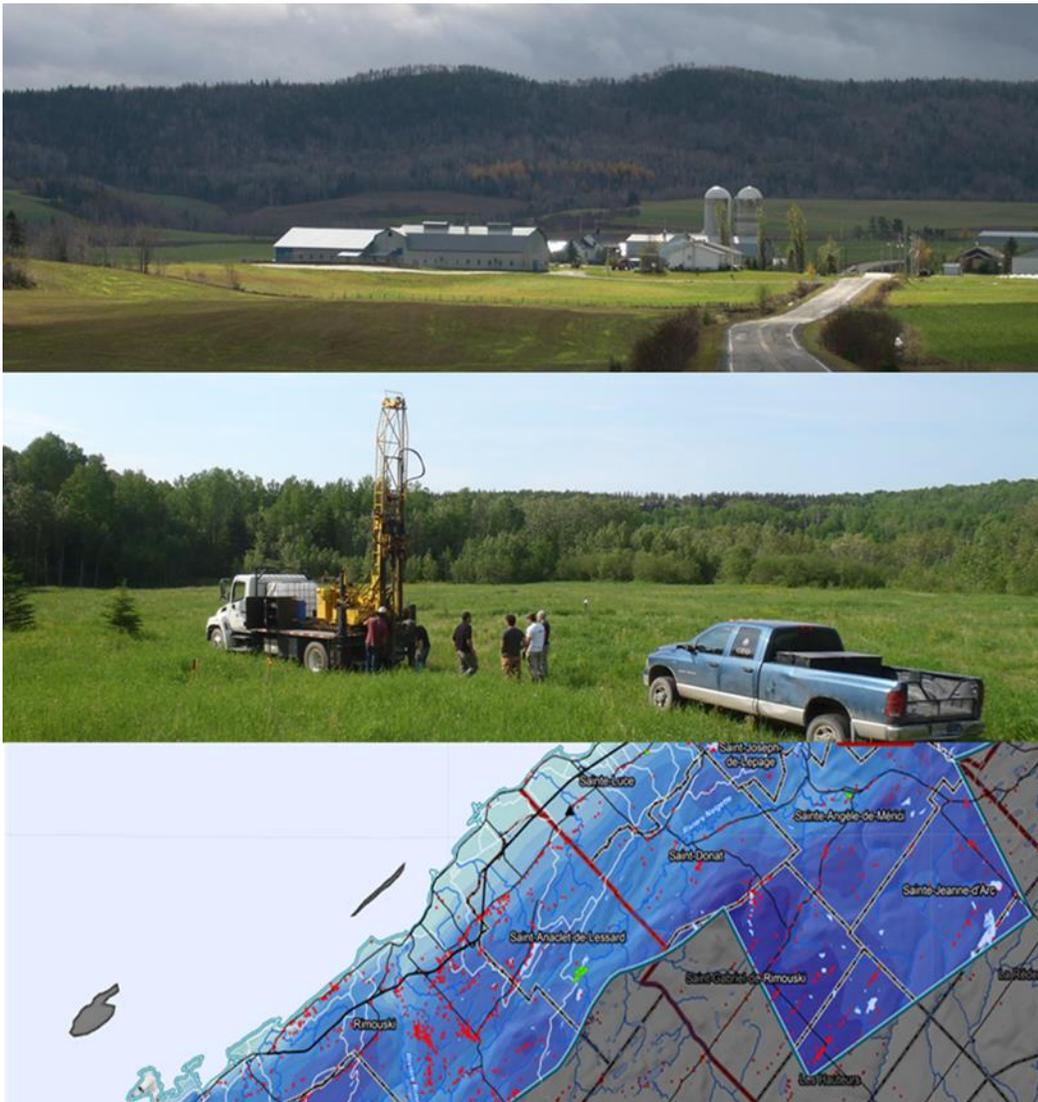


Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) Rapport final



31 MARS 2015

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Thomas Buffin-Bélanger (co-coordonnateur - professeur-chercheur, UQAR)
Gwénaëlle Chaillou (co-coordonnatrice - professeure-chercheure, UQAR)
Claude-André Cloutier (M.Sc. chargé de projet, UQAR)
Maud Touchette (M.Sc. chargée de projet, UQAR)
Marie-Andrée Roy (technicienne en géomatique, UQAR)
Bernard Héту, professeur (professeur-chercheur, UQAR)
Nathalie Lewis, professeure (professeure-chercheure, UQAR)

Collaborateurs

Renald McCormack (Envir'eau Puits)
Jean Veillette (CGC)

Assistants

Nancy Martel (étudiante bacc. UQAR)
Sophie Delormes (étudiante bacc. UQAR)
Catherine Tremblay (étudiante M.Sc. UQAR)
Marise Bélanger (étudiante DESS UQAR)
Éric Fillion (étudiant M.Sc. UQAR)
Mathilde Gauthier –Pinsonneault (étudiante bacc. UQAR)
Mélodie Denis (étudiante bacc. UQAR)
Simon Claveau (étudiant bacc. UQAR)
Gwendoline Tomi-Morin (étudiante bacc. UQAR)
Laurent Gosselin (étudiant bacc. UQAR)
Tarik Toubal (Assistant de recherche, UQAR)
Giulia Mutti (étudiante M.Sc. UQAR)
Jérôme Dubé (Auxiliaire de recherche et d'enseignement, UQAR)
Wilbène Cenatus (stagiaire Katimavik)
Fatah Messaoudene (stagiaire Katimavik)

Référence à citer

Buffin-Bélanger, T., Chaillou, G., Cloutier, C-A., Touchette, M., Héту, B. et McCormack, R. 2015. Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) : Rapport final. 199p.

Université du Québec à Rimouski
Département de biologie, chimie et géographie
300, allée des Ursulines
Rimouski, QC
G5L 3A1
Téléphone : 418 723-1986

The logo for the Université du Québec à Rimouski (UQAR) is displayed in a large, bold, blue font. The letters 'U', 'Q', and 'A' are connected, and the 'R' is separate. The 'U' and 'Q' have a slight shadow effect.

PARTENAIRES

Partenaires académiques



Gestionnaires du territoire



Organismes à but non lucratif



Partenaires ministériels



Partenaires privés



RÉSUMÉ

Le Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) s'inscrit dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) développé par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) afin de produire la cartographie hydrogéologique du Québec municipalisé. Le PACES-NEBSL a été réalisé par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) en collaboration avec la CRÉ Bas-Saint-Laurent et les quatre MRC incluses dans le territoire ciblé. Le projet a compté également sur un appui et une implication significative de l'Organisme des bassins versants du nord-est du Bas-Saint-Laurent (OBVNEBSL), du Conseil régional en environnement du Bas-Saint-Laurent (CREBSL) et du comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire (ZIPSE). Pour renforcer son expertise en hydrogéologie, l'UQAR a travaillé en collaboration avec l'INRS-ETE ainsi qu'avec la firme de consultants en hydrogéologie Envir'eau Puits. Finalement, l'UQAR a participé aux efforts de concertation avec les autres projets régionaux en cours de réalisation au sein du Groupe Interuniversitaire sur les Eaux Souterraines (GRIES) et du Réseau Québécois sur les Eaux Souterraines (RQES).

