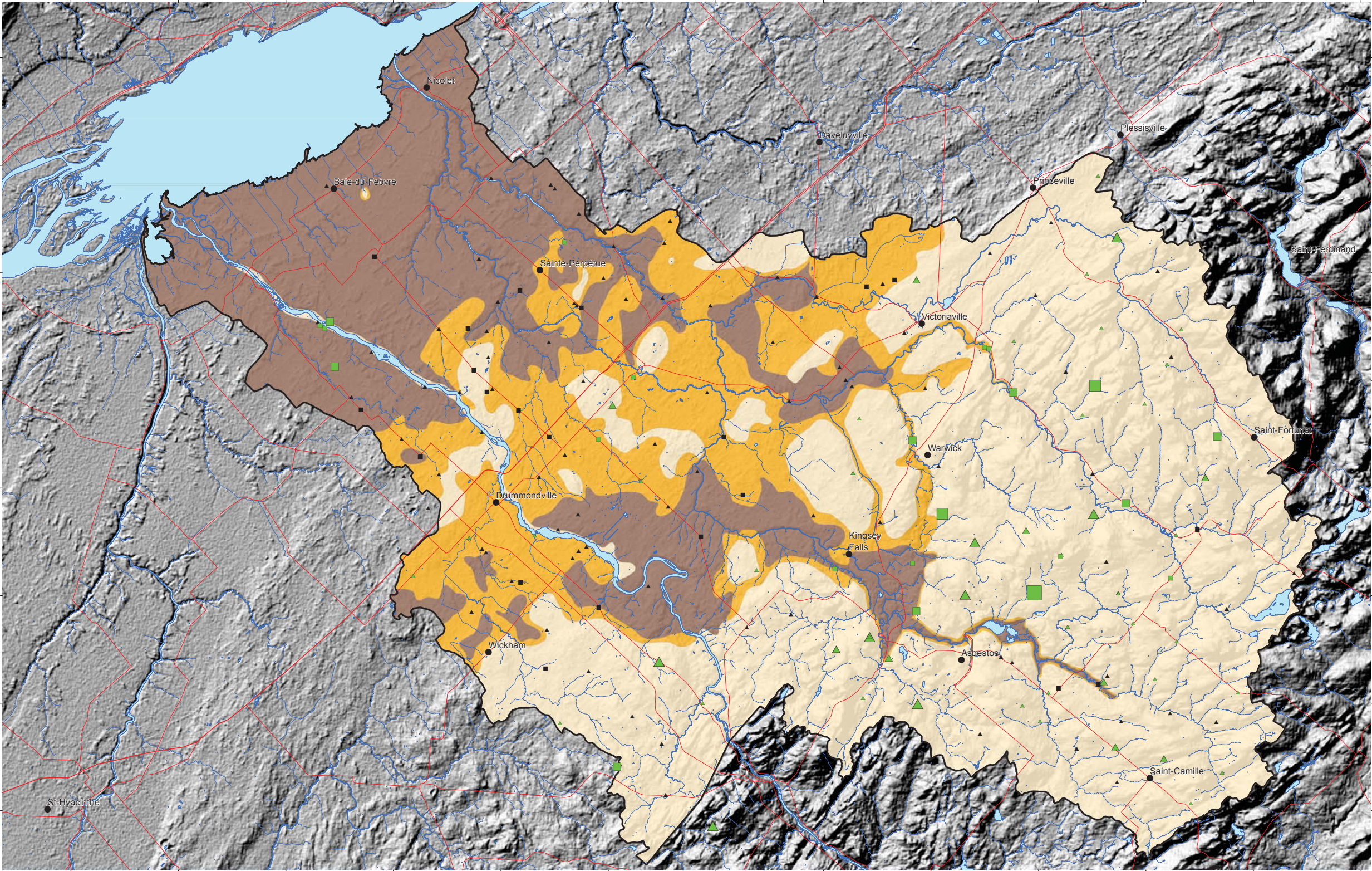
Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et 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 données requises pour définir les conditions locales 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'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.

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
 Réseau hydrographique: BDTQ 20K
 Réseau routier: BNDT 250K
 Fond de carte : Ombre MERN 20K
 Critères de qualité de l'eau potable : UQAM

Réalisation :
 Université du Québec à Montréal





MÉTADONNÉES
Section 7.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 30 Qualité de l'eau souterraine - Critères de potabilité Nitrates

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS

QUÉBEC



Projection cartographique conforme de Lambert de Québec

Système de référence géodésique nord-américain, 1983

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Critères de qualité de l'eau potable : UQAM

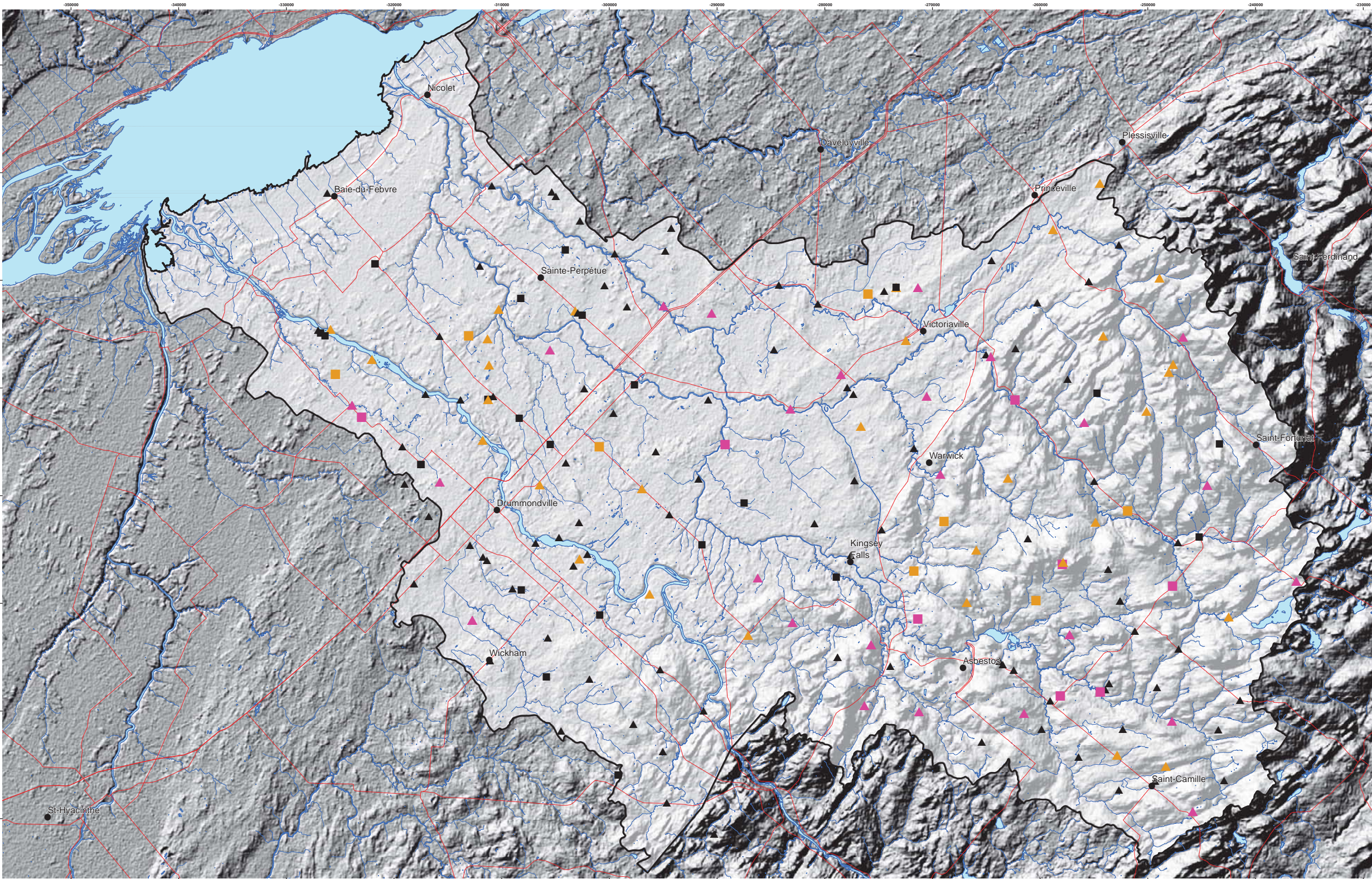
Réalisation :
Université du Québec à Montréal



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 données 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'attaché ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Barabach, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final, Rapport



LÉGENDE

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

Dépassements de la norme de qualité de l'eau potable - Bactériologie

- Granulaire - Aucun dépassement
- ▲ Roc - Aucun dépassement

Granulaire

- Non conforme
- Non potable

Roc

- ▲ Non conforme
- ▲ Non potable



MÉTADONNÉES
Section 7.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 31 Qualité de l'eau souterraine - Critères de potabilité Bactériologie

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS QUÉBEC

0 2 4 6 8 Kilomètres

Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Méridien central 48.2
Système de référence géographique nord-américain, 1983

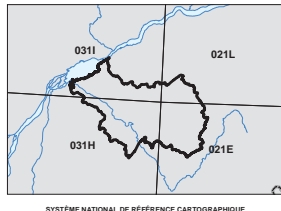
Cette carte est représentative des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional en découlant pourrait toutefois s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et 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 données requises pour évaluer les conditions réelles à l'écoulement ou à l'irrigation des données et des conditions présentées.

Les auteurs et leurs institutions ou organismes d'attaché 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 données présentées par la carte ou des données y étant rattachées.

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Critères de qualité de l'eau potable : UQAM

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



7.2.2 Objectifs esthétiques

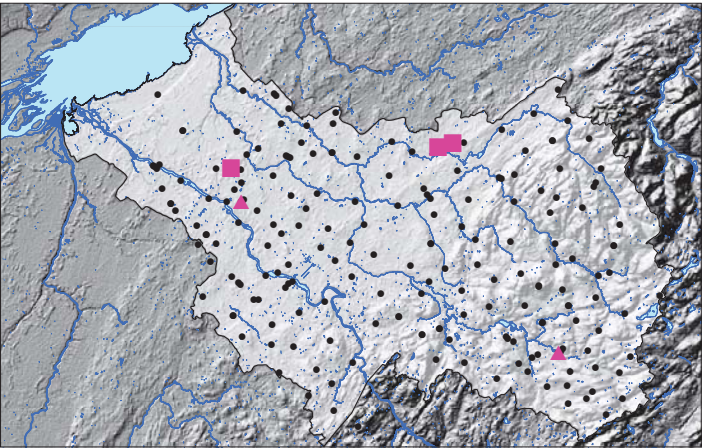
Les objectifs esthétiques ne font pas l'objet de normes puisqu'ils n'ont pas d'incidence sur la santé. Ils sont plutôt des recommandations remédier à des concentrations élevées peut améliorer le goût et l'apparence de l'eau, limiter la formation de bactéries dans l'eau et diminuer les dépôts dans la plomberie par exemple. Les dépassements d'objectifs esthétiques les plus souvent observés concernent le manganèse (94), la dureté totale (61), le fer (49), les matières dissoutes totales (46) et le pH (41) (**Tableau 33** et **Carte 32**). 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 a récemment été découvert (Bouchard et al. 2011). Il est 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 le sodium (14), l'aluminium (7), les sulfures (7), le chlore (6), et les sulfates (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 33 Sommaire des dépassements esthétiques*, **

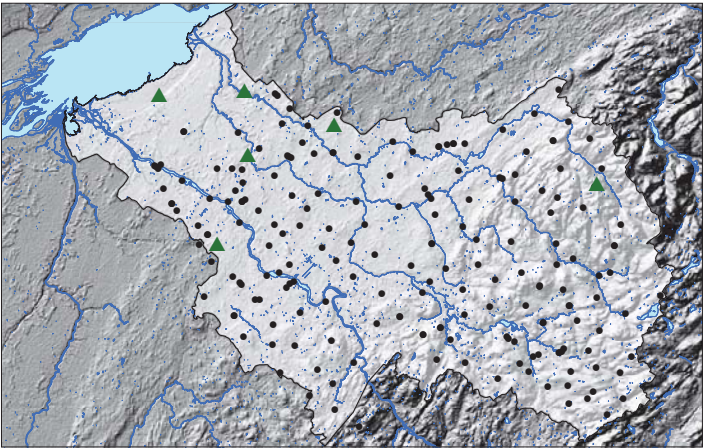
Paramètres	Nb	Statistiques (mg/L)				Objectifs esthétiques (mg/L)	Fréquence	Proportion (%)
		Min	Médiane	Max	Écart-type			
Aluminium (Al)	201	0	0	6,4	0,70	0,1	7	3%
Chlore (Cl)	201	0	10	11000	794,1	250	6	3%
Cuivre (Cu)	201	0	0	0,5	0,04	1	0	0%
Dureté totale (mg CaCO ₃ /l)	193	0	143,1	1490	186,0	200	61	32%
Fer (Fe)	201	0	0	31	3,5	0,3	49	24%
Matière dissoute totale (MDT)	193	33,3	352,7	18178	1394,3	500	46	24%
Manganèse (Mn)	201	0	0	5,9	0,631	0,05	94	47%
Sodium (Na)	201	0,4	16	6400	468,3	200	14	7%
pH	200	5,2	7,3	13	0,862	6.5 - 8.5	41	21%
Sulfate (SO ₄)	201	0	15	3600	254,6	500	1	0%
Sulfure (S, mg H ₂ S/l)	201	0	0	4,3	0,401	0,05	7	3%
T (°C)	201	7,2	10,2	21	1,8	15	6	3%
Zinc (Zn)	201	0	0	0,7	0,06	5	0	0%

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

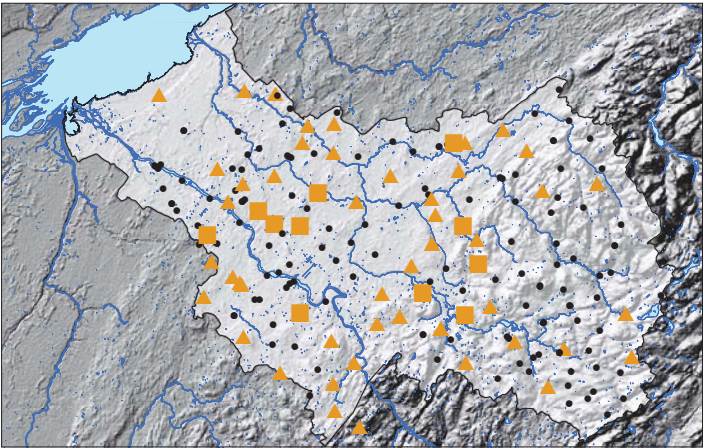
**Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada de Santé Canada (Santé Canada, 2014)



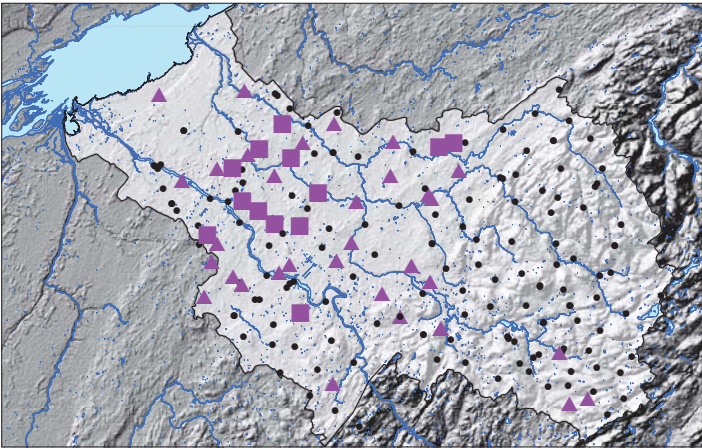
Dépassements de l'objectif *Aluminium*



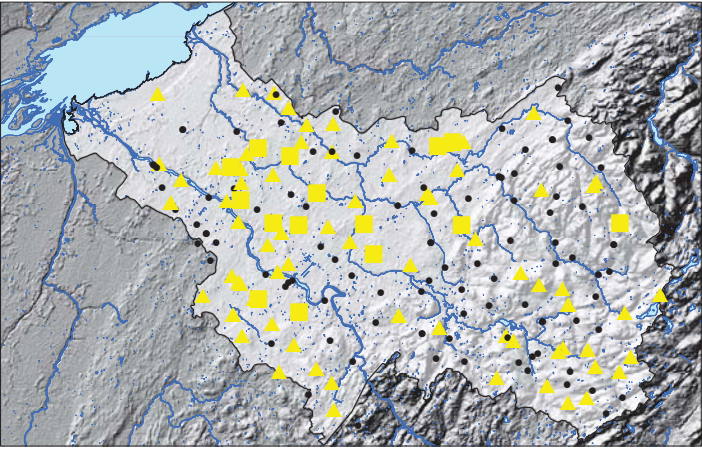
Dépassements de l'objectif *Chlorures*



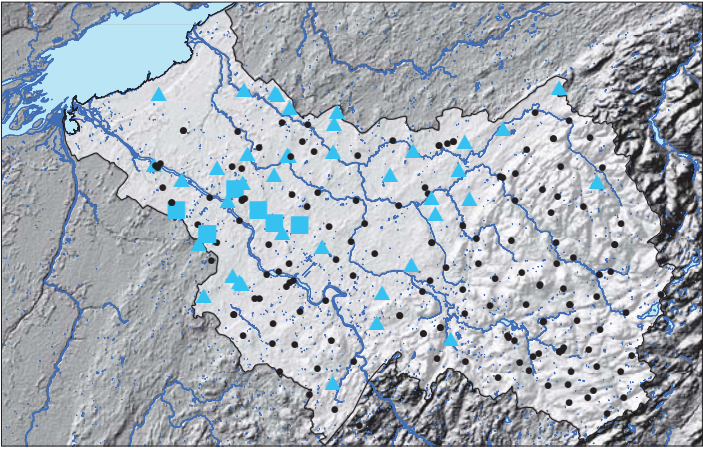
Dépassements de l'objectif *Dureté totale*



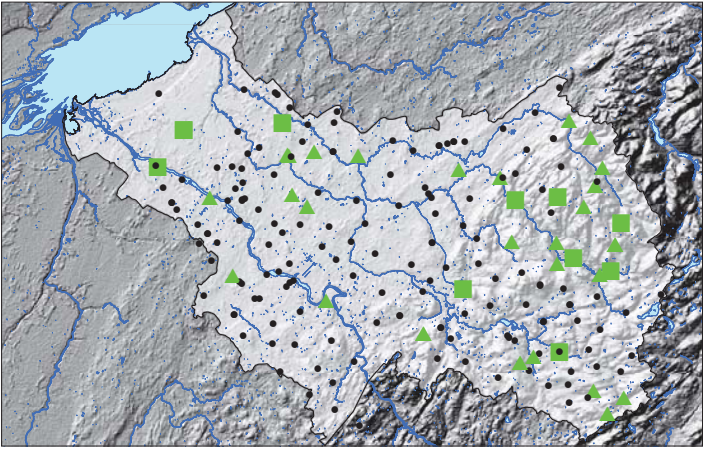
Dépassements de l'objectif *Fer*



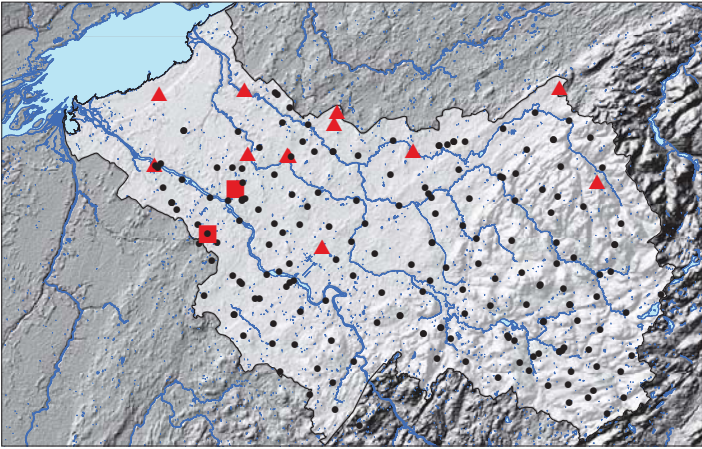
Dépassements de l'objectif *Manganèse*



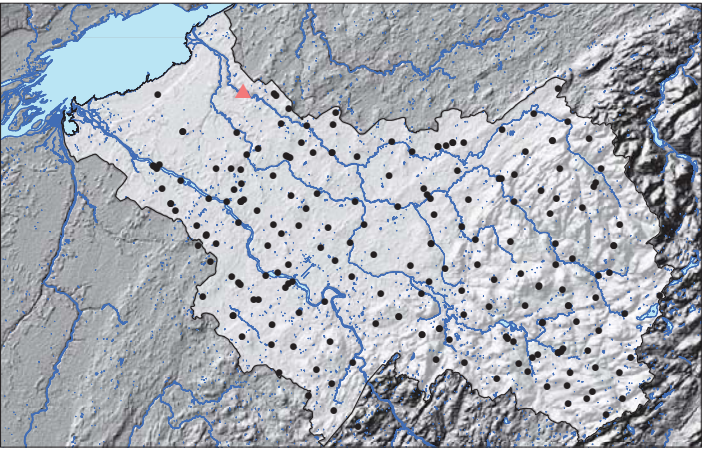
Dépassements de l'objectif *Matières dissoutes totales*