La troisième phase du PACES-NEBSL s'est déroulée entre avril 2014 et mars 2015 et s'est concentrée sur :

- la finalisation des travaux de terrain durant l'été 2014 pour compléter ceux de l'année 2013 (forages dans le socle rocheux avec le Réseau de suivi sur les changements climatiques du MDDELCC, forages dans les dépôts meubles avec l'INRS, échantillonnage d'eau souterraine, installation et instrumentation de piézomètres, suivi hydrologique des cours d'eau);
- la consolidation des liens avec nos partenaires régionaux via l'organisation de rencontres et des présentations d'information (AGA OBV Matapédia-Restigouche, AGA de l'OBVNEBSL, présentations Roxane Lavoie et de Renald McCormack à l'UQAR);
- la production des livrables finaux.

La réalisation du *Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines* dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent, aura permis de compléter et d'uniformiser les connaissances sur les eaux souterraines de la région. Ces connaissances se traduisent par des documents écrits et cartographiques ainsi qu'une base de données régionale. Les données acquises au cours des trois années du projet serviront à une gestion pérenne des eaux souterraines dans la région du nord-est du Bas-Saint-Laurent.

REMERCIEMENTS

Le rapport est issu d'une collaboration étroite et multiple entre plusieurs partenaires dans la région et dans les ministères. Il est aussi issu d'un travail rigoureux et continu d'une équipe d'agents de recherche et d'étudiants. Nous prenons ici le temps de souligner les contributions de tous et chacun.

L'équipe du PACES-NEBSL tient à remercier le Ministère du Développement Durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) sans lequel ce projet n'aurait pas vu le jour. Nous aimerions remercier plus spécifiquement Diane Mirand, Édith Bourque, Normand Bouliane et Michel Ouellet pour les rétroactions et orientations fournies tout au long de la réalisation du projet.

L'équipe désire remercier la Conférence régionale des éluEs du Bas-Saint-Laurent (CRÉ) pour la contribution financière au projet, mais aussi pour le support et l'engagement lors du développement et de la mise en place du projet et pendant toutes les phases de sa réalisation. Nous tenons aussi à souligner le soutien et la collaboration de tous nos partenaires locaux lors du développement initial, ainsi que tout au long des trois années de la durée du projet : CRÉ, Organisme de Bassins Versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent (OBVNEBSL), Comité Zip du Sud de l'Estuaire (ZIPSE), Conseil régional de l'environnement (CREBSL), les Municipalités régionales de comté (MRC), particulièrement les aménagistes : Benoit Rheault, François Loiselle, Paul Gingras et Olivier Banville et l'Université du Québec à Rimouski (UQAR).

Merci aux organismes qui ont consenti aux partages des données et des connaissances nécessaires à la réalisation du projet : les Ministères des Transports (MTQ), des Ressources Naturelles (MRN), de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), des Affaires Municipales et Occupation du Territoire (MAMOT), les MRC et les municipalités participantes qui nous ont donné accès aux rapports sur les puits municipaux et aux données de consommations d'eau de leur municipalité, et parfois à leur terrain pour la réalisation des forages, l'Institut de Recherche et Développement en Agroenvironnement (IRDA) qui a fourni des données sur la pédologie de la région et à Charles Poirier du Centre d'expertise Hydrique (CEHQ) pour les apports verticaux. Merci aussi aux citoyens du nord-est du Bas-Saint-Laurent qui nous ont donné accès à leurs puits lors de la campagne d'échantillonnage d'eau et à leur terrain pour l'installation de piézomètres et des collecteurs d'eau.

Nous remercions Jean Veillette, chercheur émérite à la Commission géologique du Canada pour la production de la carte du Quatenaire. L'équipe tient à remercier particulièrement Renald McCormack et Simon Huard de la firme Envir'eau Puits pour toutes leurs connaissances, leur support donné au projet lors de ces trois dernières années et leur aide dans la compréhension de l'hydrogéologie. Nous remercions aussi Harold Vigneault de l'INRS pour son soutien technique

au début de la création de la base de données et dans la tentative d'utilisation de HELP, et Roxane Lavoie pour la conférence donnée à nos partenaires sur l'outil ATES. Nous remercions finalement René Lefebvre de l'INRS qui a semé l'idée du projet PACES-NEBSL et qui l'a encouragé et supporté depuis les débuts du projet.

Nous tenons à remercier tous les étudiants, stagiaires, techniciens et professionnels qui ont participé aux campagnes de terrain, à la cueillette des données et aux analyses géochimiques : Sophie Delorme, Simon Claveau, Laurent Gosselin, Nancy Martel, Catherine Tremblay, Éric Fillion, Giulia Mutti, Denys Dubuc, Marise Bélanger, Gwendoline Tommi-Morin, Judith Savoie, Mathilde Gauthier-Pinsonneault, Mélodie Denis, Frédérique Lemay-Borduas, Wilbène Cenatus et Fatah Messaoudene, Mireille McGrath-Pompon, Tarik Toubal et Sylvio Demers.

Un merci particulier à Marie-Andrée Roy technicienne en géomatique de l'UQAR qui nous a supportés pour la création non seulement de la base de données, mais aussi des formulaires de saisie affiliés à celle-ci. Nous la remercions aussi pour tout son travail sur la réalisation des livrables sous format cartographiques et pour son soutien technique tout au long du projet. Nous tenons aussi à remercier Jérôme Dubé, auxiliaire de recherche en d'enseignement à l'UQAR pour son soutien technique, ses connaissances générales et bibliographiques du territoire et ses réflexions sur le territoire. Merci aussi à Kati Brown, cartothécaire de l'UQAR, pour la gestion des données cartographiques et la gestion de l'acquisition des données LIDAR.

Finalement, l'équipe du PACES tient à remercier Nancy Pouliot, technicienne en recherche au service des finances et des approvisionnements de l'UQAR et Guillaume Werstink, agent à la valorisation de la recherche et liaison entreprise-université au Bureau du doyen des études de cycles supérieurs et de la recherche de l'UQAR pour la gestion des affaires administratives et financières du projet. Thomas Buffin-Bélanger et Gwénaëlle Chaillou tiennent à remercier particulièrement Frédéric Deschenaux, Doyen des études de cycles supérieurs et de la recherche de l'UQAR et Francois Deschênes, Vice-Recteur à la formation et à la recherche, pour leurs aides et soutiens dès les prémices du projet et durant toutes les phases de réalisation du PACES-NEBSL.

Sur une note plus personnelle, Thomas Buffin-Bélanger et Gwénaëlle Chaillou tiennent à souligner le travail exceptionnel de toute l'équipe du PACES-NEBSL de l'UQAR qui durant ces trois dernières années a rythmé nos vies professionnelles. Nous tenons à remercier Maud Touchette et Claude-André Cloutier sans qui le projet n'aurait pu être réalisé. « Tout grand progrès scientifique est né d'une nouvelle audace de l'imagination. » (John Dewey) : il nous fallait de l'audace pour nous lancer dans un tel projet, mais avec votre dynamisme et votre professionnalisme nous étions confiants de relever les défis, de résoudre les embuches et de stimuler la réflexion pour mener à bien le projet.