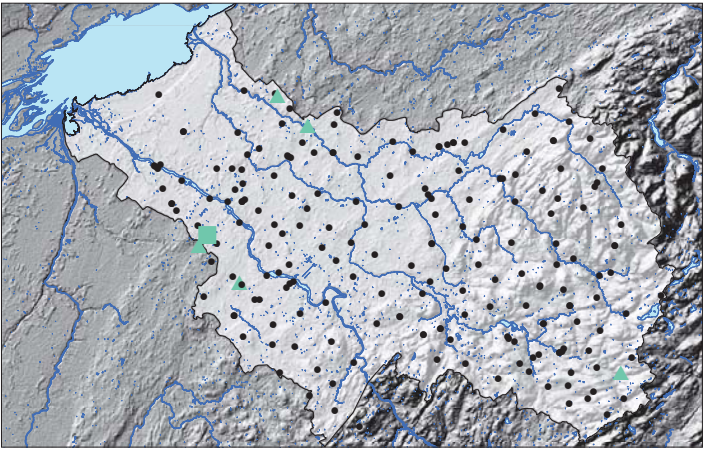
Dépassements de l'objectif *pH*



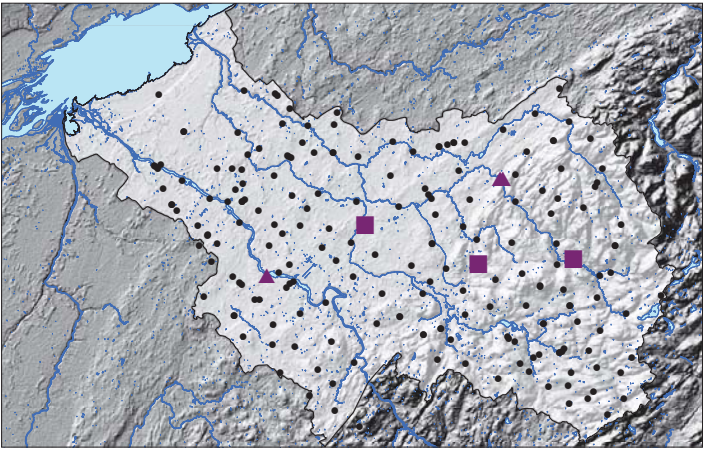
Dépassements de l'objectif *Sodium*



Dépassements de l'objectif *Sulfates*



Dépassements de l'objectif *Sulfures*



Dépassements de l'objectif *Température*

LÉGENDE

- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- Zone d'étude

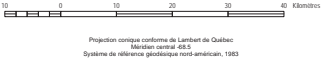
Dépassements des critères esthétiques

- Aucun dépassement
- Dépassement dans l'aquifère granulaire
- Dépassement dans l'aquifère fracturé



MÉTADONNÉES
Section 7.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 32 Qualité de l'eau souterraine - Critères esthétiques
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Objectifs esthétiques : 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 découpe 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'attaché 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 conseillée :
Larocque, M., Gagné, S., Benoit, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Couët, M. A. 2015. Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final, Rapport

7.2.3 Pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)

Les résultats des analyses concernant la campagne d'échantillonnage de 2013 (**Tableau 34** et **Carte 33**) indiquent la présence de pesticides dans cinq puits parmi les 147 échantillonnés (3%). Parmi les 16 composés organiques analysés, seulement trois ont été détectés (atrazine, métobromuron et simazine). Les PPSP ont été détectés dans 13 puits parmi les 67 analysés (19%). Les quatre composés les plus fréquemment détectés sont le naproxène, la caféine, l'ibuprofène et l'indométacine. Le naproxène et la caféine ont été détectés dans l'eau de 8 puits (12%). L'ibuprofène a été détecté à cinq reprises (7% des puits) et l'indométacine à 1 puits (1,2%). Les 33 nouveaux échantillons prélevés en 2014 présentent une augmentation des détections de pesticides et de PPSP par rapport aux échantillons de 2013. Les pesticides ont ainsi été détectés dans 26 puits (79%) tandis que les PPSP ont été détectés dans 29 puits (88%) (**Tableau 35** et **Carte 33**). La différence entre les résultats de 2013 et 2014 est vraisemblablement due à la précision de la méthode d'analyse qui a atteint des limites de détection de 4 ng/L et de quantification de 13 ng/L. Ces limites sont cinq fois plus faibles que celles obtenues lors des analyses de 2013 et ont permis la détection de 38 contaminants organiques issus des pesticides, dont les plus fréquents sont les fongicides trifloxistrobine (39% des puits) et pyraclostrobine (33% des puits) (

Tableau 36). Pour les PPSP (**Tableau 37**), six composés ont été détectés, soit plus fréquemment la caféine et l'acide méfénamique pour 88 et 30% des puits respectivement. La carbamazépine a été détectée à cinq reprises, soit à 15% des puits analysés. Toutes les concentrations sont de l'ordre du ng/L. La norme la plus restrictive étant celle pour l'atrazine (5 µg/L), aucun dépassement de norme n'a été observé. Tous les résultats concernant les six échantillons analysés au CEAQ sont en-dessous des limites de détection.

Tableau 34 Détections d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2013 - Résumé

	Pesticides	PPSP	Total avec détection	Échantillons pesticides	Échantillons PPSP	Pesticides (%)	PPSP (%)
Puits	5	13	16	147	67	3%	19%
Municipaux	2	6	8	17	13	12%	46%
Privés	3	1	5	123	47	2%	2%
PACES	0	6	6	7	7	0%	86%

Tableau 35 Détections d'au moins un composé de pesticides ou de PPSP en 2014 - Résumé

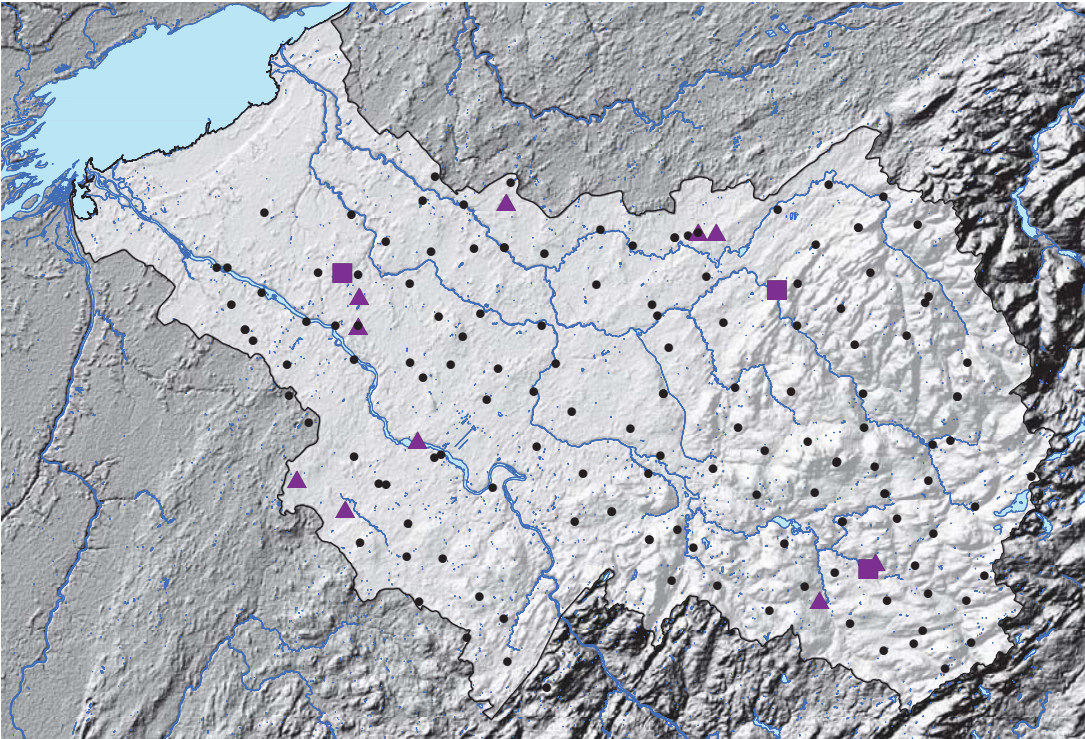
	Pesticides	PPSP	Total avec détection	Puits échantillonnés	Pesticides	PPSP	Total
Puits	26	29	30	33	79%	88%	91%
Municipaux	13	15	16	16	81%	94%	100%
PACES	13	14	14	18	72%	78%	78%

Tableau 36 Détection de pesticides en 2013 et 2014

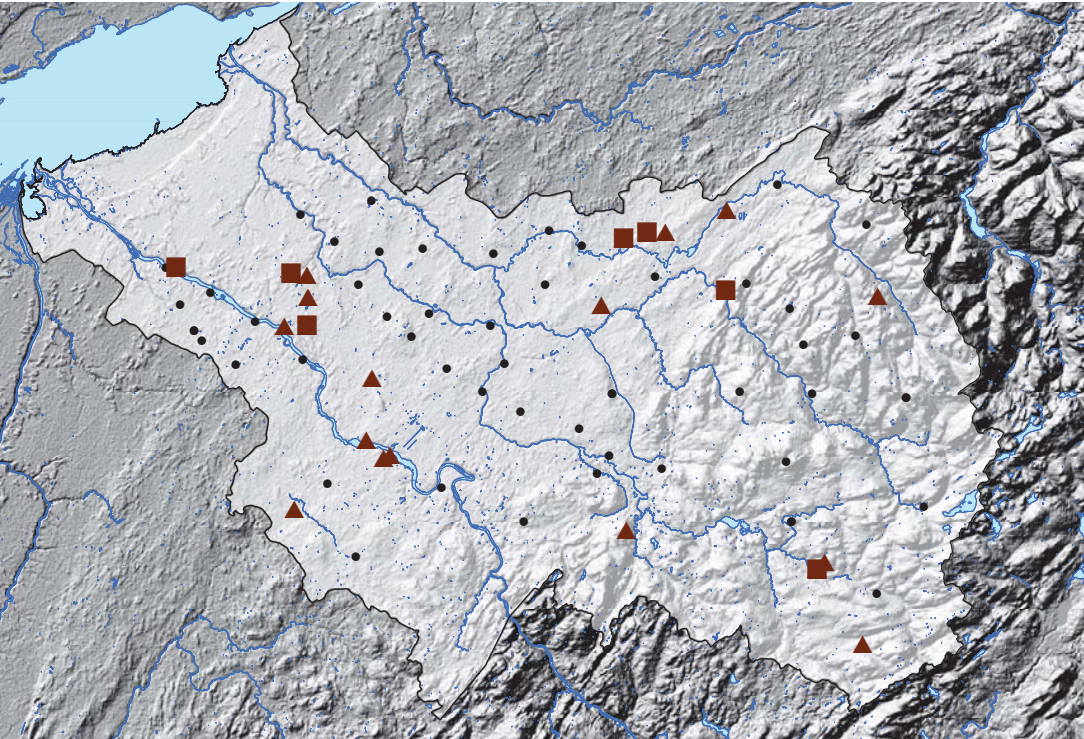
Campagne d'échantillonnage	2013 (n=147)				2014 (n=33)			
Pesticide	L.D.* (ng/L)	Min	Max	%	L.D.* (ng/L)	Min	Max	%
1-Naphthol	-	-	-		1	0	0	3%
Acétamipride	-	-	-		3	7	8	9%
Aldicarbe	-	-	-		0	0	0	0%
Aldicarbe-sulfone	-	-	-		1	18	18	3%
Atrazine	2	11	17	1%	8	52	55	24%
Azinphos-Methyl	-	-	-		1	0	0	3%
Bendiocarbe	-	-	-		2	6	6	6%
Boscalide	-	-	-		2	17	17	6%
Carbaryl	-	-	-		1	5	5	3%
Carbendazime	-	-	-		7	4	18	21%
Carbofuran	-	-	-		5	7	162	15%
Chlofenvinphos	-	-	-		8	15	45	24%
Chlorotoluron	0	0	0	0%	1	10	10	3%
Chlorpyrifos	-	-	-		3	12	28	9%
Chlotianidine	-	-	-		3	5	8	9%
Coumaphos	-	-	-		5	6	82	15%
Cyanazine	0	0	0	0%	1	11	11	3%
Diazinon	-	-	-		4	4	10	12%
Dimethoate	-	-	-		0	0	0	0%
Diuron	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Fludioxonil	-	-	-		0	0	0	0%
Hexazinone	0	0	0	0%	2	9	11	6%
Imazéthapyr	-	-	-		9	5	210	27%
Imidaclopride	-	-	-		2	11	11	6%
Isoproturon	0	0	0	0%	1	0	0	3%
Krésoxim Méthyl	-	-	-		9	4	53	27%
Linuron	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Malathion	-	-	-		1	12	12	3%
Métalochlore	0	0	0	0%	4	12	20	12%
Méthylbenzuron	5	18	61	3%	3	21	31	9%
Métobromuron	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Métoxuron	0	0	0	0%	2	0	0	6%
Monolinuron	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Parathion	-	-	-		2	0	0	6%
Pendiméthaline	-	-	-		7	8	18	21%
Piperonyl Butoxyde	-	-	-		8	9	28	24%
Perméthrine	-	-	-		2	35	48	6%
Phosmet	-	-	-		0	0	0	0%
Pyraclostrobine	-	-	-		11	14	207	33%
Pyriméthanil	-	-	-		7	3	30	21%
Sebutylazine	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Simazine	2	49	66	1%	7	2	21	21%
Spinosad A	-	-	-		2	41	41	6%
Terbutylazine	0	0	0	0%	3	2	5	9%
Thiabendazole	-	-	-		5	3	11	15%
Thiaclopride	-	-	-		1	29	29	3%
Trifloxistrobine	-	-	-		13	10	125	39%

Tableau 37 Détections de PPSP en 2013 et 2014 - Résumé

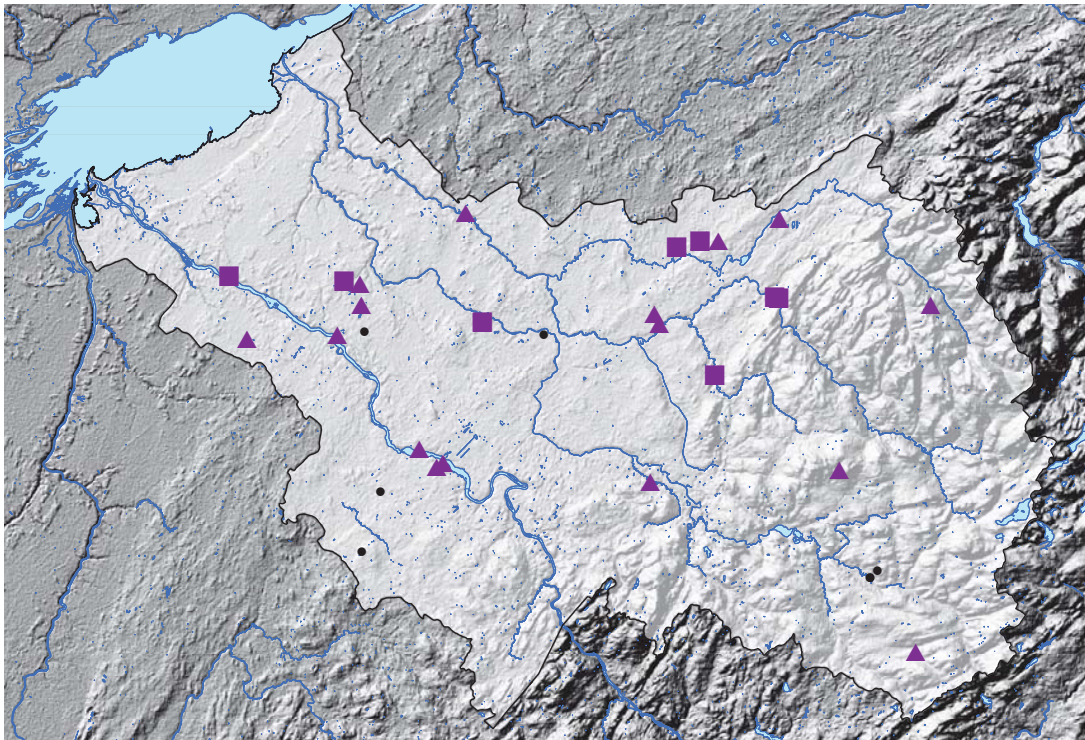
Campagne d'échantillonnage	2013 (n=67)				2014 (n=33)			
PPSP	Détections (ng/L)	Min	Max	%	Détections (ng/L)	Min	Max	%
Acetaminophène	0	0	0	0%	-	-	-	-
Acide Méfénamique	0	0	0	0%	10	6	33	30%
Amoxicilline	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Aténolol	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Benzafibrate	0	0	0	0%	3	7	116	9%
Caféine	8	11,5	240	12%	29	3	92	88%
Carbamazépine	0	0	0	0%	5	6	16	15%
Cyclophosphamide	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Diazepam	0	0	0	0%	-	-	-	-
Fénofibrate	0	0	0	0%	1	0	0	3%
Ibuprofène	5	56	121	7%	0	0	0	0%
Ifosphamide	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Indometacine	1	16	16	1%	0	0	0	0%
Ketoprofène	0	0	0	0%	0	0	0	0%
Naproxène	8	15,1	54	12%	0	0	0	0%
Trimethoprim	0	0	0	0%	3	18	20	9%



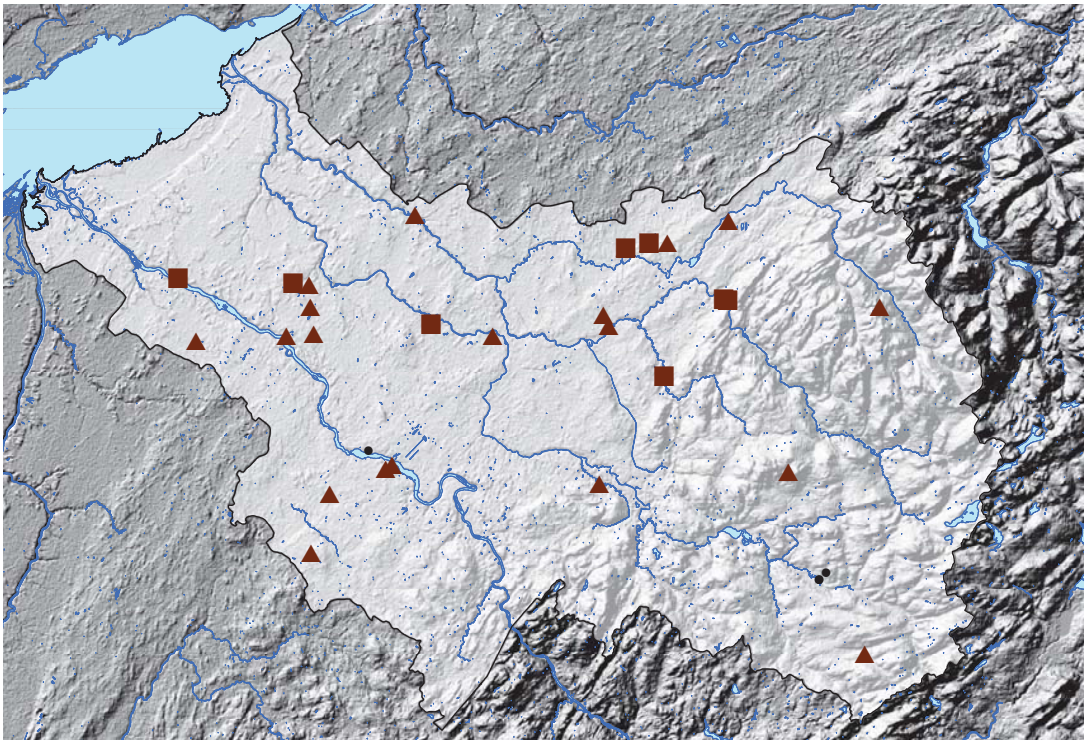
Détections de pesticides en 2013



Détections de PPSP en 2013



Détections de pesticides en 2014



Détections de PPSP en 2014

LÉGENDE

- Hydrographie linéaire
- Hydrographie surfacique
- Zone d'étude

Détection de pesticides et de produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)

- Aucune détection
- Détection - Granulaire
- ▲ Détection - Roc



CARTE DE LOCALISATION

MÉTADONNÉES

Section 7.2 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 33 Qualité de l'eau souterraine - Pesticides et
produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP)

ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC

5 0 5 10 15 20 Kilomètres

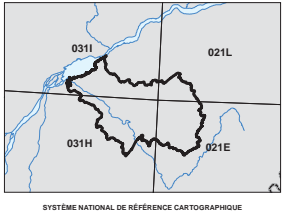
Projection cartographique conforme de Lambert de Québec
Métres carrelés 48,5
Système de référence géodésique Nord-américain, 1983

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 données 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'attache 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.

SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Critères de qualité de l'eau potable : UQAM

Réalisation :
Université du Québec à Montréal



SYSTÈME NATIONAL DE RÉFÉRENCE CARTOGRAPHIQUE

7.3 Densité des activités anthropiques

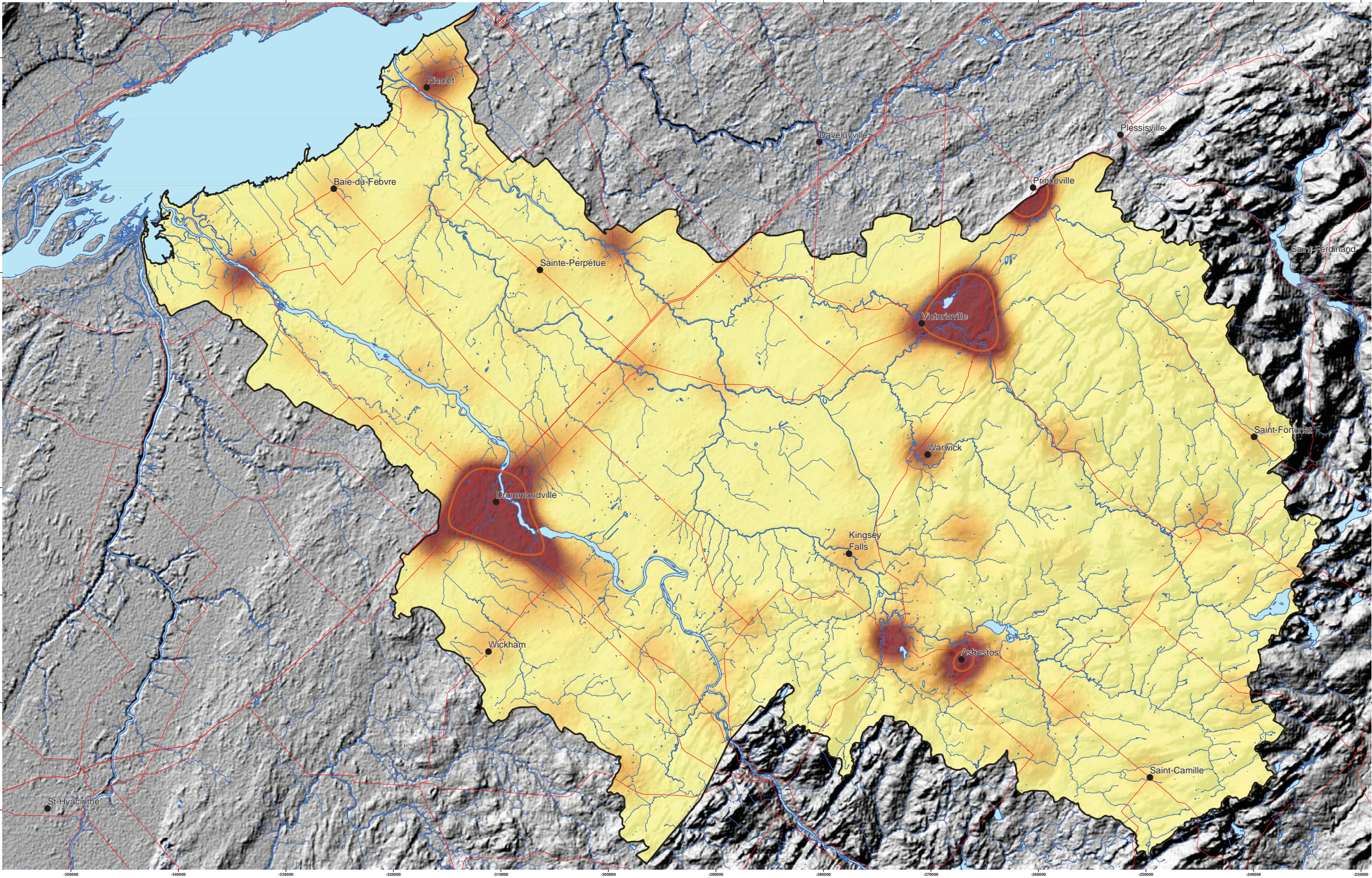
L'estimation de la densité des activités anthropiques sur la zone d'étude vise à évaluer l'impact potentiel des activités selon le risque appréhendé sur la qualité de la ressource en eau souterraine. Cet indice vise à fournir les tendances régionales de la pression des activités anthropiques sur l'eau 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 18**. 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 93 activités/km². Parmi les zones où l'indice de densité d'activités anthropiques est le plus élevé se trouvent les villes de Drummondville, Victoriaville, Asbestos, Danville, Nicolet et Princeville (**Carte 34**). 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 13 fermes/km². La plus grande densité d'activités agricoles se retrouve dans la portion aval de la zone d'étude, du fleuve Saint-Laurent jusqu'à l'axe formé par les villes de Drummondville et de Sainte-Perpétue (**Carte 35**). 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 présentent une densité d'activités agricoles plus faible. Il est important de rappeler que ces zones ont été identifiées comme vulnérables selon l'indice DRASTIC.



LÉGENDE

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

Pondération du risque (/km²)

Maximum : 93

Minimum : 0

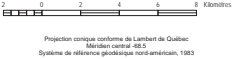
— Contour 75^e percentile



MÉTADONNÉES

Section 7.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

Carte 34 Densité des activités anthropiques
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

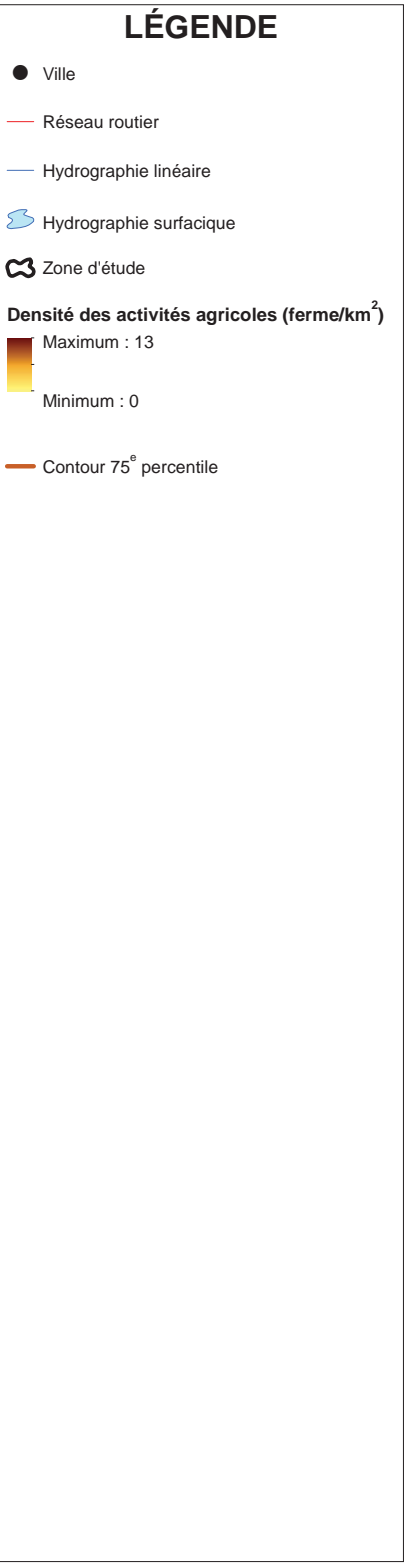
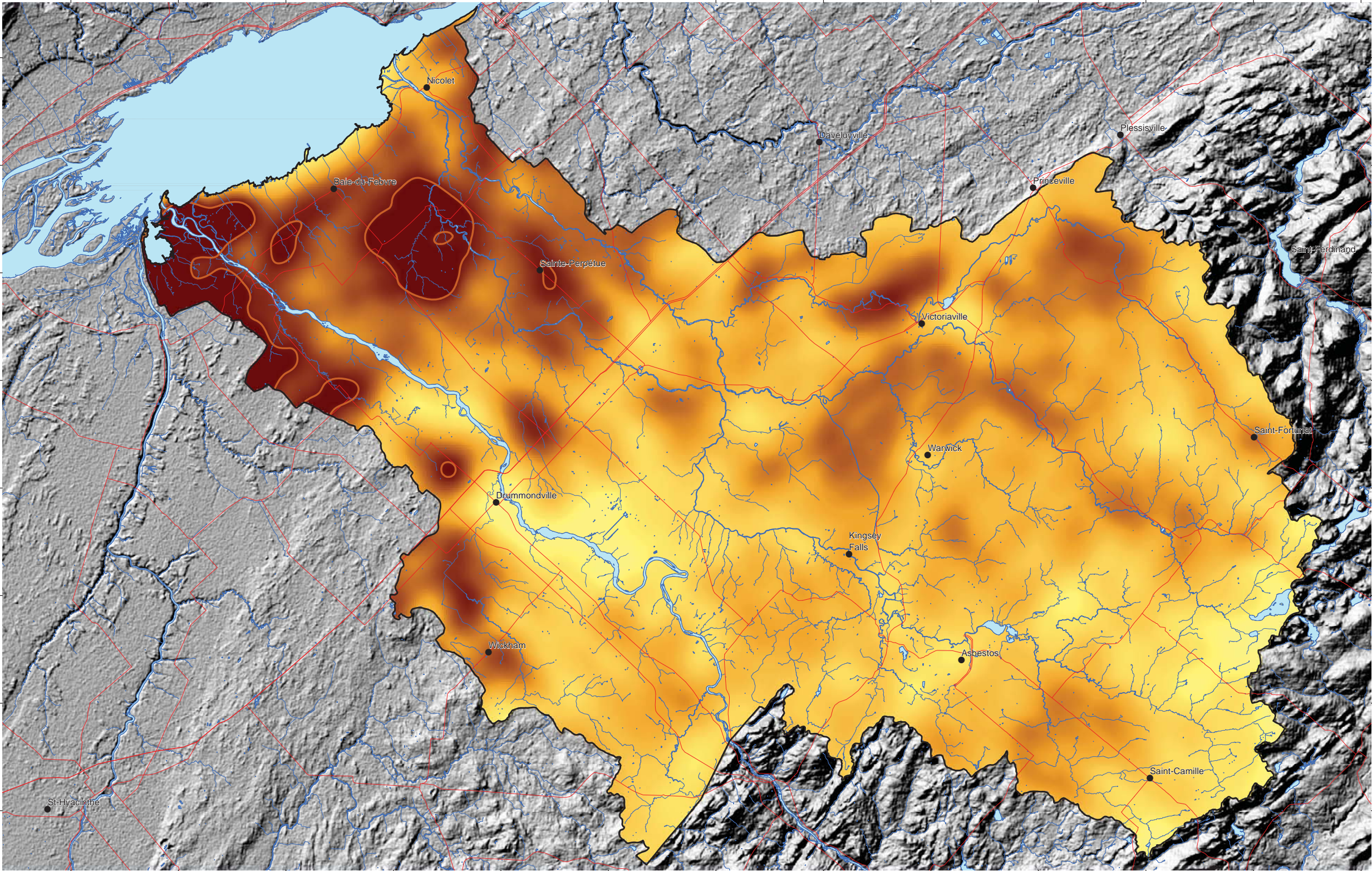
Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Densité des activités anthropiques : UQAM

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 données 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'attaché 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.