TABLE DES MATIERES

Résumé	v
Remerciements.....	vi
Liste des figures	xi
Liste des tableaux.....	xiv
1. Introduction.....	1
1.1 Contexte de réalisation du projet PACES-NEBSL du projet	1
1.2 Objectifs du projet	1
1.3 Équipe de réalisation et partenaires	2
2. Présentation du territoire à l'étude	4
2.1 Localisation	4
2.2 Environnement naturel	5
2.2.1 Topographie et pente du sol.....	5
2.2.2 Hydrographie et limites des bassins versants.....	5
2.2.3 Couverture végétale.....	6
2.2.4 Climatologie	7
2.2.5 Pédologie	9
2.2.6 Milieux humides	9
2.2.7 Réseau de surveillance météorologique, hydrométrique et piézométrique.....	10
2.3 Environnement humain	11
2.3.1 Portrait socioéconomique	11
2.3.2 Utilisation du sol	12
2.3.3 Affectation du territoire.....	13
3 Acquisition de données et Travaux réalisés	15
3.1 Compilation de l'information existante.....	15
3.2 Travaux de caractérisation.....	17
3.2.1 Levés sismique.....	18
3.2.2 Forages	20
3.2.3 Échantillonnage d'eau souterraine et de pluie	25
3.2.4 Estimation des propriétés hydrauliques	30
3.2.5 Niveaux piézométriques	35
3.3 Saisie, validation et archivage des données.....	35

3.4	Rencontres et formations avec les partenaires.....	39
4	Contextes géologiques et hydrogéologiques.....	41
4.1	Géologie du socle rocheux.....	41
4.2	Géologie du Quaternaire.....	42
4.2.1	Introduction.....	42
4.2.2	Histoire des évènements du Quaternaire.....	43
4.2.3	Nature et distribution des dépôts meubles.....	46
4.2.4	Stratigraphie, épaisseur et architecture des dépôts meubles.....	66
4.3	Délimitation des grands contextes hydrogéologiques régionaux.....	78
4.4	Épaisseur de dépôts meubles.....	80
4.5	Topographie du roc.....	84
4.6	Conditions de confinement.....	84
4.7	Contextes hydrostratigraphiques.....	86
5	Conditions hydrogéologiques.....	88
5.1	Propriétés hydrauliques.....	88
5.1.1	Essais de pompage des puits de l'aquifère rocheux du PACES-NSBL.....	90
5.1.2	Essais à charge variable.....	90
5.1.3	Perméamètre Guelph.....	91
5.1.4	Estimation de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux à partir de la capacité spécifique.....	94
5.2	Piézométrie, écoulements et suivi des niveaux.....	98
5.3	Recharge et résurgences.....	105
5.4	Vulnérabilité des aquifères.....	110
5.5	Géochimie de l'eau souterraine.....	117
5.6	Synthèse hydrogéologique régionale.....	131
6	Ressource en eau souterraine.....	135
6.1	Utilisation de l'eau souterraine.....	135
6.2	Qualité de l'eau souterraine.....	138
6.3	Activités anthropiques potentiellement polluantes.....	144
6.4	Gestion durable de la ressource.....	146
7	Avancée des projets de maîtrise.....	149
7.1	Dynamique hydrogéologique de flèches littorales : exemple du marais de Cap Marteau, Notre-Dame-Des-Neiges, estuaire du Saint-Laurent, Québec.....	149

7.2	Cycle de l'azote : contribuer à une meilleure compréhension de la connectivité entre les eaux souterraines et les activités de surfaces en milieu agricole.....	155
7.3	Caractérisation de la connectivité entre les eaux de la rivière Matane et les eaux souterraines de l'aquifère alluvial, Saint-René-de-Matane, Québec	163
7.4	La protection des eaux souterraines : action collective pour le maintien de l'activité agricole dans une municipalité de Bas-Saint-Laurent.	174
8	Conclusion et recommandations	178
8.1	Conclusion générale.....	178
8.2	Recommandations.....	181
	Références	185

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Moyennes mensuelles des précipitations et températures sur 30 ans.	8
Figure 3.1. Levés sismique réflexion dans la vallée de Neigette..	18
Figure 3.2. Carte de localisation des levés sismique réflexion réalisés en septembre 2013.	19
Figure 3.3. Exemple de résultat et d'interprétation d'un levé sismique de la vallée de la rivière Neigette à Saint-Anaclet-de-Lessard.	20
Figure 3.4. Sondage stratigraphique effectué en 2013 à Saint-Simon avec la foreuse géotechnique de l'INRS-ETE.	21
Figure 3.5. Forage de l'aquifère rocheux dans la municipalité de Saint-Éloi.....	23
Figure 3.6. Localisation des forages réalisés par le PACES-NEBSL.....	24
Figure 3.7. Utilisation d'un filtre Waterra haute capacité lors de l'échantillonnage d'eau du puits du réseau de suivi des eaux souterraines à Notre-Dame-des-Neiges.	27
Figure 3.8. Conception des collecteurs d'eau de pluie utilisés dans le PACES-NEBSL.....	28
Figure 3.9 Localisation des points d'échantillonnage d'eau souterraine et de pluie des campagnes d'échantillonnage de 2013 et de 2014.	29
Figure 3.10. Réalisation d'un essai de pompage	31
Figure 3.11. Réalisation d'essais à charge variable.	32
Figure 3.12. Réalisation d'un essais au perméamètre de Guelph.	33
Figure 3.13. Localisation de tous les essais hydrauliques	34
Figure 3.14. Exemples de formulaire de saisie de la BD-NEBSL	37
Figure 3.15. Localisation de tous les forages saisis dans la BD-NEBSL.	38
Figure 4.1. Exemples de vestiges glaciaires dans le Bas-Saint-Laurent.....	51
Figure 4.2. Exemples de modelés et de dépôts fluvioglaciaires dans le Bas-Saint-Laurent.	53
Figure 4.3. Géomorphologie quaternaire d'une partie de la vallée de la Neigette.	54
Figure 4.4. Le replat du delta fluvioglaciaire de Trois-Pistoles domine une série de falaises mortes et de lignes de rivage de la Mer de Goldthwait.	56
Figure 4.5 Le triple delta de contact glaciaire de Luceville..	57
Figure 4.6. Exemples de sédiments marins déposés dans la Mer de Goldthwait.	61
Figure 4.7. Terrasses marines, falaises mortes et plages de la Mer de Goldthwait.	62
Figure 4.8 .Coupe dans la plaine alluviale de la rivière Horton près de Squatec	65
Figure 4.9. Localisation des coupes stratigraphiques.	67
Figure 4.10. Coupe l'Isle-Verte	69
Figure 4.11. Coupe transversale de Saint-Eugène-de-Ladrière à Saint-Fabien-sur-Mer	71
Figure 4.12. Coupe transversale de Saint-Gabriel à Sainte-Luce.....	73
Figure 4.13. Coupe longitudinale dans la vallée de la rivière Mitis	75
Figure 4.14. Coupe longitudinale dans la vallée de la rivière Matane.....	77
Figure 4.15. Délimitation des contextes hydrogéologiques régionaux.....	79
Figure 4.16. Épaisseur de sédiments argileux.	82
Figure 4.17. Épaisseurs de sédiments granulaires surmontant les sédiments argileux.	83
Figure 4.18. Regroupement des unités hydrostratigraphiques retrouvées dans la description des forages des différentes sources pour la définitions des unités hydrostratigraphiques.	87
Figure 5.1. Distribution spatiale des valeurs médianes de conductivité hydraulique du milieu non saturé des formation superficielles obtenues par les essais au perméamètre de Guelph.	93

Figure 5.2. Histogramme de fréquences des valeurs de conductivité hydraulique (K) calculées pour les puits du SIH à partir de la capacité spécifique (C_s).....	95
Figure 5.3. Diagramme de boîtes à moustaches (box plot) du logarithme de la conductivité hydraulique ($\log_{10}(K)$) provenant des forages du SIH pour les différentes unités géologiques du Bas-Saint-Laurent. Gr = groupe, F = formation.....	95
Figure 5.4. Carte des valeurs médianes de conductivité hydraulique des divers groupes et formations rocheuses du territoire du PACES-NEBSL.....	97
Figure 5.5. Conductivité hydraulique en fonction de la profondeur des forages. Le graphique montre la diminution de la conductivité hydraulique en fonction de l'augmentation de la profondeur du forage. Cette relation signifie une diminution du niveau de fracturation du socle en profondeur, toute lithologie confondue.	98
Figure 5.6. Hydrogrammes des puits de l'aquifère rocheux	100
Figure 5.7. Hydrogrammes des piézomètres.....	102
Figure 5.8. Hydrogrammes des puits.....	103
Figure 5.9. Décalage moyen pour les 57 événements de crue au maximum de corrélation entre le niveau de la rivière et le niveau piézométrique en relation avec la distance perpendiculaire au chenal.	104
Figure 5.10. Propagation d'une «onde phréatique» dans l'aquifère alluvial de Matane.....	105
Figure 5.11. Organigramme méthodologique du calcul de la recharge par bilan hydrique spatialisé utilisée dans le projet.....	107
Figure 5.12. Recharge spatialisée des formations granulaires de surface.....	109
Figure 5.13. Représentation des sept paramètres du DRASTIC	111
Figure 5.14. Méthodologie de calcul de la méthode DRASTIC	113
Figure 5.15. Vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère granulaire de la vallée de Matane.	115
Figure 5.16. Diagramme de piper.....	118
Figure 5.17. Spatialisation des sept types d'eau.....	120
Figure 5.18. Démarche méthodologique aux fins d'analyses statistiques multivariées utilisant les résultats d'analyse géochimique (adapté de Cloutier et al, 2006).....	122
Figure 5.19. Schématisation des analyses multivariées.....	124
Figure 5.20. Spatialisation des quatre groupes obtenus par les analyses multivariées.	125
Figure 5.21. Composition isotopique de l'eau souterraine, de surface et des précipitations	129
Figure 5.22. Quantité de $\delta^{13}C$ du carbone inorganique dissous dans les eaux souterraines.....	130
Figure 5.23. Synthèse des contextes hydrogéologiques régionaux	134
Figure 6.1. Distribution spatiale des dépassements liés au pH.	142
Figure 6.2. Distribution spatiale des dépassements liés aux OE.	143
Figure 6.3. Distribution spatiale des dépassements liés aux CMA.	144
Figure 6.4. Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines.....	147
Figure 7.1. Marais du Cap Marteau, localisation et positionnement des échantillonnages d'eau pour les isotopes stables et les paramètres physico-chimiques	150
Figure 7.2. Pushpoint	152
Figure 7.3. Carte de l'évolution des flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013.....	153
Figure 7.4. Relevé HOBO® pour les piézomètres CM2 et CM4.....	153
Figure 7.5. Localisation de la municipalité de Sainte-Luce.....	158
Figure 7.6. Contexte géomorphologique de la région de Sainte-Luce	158

Figure 7.7. Contexte hydrogéologique de la région de Sainte-Luce	159
Figure 7.8. Concentrations en nitrates enregistrées dans les piézomètres d'observation dans l'air de captation de l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-Luce	160
Figure 7.9. Concentrations en nitrates enregistrées dans les ouvrages de captation de l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-Luce	160
Figure 7.10. Schéma des 12 mini-parcelles avec les traitements	161
Figure 7.11. Schéma d'un collecteur d'eau.....	162
Figure 7.12. Coupes transversales des interactions entre une nappe phréatique et un cours d'eau dans une plaine alluviale	164
Figure 7.13. Illustration de la zone hyporhéique et des échanges latéraux et verticaux avec une plaine alluviale.....	165
Figure 7.14. A) Localisation régionale du bassin versant de la rivière Matane. B) Localisation du site d'étude Dancause à Saint-René-de-Matane dans son cadre géomorphologique.	167
Figure 7.15. Position des piézomètres des niveaux d'eau et de la pression atmosphérique dans la plaine alluviale du site Dancause.	168
Figure 7.16. Instrument RAD7 utilisé pour les mesures in situ du ²²² Rn	169
Figure 7.17. Relation des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) des eaux souterraines de la plaine alluviale du site Dancause	170
Figure 7.18. Répartition des valeurs de l'oxygène dissout (mg/L) (polygones de Thiessen) dans la plaine alluviale du site Dancause	171
Figure 7.19. Répartition des isotopes stables de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) (polygones de Thiessen) dans la plaine alluviale du site Dancause	171
Figure 7.20. A) Temps de réponse de l'onde phréatique en fonction de la distance perpendiculaire à la berge pour un événement de crue	172
Figure 7.21. Vitesse de propagation de l'onde de crue selon les caractéristiques des événements de crue	173

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Démographie et superficie des MRC du territoire du PACES-NEBSL.	4
Tableau 2.2. Superficie et % du territoire en culture dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent.....	7
Tableau 2.3. Superficie du territoire couvert par les milieux humides.....	10
Tableau 2.4. Stations météorologiques, piézométriques et hydrométriques.....	11
Tableau 2.5. Évolution de la population par MRC avec son indice de dépendance économique (IDE)	12
Tableau 2.6. Superficie des classes d'utilisation du sol.	13
Tableau 2.7. Les grandes affectations du territoire par MRC.....	14
Tableau 3.1. Source des données consultées et utilisées dans le PACES-NEBSL	16
Tableau 3.2. Synthèse des travaux terrain du PACES-NEBSL	17
Tableau 3.3. Détails de construction des forages dans le roc	25
Tableau 3.4. Liste des 16 formulaires de saisie de la BD-NEBSL.	36
Tableau 3.5. Synthèse des forages intégrés à la base de données	36
Tableau 3.6. Synthèse des activités auxquelles l'équipe du PACES-NEBSL a participé durant le projet.	40
Tableau 4.1. Types de dépôts que l'on retrouve au Bas-Saint-Laurent et leur description	48
Tableau 4.2. Critères de définition des conditions de confinement	85
Tableau 5.1. Synthèse des valeurs de conductivité (K) et de transmissivité (T) des puits des municipalités ayant un réseau d'approvisionnement en eau souterraine.....	89
Tableau 5.2. Résultats de transmissivité (T) et de conductivité hydraulique (K) des sept essais réalisés dans le cadre du PACES-NEBSL dans les formations rocheuses.	90
Tableau 5.3. Plages de conductivités hydrauliques calculées à partir des essais à charge variable	91
Tableau 5.4. Conductivités hydrauliques médianes et moyennes des unités quaternaires	92
Tableau 5.5. Numéros de courbe pour différentes combinaisons de types et d'occupation du sol	106
Tableau 5.6. Indice DRASTIC des piézomètres mis en place par le PACES-NEBSL dans les formations granulaires.....	116
Tableau 5.7. Valeurs médianes des paramètres physico-chimiques des les quatre groupes identifiés par la HCA.....	123
Tableau 5.8. Résumé des principales caractéristiques des quatre groupes d'eau	126
Tableau 6.1. Bilan de l'utilisation de l'eau souterraine et de surface pour toutes les municipalités du territoire du PACES-NEBSL.	136
Tableau 6.2. La distribution de l'eau selon sa provenance pour le secteur agricole dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent.	137
Tableau 6.3. Consommation de l'eau souterraine dans les quatre MRC du territoire selon les trois principaux usages : Agricole, Industriel, commercial et institutionnel (ICI) et résidentiel	138
Tableau 6.4. Statistiques sur les dépassements des critères d'eau potables (objectifs esthétiques et concentrations maximales acceptables pour la santé) dans les aquifères fracturés et granulaires du nord-est du Bas-Saint-Laurent.	139