Notation bibliographique simplifiée.
Larocque, M., Gagné, S., Barthelet, D., Mayonnat, G., Gravelle, M. H., Ouellet, M. A. 2015. Projet de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MODELCC.



MÉTADONNÉES

Section 7.3 du Rapport final
(Larocque et al., 2015)

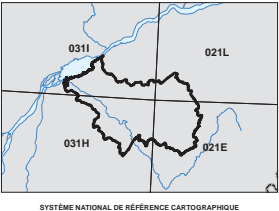
Carte 35 Densité des activités agricoles
ZONE NICOLET/ BAS SAINT-FRANÇOIS
QUÉBEC



SOURCES / RÉALISATION

Sources:
Réseau hydrographique: BDTQ 20K
Réseau routier: BNDT 250K
Fond de carte : Ombre MERN 20K
Densité des activités agricoles : 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 données 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'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité, ou quant à l'adoption 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.

Révision bibliographique consultée:
Larocque, M., Gagné, S., Barthelet, D., Meyconnat, G., Gravelle, M. H., Côté, M. A. 2015. Profil de connaissance des bassins versants de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François - Rapport final. Rapport présenté au MDECC.

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);
- Réduction de la recharge des eaux souterraines en conséquence de l'imperméabilisation des surfaces ou de la perte des superficies de milieux humides;
- Changements dans la dynamique de la recharge engendrée 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-Nicolet-Bas Saint-François 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 cadre de ce 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-Nicolet-Bas Saint-François, ce

qui témoigne de leur grand intérêt pour la question. Pour y parvenir, les intervenants locaux 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 à long terme.

Dans le cadre du projet de maîtrise de Tran Thi Kim Dung réalisé à l'Université de Sherbrooke, un outil cartographique d'intégration des données hydrogéologique a été réalisé (**Annexe 19**). Ce projet a permis de créer et de développer un système de cartographie dynamique multiéchelle en ligne sur la caractérisation des eaux souterraines. Cet outil permet aux gestionnaires d'utiliser les différentes cartes générées dans le cadre du projet et ce, à différentes échelles (bassin versant, sous bassin, MRC, municipalité, etc.). Il permet aussi de générer des statistiques selon la région d'intérêt. L'outil a été développé selon les besoins des gestionnaires du territoire afin de faciliter son utilisation pour les personnes n'ayant pas de connaissance en géomatique et par le fait même, faciliter l'intégration des données sur l'eau souterraine dans la planification du développement territorial.

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. Cependant, en raison de la présence de formations rocheuses peu productives et de la faible étendue des formations granulaires, certaines régions de la zone d'étude peuvent éprouver des difficultés à s'approvisionner, ou encore se voir contraintes à limiter les débits exploités. Les prélèvements actuels d'eau souterraine dans la région représentent 5 mm, soit 3% de la recharge annuelle. Néanmoins, justement parce que l'aquifère rocheux est peu productif, l'augmentation des débits pompés, qui pourrait résulter d'une intensification des activités agricoles ou industrielles, pourrait poser des contraintes sur les ressources en eau et entraîner des conflits d'usage. Selon les données disponibles, dans les conditions actuelles, il ne semble pas y avoir de problématique de quantité d'eau disponible dans les aquifères superficiels. La population étant stable (Institut de la statistique du Québec, 2014), il n'y a donc pas de pénurie d'eau à prévoir sur la zone d'étude.

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 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 aquatiques de la région.

Pour assurer le maintien des conditions actuelles qui sont 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. Les aquifères fracturés et granulaires de surfaces sont les plus susceptibles de subir l'impact de changements sur le territoire, il est donc important que les données générées par le projet soient intégrées dans la planification du développement régional.

Le Réseau du suivi des eaux souterraines du Québec mis en place par le MDDELCC 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-Nicolet-Bas Saint-François est certainement un atout pour la région. Toutefois, en raison des fluctuations intra et inter annuelles naturelles de la recharge, les données acquises par ces piézomètres ne seront pleinement utiles pour détecter des tendances (à la hausse ou à la baisse) des niveaux piézométriques 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. Il serait souhaitable que les stations existantes de mesure des débits en rivière soient maintenues à long terme.

Bien que de répartition inégale sur la zone d'étude, les aquifères granulaires fournissent les débits les plus importants. Ils permettent à certaines municipalités relativement éloignées des cours d'eau principaux, de fournir de l'eau potable à une population importante à moindre coût que l'eau de surface. Il est donc crucial d'accorder une attention particulière aux changements qui pourraient affecter le taux de recharges de ces secteurs.

En raison de leur rôle tampon, les 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 souvent à la recharge de l'aquifère au roc. Le nombre et l'état de perturbation des milieux humides sur la zone d'étude sont donc de 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. Les principaux dépassements de norme de potabilité, soit l'arsenic et le baryum, étaient déjà connus de la Direction de la santé publique. 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 toutefois pas représentative de l'ensemble du territoire en raison du 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 le critère pour la qualité de l'eau potable qu'à un seul endroit, les concentrations mesurées 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. Les pesticides, les produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPSP) et caféine sont présents dans l'eau souterraine de la zone d'étude, mais leurs concentrations sont près du seuil de détection et aucun dépassement de norme n'a été observé. Il n'y a donc pas de problématique reliée à ces composés. Cependant, leur détection dans l'eau souterraine indique que certains produits d'origine anthropique migrent rapidement des réseaux d'égouts municipaux et des fausses septiques/champs d'épuration vers l'eau souterraine. Leur détection confirme également la présence d'eau souterraine ayant séjourné relativement brièvement dans l'aquifère avant d'être pompée, ce qui est indicateur de problématiques possibles de contamination à court et moyen terme.

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 (cf. Bouchard et al., 2011), aucune indication ne permet de conclure que les concentrations en manganèse ne changent 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*

Les recommandations qui découlent des analyses présentées plus haut dans ce rapport sont présentées dans cette section. Ces recommandations ont comme objectif d'orienter les travaux hydrogéologiques futurs et de souligner les efforts à mettre en place afin d'améliorer les connaissances et assurer la pérennité de l'eau souterraine.

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 à l'échelle locale la caractérisation des aquifères de dépôts meubles qui ont été identifiés dans le projet de manière générale seulement. Par exemple, la continuité spatiale et en profondeur de l'esker Asbestos-Tingwick n'est pas bien détaillée, et sa dynamique hydrogéologique est peu définie. L'aquifère granulaire du secteur Saint-Perpétue/Sainte-Brigitte-des-Saults est lui aussi peu détaillé, malgré son potentiel aquifère important.
- Il est recommandé de poursuivre le suivi des niveaux piézométriques dans tous les nouveaux forages au roc. Il est également recommandé d'installer des piézomètres dans les plus importants aquifères granulaires. Ces suivis sont absolument nécessaires pour identifier des changements 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.
- Il est recommandé de planifier le développement urbain afin de limiter l'imperméabilisation des surfaces et le drainage dans le but de favoriser la recharge.

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. Celles-ci

correspondent souvent à des zones de recharge de l'aquifère au roc et elles sont en général très vulnérables.

- 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 mesurées et où des pesticides ont été détectés. Un suivi annuel de la qualité bactériologique est recommandé dans les secteurs où des dépassements ont été observés.
- Une étude sur le transfert des contaminants (nitrates, pesticides, produits de soins personnels) à l'échelle de toute la zone d'étude serait utile pour comprendre leur origine, leur migration et leur atténuation naturelle.

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.

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 collaboré pour réaliser la caractérisation des eaux souterraines de manière concertée et homogène dans différentes régions du Québec. Il en résulte une meilleure compréhension des aquifères locaux, une compréhension des ressources en eaux souterraines qui se dessine maintenant à l'échelle du territoire, des développements très significatifs au niveau des méthodes de caractérisation, la consolidation d'une synergie interuniversitaire sur la question des eaux souterraines, de même que la formation de plusieurs hydrogéologues qui trouveront rapidement leur place sur le marché du travail. Il est fortement recommandé de poursuivre le programme PACES pour réaliser la caractérisation des eaux souterraines dans les régions encore non étudiées.

Le transfert des connaissances a eu lieu tout au long du projet lors des rencontres du comité de suivis et lors d'une journée de formation en hydrogéologie pour les partenaires régionaux du Projet. Il se poursuivra à la fin du projet, avec le présent rapport et avec le transfert de toutes les données acquises. Le Portail de l'eau du MDDELCC sera un outil majeur pour faciliter le transfert des connaissances et la mise à disposition des données acquises. Le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) jouera un rôle déterminant dans le transfert des connaissances post-PACES. L'outil cartographique

développé dans le cadre du projet facilitera l'intégration des données hydrogéologiques dans la planification territoriale et l'appropriation des données par les acteurs régionaux.

8.2 Conclusions scientifiques

Le projet PACES-Nicolet-Bas Saint-François a permis de caractériser les eaux souterraines du bassin versant de la rivière Nicolet et de la partie basse de la rivière Saint-François. 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 partie basse de la rivière Saint-François et du bassin versant de la rivière Nicolet;

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 ces objectifs, de même que 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 Nicolet/Bas Saint-François est peu transmissif dans l'ensemble, même si certains secteurs ont été identifiés comme plus productifs, notamment dans la formation géologique de Bourret. Les formations superficielles granulaires sont d'étendue limitée, à l'exception de l'esker Asbestos-Tingwick et des sables présents sous l'argile dans la partie aval.

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. Mis à part des dépassements significatifs pour la bactériologie qui sont fortement liés à l'entretien

individuel du puits, peu de dépassements des normes pour la qualité de l'eau potable ont été identifiés. Parmi ceux-ci, des dépassements de 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 dépassements en arsenic sont surtout présents dans la partie centrale et liés à la roche aquifère. 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. La présence de PPSP (pesticides et produits pharmaceutiques et de soins personnels) et de caféine implique des sources anthropiques probablement liées aux systèmes d'eaux usées et aux pratiques agricoles.