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte de réalisation du projet PACES-NEBSL du projet

Les connaissances sur les eaux souterraines étaient jusqu'à présent minimales et fragmentaires dans le Bas-Saint-Laurent où près de 60% de la population s'alimente à partir de cette ressource. La couverture de la cartographie hydrogéologique reconnue par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) souligne qu'aucun projet n'a été complété ni n'est en cours de réalisation dans cette région où habitent plus de 200 000 personnes (Institut de la statistique du Québec, 2012). Le plan directeur de l'eau de l'Organisme des bassins versants du nord-est du Bas-Saint-Laurent (OBVNEBSL) ainsi que la Commission sur l'eau de la Conférence régionale des élus (CRÉ) du Bas-Saint-Laurent soulignaient tous la nécessité et l'importance d'acquérir des connaissances sur cette ressource afin de mettre en place des outils de gestion adéquats et d'en assurer la qualité et la quantité sur son territoire. C'est dans ce contexte qu'au printemps 2012, l'Université du Québec à Rimouski (UQAR), en partenariat avec l'INRS-ETE, a obtenu le financement du MDDELCC pour la réalisation du *Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL)*.

Le PACES-NEBSL s'inscrit dans le troisième appel d'offres lancé par le MDDELCC en même temps que les PACES Charlevoix Haute-Côte-Nord (UQAC), Vaudreuil-Soulanges (UQAM), Chaudière-Appalaches (INRS), Bassin de la rivière Saint-François et Abitibi-Témiscamingue (partie Ouest). Comme pour les autres projets, le PACES-NEBSL s'est déroulé en trois phases soit: 1) une phase de collecte des données existantes (2012-2013), 2) une phase de travaux de terrain complémentaires (2013-2014) et 3) et finalement une phase de synthèse et de transfert des connaissances (2014-2015).

1.2. Objectifs du projet

L'objectif premier du PACES-NEBSL était d'actualiser, d'accroître, de compiler et d'uniformiser les connaissances sur les eaux souterraines pour la région du nord-est du Bas-Saint-Laurent, et ce, dans une optique de développement durable de la ressource. Plus précisément, le PACES-NEBSL visait à :

1. **dresser** un portrait de la ressource en eau souterraine à l'échelle des bassins versants du nord-est du Bas-Saint-Laurent pour soutenir les besoins d'information sur cette ressource concernant la qualité, la quantité et la vulnérabilité de l'eau souterraine;
2. **développer** des partenariats entre le milieu académique (UQAR, INRS-ETE), les gestionnaires du territoire (MRC et municipalités), les organismes régionaux (CRÉ-BSL, OBVNEBSL, ZIPSE) et l'expertise privée (Envir'Eau Puits) dans l'acquisition des connaissances sur la ressource en eau souterraine afin d'en favoriser une saine gestion;

3. **arrimer** les livrables du MDDELCC aux besoins régionaux des différents partenaires du projet pour optimiser l'utilisation des données;
4. **fournir** des outils de gestion de la ressource pour assurer la pérennité de la qualité et de la quantité des eaux souterraines dans le développement de la région et en intégrant la composante risque dans la perspective de changements environnementaux;
5. **soutenir** le développement d'une expertise en hydrogéologie ainsi que la formation de personnel hautement qualifié à l'UQAR pour l'acquisition, le développement et la gestion de connaissances tant d'un point de vue hydrogéochimique que social dans le domaine des eaux souterraines.

La troisième phase du projet visait en premier lieu à clore la phase acquisition de connaissances avec une campagne de travaux de terrain complémentaires à ceux effectués en 2013 (échantillonnage d'eau souterraine, forages dans l'aquifère rocheux, sondages dans les dépôts meubles, essais à charge variable dans les piézomètres installés par l'équipe du PACES-NEBSL et instrumentation de ces piézomètres). Aussi cette phase du projet fut majoritairement consacrée à l'analyse et à l'interprétation des données acquises durant les deux années précédentes et à la création des différents livrables cartographiques, ainsi qu'à la rédaction du présent rapport. Finalement, la dernière phase du PACES-NEBSL visait à transmettre les connaissances acquises aux différents partenaires du projet par le biais de discussions et de formations/rencontres sur la ressource eau souterraine.

1.3 Équipe de réalisation et partenaires

Le PACES-NEBSL a été co-coordonné par Thomas Buffin-Bélanger, professeur de géomorphologie et hydrologie fluviale, et par Gwénaëlle Chaillou, professeur et titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur la géochimie des hydrogéosystèmes côtiers. L'équipe de réalisation était aussi formée de deux chargés de projet, Claude-André Cloutier et Maud Touchette. À ce noyau se sont greffés trois étudiants à la maîtrise dont les projets sont directement liés à des thématiques spécifiques au territoire du PACES-NEBSL soit la connectivité entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans une plaine alluviale graveleuse (projet mené par Catherine Tremblay), la dynamique hydrologique de corps sédimentaires côtiers (projet mené par Hélène Cocheril) et la connectivité entre les activités de surface et la qualité de l'eau souterraine dans les milieux agricoles (projet mené par Éric Filion dans le cadre d'une bourse en milieu de pratique BMP). Deux autres projets avaient été initiés dans la première partie du programme. Le premier portait sur l'historique quaternaire de la mise en place du delta de Trois-Pistoles et le deuxième sur l'étude de la mise en place d'une approche collaborative décisionnelle pour la gestion de la qualité de l'eau municipale de Sainte-Luce. Ces projets ont été abandonnés par les deux étudiants après quelques mois. Par contre, le second projet sera repris dans le cadre du DESS en développement régional et territorial.

Au cours des étés 2013 et 2014, cinq étudiants de premier cycle en géographie, deux étudiantes en chimie de l'environnement et deux stagiaires Katimavik se sont joints au projet en tant qu'auxiliaires de terrain : Simon Claveau, Sophie Delorme, Laurent Gosselin, Nancy Martel, Mélodie Denis, Gwendoline Tomi-Morin, Mathilde Gauthier-Pinsonneault, Wilbène Cenatus et Fatah Messaoudene. Jérôme Dubé, auxiliaire de recherche et d'enseignement, a collaboré au projet par la mise en place des stations de jaugeage en rivières. Un assistant a aussi été recruté pendant l'été 2013, Tarik Toubal, pour aider l'équipe, notamment pour l'installation des stations de collecte d'eau de pluie et pour la réalisation des essais au perméamètre de Guelph.

L'équipe du PACES- NEBSL a aussi pu compter sur l'expertise en hydrogéologie de Renald McCormack (PDG de la compagnie Envir'Eau Puits, firme spécialisée en hydrogéologie) pour la planification des travaux de terrain et l'analyse des données. Jean Veillette (chercheur émérite, Commission Géologique du Canada) a travaillé sur la création de la carte de la géologie des formations superficielles. L'OBVNEBSL a apporté son soutien en termes de connaissances et de ressources. Finalement, l'équipe a pu compter sur l'expertise en cartographie et en gestion de bases de données de Marie-Andrée Roy, technicienne en géomatique à l'UQAR.

Le Réseau Québécois sur les Eaux Souterraines (RQES) et le Groupe de Recherche Interuniversitaire sur les Eaux Souterraines (GRIES) ont permis à l'équipe de l'UQAR d'échanger avec les équipes des autres PACES qui sont des collaborateurs scientifiques de premier ordre.

La réalisation du PACES-NEBSL fut possible grâce aux partenariats avec des acteurs régionaux, divers ministères et des collaborateurs de recherches (publics et privés) qui sont listés ci-dessous:

- Conférence régionale des élus du Bas-Saint-Laurent (CRÉBSL)
- MRC de la Matanie, La Mitis, Rimouski-Neigette et Les Basques
- Conseil régional en environnement du Bas-Saint-Laurent (CRE)
- Comité ZIP du sud de l'estuaire (ZIPSE)
- Organisme des bassins versants du nord-est du Bas-Saint-Laurent (OBVNEBSL)
- INRS-ETE
- Envir'eau Puits (firme privée en hydrogéologie)
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)
- Ministère des Transports (MTQ)
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)
- Ministère des Affaires Municipales et de l'Occupation du Territoire (MAMOT)
- Ministère de la Sécurité Publique (MSP)
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)
- Commission Géologique du Canada (CGC)
- Commission Géologique du Québec (CGQ)

2. PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

2.1 Localisation

Le territoire couvert par le PACES-NEBSL se situe dans la région administrative du Bas-Saint-Laurent, composé de huit municipalités régionales de comté (MRC) et 114 municipalités. Cette région de l'est du Québec est bordée au nord par le fleuve Saint-Laurent, au sud par le Nouveau-Brunswick et l'État du Maine, à l'est par la Gaspésie et à l'ouest par la Côte-du-Sud. Le territoire concerné par l'étude a une superficie de l'ordre de 4000 km². Cette superficie représente le territoire habité du nord-est du Bas-Saint-Laurent où les problèmes de qualité et d'approvisionnement en eau sont les plus présents. La région à l'étude comprend une partie des territoires couverts par les MRC des Basques, de La Mitis, de Rimouski-Neigette et de la Matanie où se situent 39 municipalités. La région à l'étude couvre aussi de très petites surfaces des MRC de Matapédia et de Rivière-du-Loup dont les municipalités n'ont finalement pas été intégrées au projet.

Le territoire du PACES-NEBSL, correspond à une bande d'une quinzaine de kilomètres de largeur longeant le Saint-Laurent entre Trois-Pistoles et Les Méchins, ainsi qu'à quatre corridors de 20 km de largeur le long des rivières Trois-Pistoles, Rimouski, Mitis et Matane (10 km de part et d'autre de la rivière). Le territoire visé correspond à près de 45 % du territoire couvert par l'OBVNEBSL, à près de 40 % du territoire couvert par les quatre MRC concernées (Les Basques, Rimouski-Neigette, La Mitis, la Matanie) et à un peu moins de 15 % de la région du Bas-Saint-Laurent. Le **Tableau 2.1** décrit sommairement les MRC ainsi que les superficies du territoire ciblé par le projet. Les principales villes de chacune des MRC incluses dans le projet sont Trois-Pistoles (3471 habitants), Rimouski (48155 habitants), Mont-Joli (6673 habitants) et Matane (14600 habitants).

Tableau 2.1. Démographie et superficie des MRC du territoire du PACES-NEBSL. * TO : territoires organisés.

MRC	Population	Superficie	Superficie des TO*		Superficie des MRC ciblées	
		Km ²	Km ²	%	Km ²	%
La Matanie	21959	3376	1648	49	1261	37
La Mitis	19160	2312	1141	49	788	34
Rimouski-Neigette	56571	2762	1804	65	956	35
Les Basques	9184	1132	1040	92	645	57
Total	106874	9582	5633		3650	

Source : Ministère des Affaires municipales et Occupation du territoire (MAMOT, 2015).

2.2 Environnement naturel

2.2.1 Topographie et pente du sol

Deux régions physiographiques dominent le territoire du PACES-NEBSL : la Plaine Côtière et les Hautes-Terres. La Plaine Côtière se caractérise par la succession de terrasses marines laissant émerger quelques barres rocheuses de faible dénivelé. Les terrasses correspondent à la succession des terrasses de Rimouski, de Mitis et Micmac (ou Bic). La Plaine Côtière comprend le littoral actuel (terrasse de Rimouski) et les territoires qui ont été envahis par la mer de Goldthwait. Son faible relief est contrôlé par les sédiments meubles déposés sur le substratum rocheux (terrasse Micmac) ou qui forment les terrasses d'accumulation marine (terrasse Mitis). On y retrouve également quelques successions de crêtes appalachiennes et de sillons en dessous de l'élévation de 150 m p/r NMM reflétant l'organisation structurale du socle rocheux. Les Hautes-Terres englobent tous les reliefs dont l'altitude est supérieure à 150 m p/r NMM jusqu'à une altitude excédant 1 000 m p/r NMM. En général, le passage de la Plaine Côtière aux Hautes-Terres s'effectue graduellement sauf au sud de Rimouski où l'escarpement de la faille Neigette dénivelèe drastiquement deux paliers distincts. Les Hautes-Terres sont constituées de hauts plateaux disséqués et ondulés et de massifs de collines arrondies. Elles sont aussi caractérisées par l'alternance de crêtes de roches dures et de sillons (vallées) de roches tendres généralement orientées SO-NE. L'histoire quaternaire de la région est détaillée à la section 4.2.

La topographie du territoire (carte 1) provient d'un modèle numérique d'élévation fourni par le MDDELCC au début du projet et qui a été généré à partir des courbes topographiques au 1/20 000 de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ) à des mailles de 10 m. Le modèle fourni ne couvrait pas la totalité du territoire, alors une certaine portion du territoire a été rajoutée au modèle initial par la méthode ANUDEM. Le modèle numérique de terrain est présenté sur la carte 3 La pente du sol a été générée à partir du modèle numérique d'élévation, en suivant le protocole de Therrien et Comeau (2012). La pente fut calculée en degrés à une résolution de 10 x 10 m. Sur la carte 4, on peut voir que les pentes du territoire à l'étude varient entre 0 et 69° par contre, de manière générale, les pentes sont assez faibles soit entre 0 et 7°. Les pentes les plus fortes sont associées à l'alternance de crêtes et de vallées ainsi qu'à l'escarpement de la faille de Neigette.

2.2.2 Hydrographie et limites des bassins versants

Le réseau hydrographique du territoire est présenté sur la carte 5. Les informations nécessaires à la production de ce livrable proviennent du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) produit par le MDDELCC. Ce dernier est basé sur les données de la BDTQ du Ministère des Ressources naturelles (MRN).

Le territoire du PACES-NEBSL comprend quatre bassins versants de taille significative : les bassins versants de la rivière Rimouski (1620 km²), Trois-Pistoles (941 km²), Mitis (1805 km²) et Matane (1685 km²). Ces quatre bassins (d'ordre 6 de Strahler) drainent l'eau du territoire directement dans le fleuve Saint-Laurent (du sud au nord). Aussi, 145 autres bassins, mais de plus petites superficies se trouvent sur le territoire. À noter que 55% d'entre eux font moins de 5 km² et sont situés directement en zone côtière.