Bilan hydrique de l'aquifère

Le bilan hydrique de l'aquifère fracturé montre que la recharge moyenne de l'aquifère représente 14% des précipitations tandis que le ruissellement représente 43% 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 3% de la recharge de l'aquifère fracturé. Une très faible proportion de la recharge (<1%) 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. En général, il est admis que l'exploitation de l'eau souterraine demeure durable tant qu'elle ne dépasse pas 10% de la recharge. Dans le cas présent, à l'échelle de la zone d'étude, il n'y aurait donc pas de stress majeur sur l'eau souterraine. Cependant, à une échelle plus locale, il est tout à fait possible que certains aquifères soient exploités à un taux supérieur à 10% de la recharge. Des études hydrogéologiques locales sont nécessaires pour évaluer cet aspect.

Vulnérabilité de l'aquifère

Les secteurs où l'aquifère du roc fracturé est le plus vulnérable sont localisés dans la portion amont de la zone d'étude, où la recharge est élevée et les dépôts meubles sont minces. Les dépassements du seuil anthropique pour les concentrations en nitrates dans ce secteur reflètent bien cette vulnérabilité. La partie centrale comporte des contrastes importants de la vulnérabilité de l'aquifère rocheux qui sont contrôlés par les dépôts argileux. Dans ce secteur également, les seuils anthropiques des concentrations en nitrates sont rencontrés aux endroits où la vulnérabilité est élevée. L'aquifère fracturé de la partie aval comporte une zone ayant une vulnérabilité faible. Les aquifères granulaires en condition de nappe libre de la zone d'étude sont toutes considérés comme étant vulnérables, tandis que les aquifères granulaires en condition de nappe captive sont peu vulnérables.

8.3 Conclusion générale

Les résultats présentés dans ce rapport sont le fruit de trois années de travail avec la collaboration logistique et financière de plusieurs partenaires de la région: les organismes de bassin versant COPERNIC et COGESAF, l'Agence de géomatique du Centre-du-Québec, les CRÉs du Centre-du-Québec, de l'Estrie et de Chaudière-Appalaches, les MRC d'Arthabaska, de Drummond, de l'Érable, du Haut-Saint-François, de Nicolet-Yamaska et de val Saint-François. Le projet a été réalisé au sein du Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) avec le financement et l'assistance technique du MDDELCC.

Le projet PACES-Nicolet-Bas Saint-François 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 du bassin versant de la rivière Nicolet et de la partie basse de la rivière Saint-François. 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

- Adamus, P. 2011. *Manual for the Wetland Ecosystem Services Protocol for the United States (WESPUS)*. Adamus Resource Assessment Inc., 57 p.
- Aller, L., T. Bennett, J. H. Lehr, R. Petty et G. Hackett. 1987. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. National Water Well Association, Dublin, OH., 20 p.
- Avramtchev, L. 1989. *Carte des gîtes minéraux des Appalaches*. DV 87-19. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
- Ba, S., L. Haroune, C. Cruz-Morató, C. Jacquet, I. E. Touahar, J.-P. Bellenger, C. Y. Legault, J. P. Jones et H. Cabana. 2014. Synthesis and characterization of combined cross-linked laccase and tyrosinase aggregates transforming acetaminophen as a model phenolic compound in wastewaters. *Science of The Total Environment*, 487: 748-755.
- Barnetche, D., M. Larocque, G. Meyzonnat et S. Gagné. 2015. *Spatially distributed recharge modelling with commonly available data - Application to the Centre-du-Québec region of southern Quebec (Canada)*. Réunion conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC, Montréal, du 3 au 7 mai 2015.
- BDCA. 2011. *Banque de données de cultures assurées* Financière agricole du Québec, Lévis.
- 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.
- Bourgault, M.-A. et M. Larocque. 2014. *Fonctions hydrogéologiques des tourbières de la vallée du Saint-Laurent : développement des connaissances et outils d'aide à la décision*. Colloque CSBQ, Montréal, du 10 au 12 décembre 2014.
- Bourgault, M.-A., M. Larocque et M. Garneau. 2015. *Fonctions hydrogéologiques des tourbières de la vallée du Saint-Laurent : développement des connaissances et outils d'aide à la décision*. Congès du GEOTOP, Orford, du 13 au 15 février 2015.
- Bourgault, M.-A., M. Larocque, M. Roux, G. Saint-Onge et M. Garneau. 2014. *Using a Multi Sensor Core Logger to investigate hydraulic conductivity, specific yield, bulk density and organic matter in six peatland complexes located in southern Quebec, Canada* Congrès de l'AGU de l'automne, San Francisco, du 15 au 19 décembre 2014.
- Bouwer, H. et R. Rice. 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12 (3): 423-428.

- Bradbury, K. R. et E. R. Rothschild. 1985. A COMPUTERIZED TECHNIQUE FOR ESTIMATING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF AQUIFERS FROM SPECIFIC CAPACITY DATA. *Ground Water*, 23 (2): 240-246.
- Burnett, W. C., R. N. 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 (3): 298-304.
- Cable, J. E., W. C. Burnett, J. P. Chanton et G. L. Weatherly. 1996. Estimating groundwater discharge into the north-eastern Gulf of Mexico using radon-222. *Earth and Planetary Science Letters*, 144: 591-604.
- Canards illimités Canada. 2006. *Plan régional de conservation des milieux humides et de leurs terres hautes adjacentes de la région administrative de la Chaudière-Appalaches*. 90 p.
- CEAEQ. 2014. «Méthodes d'analyse de substances pharmaceutiques». Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. En ligne. <http://www.ceaeg.gouv.qc.ca/methodes/chimie_org.htm#subs_pharma>.
- Chauvin, L. 1979. *Géologie des dépôts meubles - Région d'Asbestos-Disraëli: rapport préliminaire*. DPV-716. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction des levés géoscientifiques, Québec, 13 p.
- Clark, I. D. et P. Fritz. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Édité par.: CRC press, 352 p.
- Clark, T. H. et Y. Globensky. 1970. *Geology of the Bécancour area*. Department of Natural Resources, Quebec, 90 p.
- . 1973. *Région de Portneuf et parties de Saint-Raymond et de Lyster, comtés de Portneuf et de Lotbinière*. Rapport RG 148. SIGEOM, 110 p.
- . 1975. *Région de Grondines*. Rapport RG 154. SIGEOM, 159 p.
- . 1976. *Région de Bécancour et partie nord-est de la région d'Aston*. Rapport RG 165. SIGEOM, 66 p.
- Consultants HGE. 2003. *Forage d'un puits d'appoint à Notre-Dame-de-Ham*.
- Cook, P., G. Favreau, J. Dighton et S. Tickell. 2003. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. *Journal of Hydrology*, 277 (1): 74-88.
- Cook, P., S. Lamontagne, D. Berhane et J. Clark. 2006. Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers 222Rn and SF6. *Water Resources Research*, 42 (10).
- 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.

- Cooper, H. H. et C. E. Jacob. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions of the American Geophysical Union*, 27 (4): 526-534.
- Donat Bilodeau Expert-Conseil. 2006. *Étude hydrogéologique. Conformité des trois ouvrages de captage municipaux - Municipalité de Wickham*.
- Eckhardt, K. 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19 (2): 507-515.
- Ferland, O., M. Larocque et M. Lamothe. 2013. *Hydrostratigraphy and groundwater flow modeling in the Nicolet river and lower Saint-François river watershed (southern Quebec)*. Congrès GEO Montréal 2013 (AIH) 29 septembre au 3 octobre 2013. UQAM.
- , 2014. *Hydrostratigraphie et modélisation de l'écoulement souterrain dans trois contextes hydrogéologiques sur le bassin de la rivière Nicolet et du Haut-Saint-François*. Congrès de l'ACFAS 2014, colloque du RQES, du 12 au 16 mai 2014.
- Foratek International inc. 1987. *Résultats des essais détaillés pour l'exploitation des eaux souterraines en vue de combler les besoins en eau potable de la ville de Victoriaville*. Rapport n. 813. Dorval, 44 p.
- Fortin, V. et R. Turcotte. 2006. Le modèle hydrologique MOHYSE. *Note de cours pour SCA7420, Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal*, 23 p.
- Gadd, N. R. 1964. Moraines in the Appalachian region of Quebec. *Geological Society of America Bulletin*, 75: 1249-1254.
- , 1971. *Pleistocene geology of the St. Lawrence with selected passages from an unpublished manuscript: The St. Lawrence Lowlands, by J. W. Goldthwaith*. Memoir 359. Geological Survey of Canada, 153 p.
- Gagné, S., M. Larocque, D. Barnette et G. Meyzonnat. 2015. *Multi-observation calibration of a regional scale groundwater flow model*. Conférence conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC, Montréal, du 3 au 7 mai 2015.
- Gagné, S., M. Larocque, G. Meyzonnat et F. Barbecot. 2013. *Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François*. Congrès de l'ACFAS, colloque du RQES, 6 au 10 mai 2013, Québec.
- Gaucher, E. 1984. *Compilation de la géologie du Quaternaire - Région des Appalaches*. Rapport DV 84-10. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géoinformation, Québec.
- 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*. Édité par.: [Ministère de l'énergie et des ressources], Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Direction de la recherche géologique, Service de la géologie, p.
- Godbout, P. M., M. Lamothe, V. Horoi et O. Caron. 2011. *Synthèse stratigraphique, cartographie des dépôts quaternaires et modèle hydrostratigraphique régional, secteur de Bécancour, Québec: Rapport final*. Université du Québec à Montréal, à l'intention du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), 37 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*
U.S. Geological Survey Techniques and Methods variously p.
- Haroune, L., S. Saibi, J.-P. Bellenger et H. Cabana. 2014. Evaluation of the efficiency of *Trametes hirsuta* for the removal of multiple pharmaceutical compounds under low concentrations relevant to the environment. *Bioresource technology*, 171: 199-202.
- Hem, J. D. 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *US Geological Survey Water-Supply Paper 2254*.
- Hollocher, T. C. 1984. Source of the oxygen atoms of nitrate in the oxidation of nitrite by *Nitrobacter agilis* and evidence against a $P \cdot O \cdot N$ anhydride mechanism in oxidative phosphorylation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 233 (2): 721-727.
- Hubert, C. 1967. *Tectonics of Part of the Sillery Formation in the Chaudiere-Matapedia segment of the Quebec Appalachians* Special Publication of the Royal Society of Canada. 33-41 p.
- Hvorslev, M. J. 1951. *Time lag and soil permeability in ground-water observations*. Édité par.: U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 50 p.
- Laboratoire d'Expertise de Québec Ltée. 2007a. *Aires de protection Puits Saint-Albert et Dulac, Warwick (Québec)*. Expertise hydrogéologique, rapport no 2269-00-01. Québec, 34 p.
- . 2007b. *Aires de protection, Puits d'alimentation P-9 - Municipalité de Saint-Clothilde-de-Horton*. Expertise hydrogéologique, dossier no 2277-01. Québec, 21 p.
- Laforest Expert-Conseils inc. 2003. *Détermination des périmètres de protection autour des puits - Municipalité de Saint-Germain-de-Grantham*. Rapport technique. Cap-Rouge, 36 p.