Les limites physiographiques des bassins versants de la zone sont principalement délimitées par la présence de la chaîne de montagnes des Appalaches. Le massif des Chic-Choc agit à titre de barrière à l'est et au sud. À l'ouest, c'est le plateau appalachien qui joue ce rôle, alors que les bas-reliefs des Basses-Terres du Saint-Laurent forment la limite nord. Tous les bassins versants du territoire sont gérés par l'OBVNEBSL, dont le territoire s'étend à plusieurs kilomètres plus au sud que la zone PACES. Les bassins versants du territoire sont présentés sur la carte 6.

2.2.3 Couverture végétale

L'information concernant la couverture végétale du territoire est présentée sur les cartes 8A et 8B. Elle comprend la couverture forestière et les types de cultures. La carte du couvert forestier (8A) a été produite à partir du 4^e décennal du Système d'information écoforestière (SIEF) du Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles, information fournie par l'OBVNEBSL. Le domaine bioclimatique auquel la zone d'étude appartient est celui de la sapinière à bouleau jaune qui s'étend du Témiscamingue à l'extrémité est de la péninsule gaspésienne. Ce domaine bioclimatique est un écotone qui agit à titre de transition entre la zone tempérée nordique dominée par les peuplements feuillus et mixtes et la zone boréale qui est dominée par les peuplements de conifères (MRN, 2012). Le domaine de la sapinière à bouleau jaune est caractérisé par la présence du sapin sur un sol mésique, ce qui est unique à la forêt boréale de l'Amérique du Nord (Gagnon, 2004). La superficie du couvert forestier représente 2550 km² soit un peu plus de la moitié du territoire du PACES-NEBSL. Le sapin baumier, le bouleau jaune, l'épinette rouge et blanche, le thuya, l'érable à rouge et l'érable à sucre (qui atteint sa limite nord de distribution dans le domaine de la sapinière à bouleau jaune) sont les principales essences que l'on retrouve sur le territoire (Gagnon, 2004). La majorité du territoire forestier est couverte par une population mixte (58%) et que les 42 % restants sont soit de type feuillus (19%) ou résineux (23%).

La carte des types de cultures (8 B) a été produite à partir de la base de données des cultures assurées (BDCA) de la Financière agricole du Québec (2013). Avec ses 731 km², l'agriculture représente uniquement 18 % du territoire du PACES-NEBSL. Les cultures du foin (46,8 %), de l'orge (12,3 %) et de l'avoine (6 %) sont les plus importantes du territoire, alors que le blé, le canola, le maïs, les autres céréales, les cultures mixtes, le soya, les cultures maraichères et les petits fruits occupent environ 6% du territoire cultivé (**Tableau 2.2**). Il n'y a pas d'informations sur les 25% restants qui sont en culture dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent. Les informations

contenues dans cette base de données émanent des déclarations de producteurs agricoles faites à la Financière agricole du Québec. Les parcelles non déclarées, qui ne sont donc pas assurées pour l'année en cours, sont classées « pas d'information ».

Tableau 2.2. Superficie et % du territoire en culture dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent. Source : BDCA, Financière agricole du Québec (FADQ); ARCGIS.

Types de culture	Superficie (km ²)	% du territoire en culture
Foin	393.57	54
Orge	99	14
Avoine	40.4	6
Canola	14.13	1.9
Blé	12.20	1.7
Maïs	5.49	0.8
Autres céréales	4.90	0.7
Culture mixte	2.96	0.4
Soya	1.50	0.2
Maraicher	4.34	0.6
Petits fruits	0.25	0.03
Pas d'information	150.64	21

2.2.4 Climatologie

Le territoire du PACES-NEBSL est caractérisé par la présence d'un climat de type subpolaire subhumide intermédiaire, influencé par les courants froids en provenance du fleuve et des Appalaches. Dans les Hautes-Terres, les contrastes de température sont marqués par des étés chauds et courts et des hivers rigoureux (Direction générale du Bas-St-Laurent du MRNF, 2010). À la côte, le climat est légèrement tempéré par les masses d'air en provenance du fleuve. Ainsi, on retrouve constamment un écart de quelques degrés entre la zone côtière et les Hautes-Terres. Sur le territoire du PACES-NEBSL, on retrouve 16 stations météorologiques dont 14 appartenant au MDDELCC. Les deux autres appartiennent à Environnement Canada. Les 16 stations sont représentées sur la carte 27. Pour les 14 stations provinciales, les données de température maximum et minimum et des précipitations liquides et solides journalières ont été fournies par le Service de l'information sur le milieu atmosphérique de la Direction du suivi de l'état de l'environnement (DSEE) du MDDELCC.

Sur les 14 stations, cinq ont amassé des données sans interruption depuis 1980. La **Figure 2.1** présente leurs moyennes climatiques mensuelles sur 30 ans (1980 à 2010). Sur la période 1980-2010, la moyenne annuelle des précipitations totales pour les cinq stations est de 1091 mm par année. C'est à Saint-René-de-Matane, située dans la vallée de la rivière Matane, que les précipitations sont les plus élevées (1188 mm) alors que les plus faibles sont enregistrées à Trois-Pistoles (1019 mm). Environ 65% des précipitations tombent sous forme de pluie dans la région. La moyenne annuelle de température sur le territoire du PACES-NEBSL est de 3.06°C. Les

températures mensuelles minimales fluctuent entre -15 et -19 °C alors que les températures maximales varient entre 21 et 24°C.

Les données climatiques pour les années 1900 à 2010 nous ont aussi été fournies par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Ces données comprennent les apports verticaux provenant de la fonte des neiges et de la pluie, ainsi que des données de températures interpolées sur une grille de 0.1 degré de latitude par 0.1 degré de longitude (Poirier et al. 2012). Ces informations ont été utilisées pour la création du livrable de la recharge (livrable 28).