- , 2007. *Détermination des aires d'alimentation et périmètres de protection des puits P-1 et P-2.*
- Laforest Nova Aqua. 2006. *Détermination des aires de protection - Municipalité de Saint-Cyrille-de-Wendover.* N/D: 05-5525-Q. Cap-Rouge, 29 p.
- , 2008. *Mesure de protection du puits de Dudswell.*
- Lamothe, M. 1985. *Lithostratigraphy and geochronology of the Quaternary deposits of the Pierreville and Saint-Pierre-les-Becquets areas, Quebec.* Ph. D., University of Western Ontario, London, 227 p.
- , 1989. A new framework for the Pleistocene stratigraphy of the Central St. Lawrence Lowland. *Géographie physique et Quaternaire*, 43 (2): 119-129.
- Lamothe, M., M. Parent et W. W. Shilts. 1992. Sangamonian and Early Wisconsinian events in the St. Lawrence Lowlands and Appalachians of Southern Quebec, Canada. In *Special Paper 270*, Éd. P. U. Clark et P. D. Lea. Geological Society of America, p. 171-184.
- Lamothe, M. et G. Saint-Jacques. 2014. *Géologie du Quaternaire des bassins versants des rivières Nicolet et Saint-François, Québec.* Rapport présenté au ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. Montréal, 31 p.
- Larocque, M., G. Meyzonnat et S. Gagné. 2013. *Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone Nicolet et de la partie basse de la zone Saint-François.* Rapport d'étape Phase I. Montréal, 72 p.
- Leaney, F. W. et A. L. Herczeg. 2006. A rapid field extraction method for determination of radon-222 in natural waters by liquid scintillation counting. *Limnology and Oceanography: Methods*, 4 (7): 254-259.
- LECO Corporation. 2007. *Carbon and Sulfur Determination.* LECO Induction Furnace Instruments., 48 p.
- Lefebvre, K., F. Barbecot, B. Ghaleb, M. Larocque et S. Gagné. 2013. Full range determination of 222 Rn at the watershed scale by liquid scintillation counting. *Applied Radiation and Isotopes*, 75: 71-76.
- MDDELCC (2012). Cartographie détaillée des milieux humides des Basses terres du Saint-Laurent et de la plaine du lac Saint-Jean - Structure physique des données. Projet de collaboration MDDEP et Canards Illimités Québec, Gouvernement du Québec
- Meyzonnat, G., D. Barnetche, M. Larocque, F. Barbecot, S. Gagné et H. Cabana. 2014a. *Apports des projets PACES sur la connaissance de la qualité et de la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine à l'échelle régionale. Exemple des zones de Bécancour et de Nicolet / Bas-Saint-François.* 29e Congrès de l'Est du Canada de Recherche sur la Qualité de l'Eau 2014, Montréal, 17 octobre 2014.

- Meyzonnat, G., D. Barnetche, M. Larocque, H. Cabana, M. Saby et S. Gagné. 2014b. *Portrait de la qualité de la ressource en eau souterraine sur les bassins versant de Bécancour et de Nicolet / Bas-Saint-François - Liens entre l'occurrence des contaminants et le contexte hydrogéologique*. Congès de l'ACFAS 2014, colloque du RQES 2014, du 12 au 16 mai 2014.
- Mission HGE inc. 2005. *Municipalité de Chesterville - Recherche en eau*. Rapport hydrogéologique N/Réf: 05325-101. Québec, 31 p.
- , 2006a. *Aires de protection autour de trois puits municipaux*. Rapport technique N/Réf.: 06337-101. Québec, 23 p.
- , 2006b. *Notre-Dame-du-Bon-Conseil, aire de protection autour des puits P-1, P-2 et P-3. Rapport Technique*.
- , 2006c. *Recherche en eau - Municipalité de Saint-Brigitte-des-Saults*. Rapport hydrogéologique N/Réf: 05339-101. Québec, 30 p.
- , 2007a. *Aires d'alimentation et de protection du puits municipal - Municipalité de Tingwick*. Rapport technique N/Réf.: 07351-101. Québec, 19 p.
- , 2007b. *Construction d'un puits d'alimentation en eau potable et d'un piézomètre - Municipalité de Saint-Léonard-d'Aston*. Rapport hydrogéologique N/Réf.:07251-101. Québec, 35 p.
- , 2007c. *Durham Sud, périmètres de protection*.
- Moreira, F., M. Larocque et P. D. L. 2015a. *Estimating groundwater inflows to small streams using ^{222}Rn and argon* Réunion conjointe de l'AGC-AGU-AMC-UGC, Montréal, du 3 au 7 mai 2015.
- Moreira, F., D. L. Pinti et M. Larocque. 2014. *Le ^{222}Rn dans les eaux souterraines pour déceler les échanges rivières-nappes*. Congrès du GÉOTOP, Pohénégammok, 14 au 16 mars 2014.
- , 2015b. *Le ^{222}Rn dans les eaux souterraines pour déceler les échanges rivières-nappes*. Congrès du GÉOTOP, Orford, 13 au 15 février 2015.
- Moriasi, D., J. Arnold, M. Van Liew, R. Bingner, R. Harmel et T. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. Asabe*, 50 (3): 885-900.
- Nash, J. et J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I— A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3): 282-290.
- Ontario Ministry of Natural Resources. 2013. *Ontario Wetland Evaluation System-Southern Manual*. 284 p.
- Paré, D. 1981a. *Étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Bécancour*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement. Québec, 80 p.

- , 1981b. *Étude hydrogéologique du bassin versant de la rivière Nicolet*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement. Québec, 114 p.
- Parent, M. 1987. *Late Pleistocene stratigraphy and events in the Asbestos-Valcourt region, Southeastern Quebec*. Ph. D., University of Western Ontario, London, Ontario.
- Perrier Experts-Conseils inc. 2008. *Analyse de conformité des puits de captage des eaux souterraines-Étude hydrogéologique*. Wotton.
- Pinti, D. L., S. Retailleau, D. Barnette, F. Moreira, A. M. Moritz, M. Larocque, Y. Gélinas, R. Lefebvre, J.-F. Hélie et A. Valadez. 2014. ²²²Rn activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: Relation with local geology and health hazard. , *Journal of environmental radioactivity*, 136: 206-217.
- 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 powerpoint pour les équipes PACES, 30 octobre 2012. Québec.
- Poirier, C., T.-C. Fortier Fillion, R. Turcotte et P. Lacombe. 2014. *Reconstitution historique des apports verticaux (eaux de fonte et de pluie) de 1900 à 2010 - version 2012*. Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, Québec, 99 p.
- Québec, G. d. 2015. *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection, chapitre Q-2, r. 35.2*.
- Reddy, R. K. et R. D. DeLaune. 2008. *Biogeochemistry of Wetlands*. Édité par.: CRC Press, 800 p.
- Richard, S. A., R. Chesnaux, A. Rouleau et R. H. Coupe. 2014. Estimating the reliability of aquifer transmissivity values obtained from specific capacity tests: examples from the Saguenay-Lac-Saint-Jean aquifers, Canada. *Hydrological Sciences Journal*, 38 p.
- Roux, M., M.-A. Bourgault et M. Larocque. 2015. *Hydraulic parameters of organic deposits from seven peatlands in southern Quebec, Canada*. Congrès du GEOTOP, Orford, du 13 au 15 février 2015.
- Saby, M. 2015. *Caractérisation de la qualité naturelle des eaux souterraines de la zone Nicolet-Saint-François, Québec, Canada : étude des temps de séjours et liens avec la géologie*. Maîtrise, Département des Sciences de la terre et de l'atmosphère, Université de Québec à Montréal, Montréal.
- Saby, M., M. Larocque, D. L. Pinti et F. Barbecot. 2014. *Caractérisation hydrogéochimique et isotopique des eaux souterraines dans la région Centre-du-Québec*. Congrès du GEOTOP, du 16 au 16 mars 2014.

- Saby, M., M. Larocque, D. L. Pinti, F. Barbecot, Y. Sano et Castro M. C. 2015. Linking groundwater quality to residence times and regional geology in southern Quebec, Canada. *soumis à Applied Geochemistry*.
- Saint-Julien, P. et C. Hubert. 1975. Evolution of the Taconian Orogen in the Quebec Appalachians. In *Tectonics and Mountain Ranges*, Éd. Rodgers Volume. American Journal of Science, p. 337-362.
- Santé Canada. 2014. «Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire». En ligne. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/index-fra.php>.
- 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 Environ Health Studies*, 43 (4): 387-400.
- SIGEOM (2014). Système d'information géomorphe du Québec. M. d. r. naturelles
- Simard, G. et R. Desrosiers. 1979. *Qualité des eaux souterraines du Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles. Québec, 171 p.
- Slivitzky, A. et P. Saint-Julien. 1987. *Compilation géologique de la région de l'Estrie-Beauce*. Rapport géologique MM-85-04. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
- Stellato, L., E. Petrella, F. Terrasi, P. Belloni, M. Belli et U. Sansone. 2007. Interactions between river and groundwater in an alluvial aquifer in Central Italy assessed by means of classic hydrogeological methods and natural tracers (222 Rn and water chemistry). *Advances in Isotope Hydrology and its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS—2007)*: 213.
- Tek Eau inc. 1980. *Étude hydrogéologique préliminaire à Saint-Martyre Canadien*. 8 p.
- Theis, C. V. 1940. The source of water derived from wells. *Civil Engineering*, 10 (5): 277-280.
- Vautour, G., Pinti D. L., Saby M., Mejean P., Meyzonant G., Larocque M., Castro M.C., Barbecot F., Hall C., Boucher C., Roulleau E., Takahata N. et Sano Y. 2015. Helium, tritium and 14C evidence for fossil meltwater in the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada. *soumis à Chemical Geology*.
- Verstraeten, W. W., B. Muys, J. Feyen, F. Veroustraete, M. Minnaert, L. Meiresonne et A. De Schrijver. 2005. Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9 (3): 225-241.

- Warren, B. et M. Bouchard. 1976. *Carte des dépôts meubles: Drummondville (31H/16)*. DPV-437. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des mines, Québec.
- Weiss, R. F. 1968. Piggyback sampler for dissolved gas studies on sealed water samples. *Deep Sea Research*, 15: 721-735.