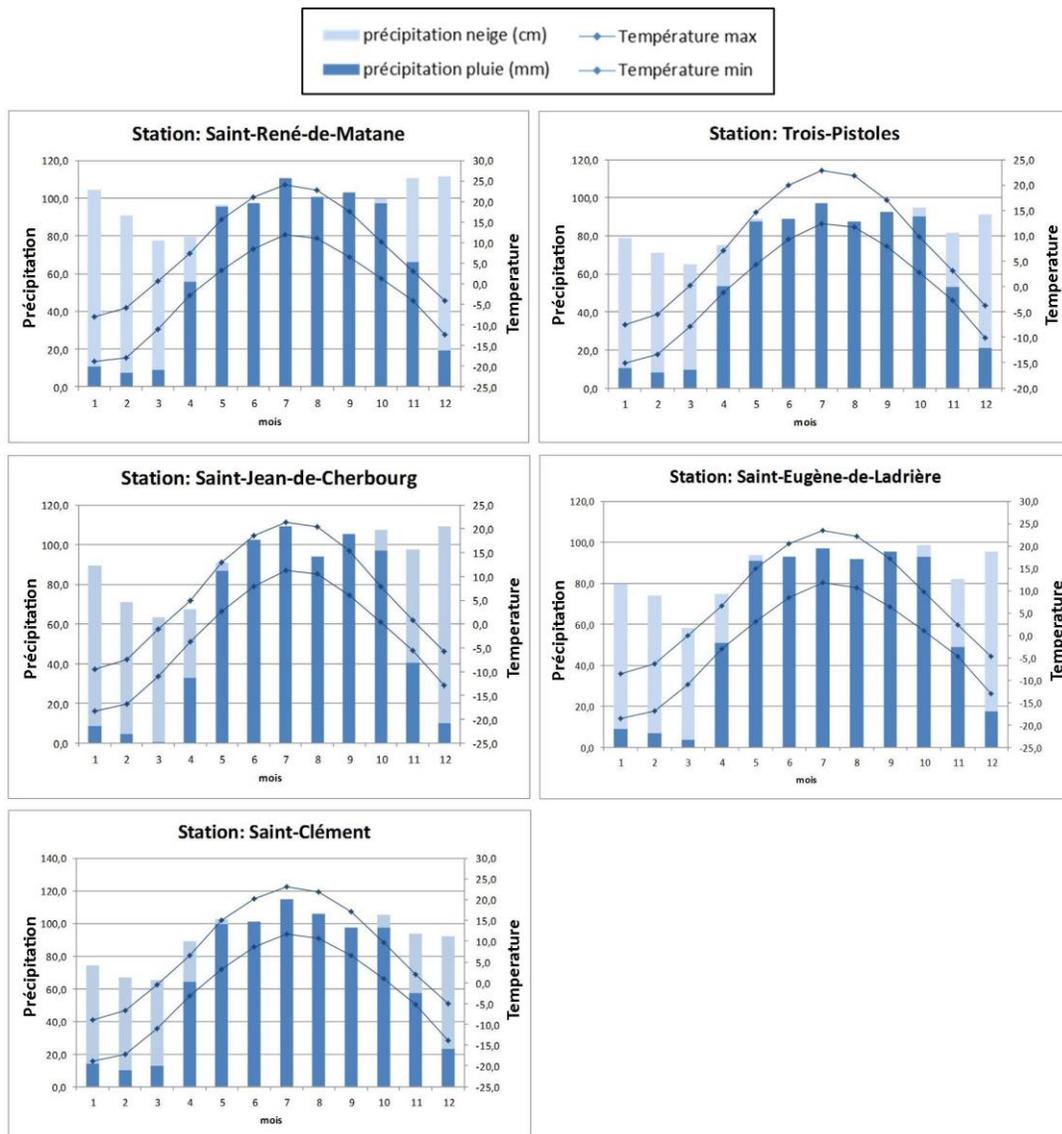


Figure 2.1. Moyennes mensuelles des précipitations et températures sur 30 ans.

2.2.5 Pédologie

Les données ayant servi à la production de la carte 11 proviennent en partie de la cartographie des sols cultivés produite par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA). Elles proviennent de MAPAQ (1979) et d'Agriculture Canada (1989) et ont été assemblées sous forme numérique par l'IRDA. Ces données amassées dans les années 1970 et 1980 ont permis d'établir le profil pédologique des sols agricoles du nord-est du Bas-Saint-Laurent, c'est-à-dire de la portion ouest du territoire jusqu'à Mont-Joli, ce qui représente une faible superficie du territoire total du PACES-NEBSL. La cartographie fut donc complétée à l'aide de la base de données du 4^e inventaire décennal du Système d'Information Écoforestière (SIEF) selon le protocole Blanchette (2012).

Des informations issues de la banque de données des sols du Québec permettent de diviser les sols selon six classes de texture (sableux, loameux, argileux, graveleux, tills, organiques et divers) et six classes de drainage (très rapidement drainé, rapidement drainé, bien drainé, modérément bien drainé, mal drainé et très mal drainé (Carrier et al. 2012). Sur les territoires qui n'ont pas été submergés par la mer de Goldthwait (limite approximée au-dessus de 150 m d'altitude), les sols sont majoritairement de types divers et issus de dépôts de till généralement bien drainés. Pour ce qui est des sols se trouvant sur la portion du territoire qui a été ennoyée lors de la déglaciation, on retrouve principalement des sols sableux et argileux de bien drainés à très mal drainés. Les fonds de vallées sont quant à eux caractérisés par des sols sableux et graveleux allant de modérément bien drainés à très bien drainés.

2.2.6 Milieux humides

Selon la définition de Couillard et Grondin (1986), les milieux humides constituent l'ensemble des sites saturés d'eau ou inondés pendant une période suffisamment longue pour influencer la nature du sol et la composition de la végétation. Certains de ces écosystèmes sont en permanence inondés alors que pour d'autres, le degré de saturation varie en fonction des saisons. La majorité des eaux de surface et souterraines qui circulent dans un bassin versant entrent en contact à un moment ou un autre avec un milieu humide.

Les données ayant servi à la production de la carte 9 proviennent de Canards Illimités Canada (2010). Cette classification a été faite à partir des données récoltées lors du 3^e inventaire décennal forestier du MRN et a été fournie par l'OBVNEBSL. Les milieux humides couvrent 1,7% de la zone à l'étude. Ils sont représentés sur la carte 9 selon les huit classes décrites dans le **Tableau 2.3**. Les marécages (51,8%), les milieux non classifiés (20,6%) et les herbaçaias (18,4%) dominent. Certains de ces écosystèmes ont fait l'objet d'un intérêt particulier, notamment pour leur mise en valeur et leur conservation. Par exemple, en 2002, l'ancien Conseil de bassin versant de la rivière Rimouski a permis l'aménagement de 25 milieux humides et leur mise en valeur. D'autres campagnes de conservation de milieux humides en collaboration avec les propriétaires

possédant de tels écosystèmes sur leur terrain ont aussi été lancées en 2004-2005 selon OBVNEBSL (2011). L'écohydrogéologie de ces milieux est particulièrement intéressante et a suscité un intérêt particulier dans le PACES-NEBSL. Un projet de maîtrise est d'ailleurs en cours sur cette thématique. Le projet est résumé dans la section 7 du document.

Tableau 2.3. Superficie du territoire couvert par les milieux humides

Type de milieux humides	Superficie (km ²)	% du territoire en milieux humides
Herbaciaies	12,85	18,4
Marécages	36,17	51,8
Marais	2,0	2,9
Prairies humides	0,13	0,2
Terres agricoles inondées	1,91	2,7
Tourbières en exploitation	0,31	0,4
Tourbières naturelles	2,1	3,0
Non classifiés	14,41	20,6

Source : SIEF 4e inventaire; ARCGIS, 2010

2.2.7 Réseau de surveillance météorologique, hydrométrique et piézométrique

Le territoire du PACES-NEBSL compte plusieurs stations de surveillances météorologiques, hydrométriques ainsi que pour le suivi du niveau des nappes. Toutes ces stations sont gouvernementales. Quatre stations piézométriques ont été installées durant le projet PACES-NEBSL, soit les stations piézométriques 02000009, 02190002, 02000010 et 02190001. Ces forages ont été financés par le MDDELCC dans le cadre de leur Réseau de suivi sur les eaux souterraines du Québec. Aussi, les stations hydrométriques Bic, Sud-Ouest, Neigette (a), Neigette (m), Mitis et Porc-Pic ont été installés dans les rivières du même nom par l'équipe du PACES-NEBSL. Les stations sont listées dans le **Tableau 2.4** et leur distribution spatiale est représentée sur la carte 27.

Tableau 2.4. Stations météorologiques, piézométriques et hydrométriques présentes sur le territoire du PACES-NEBSL. Les stations inactives n'ont pas été listées dans ce tableau.

Numéro de station	Emplacement	Type de station	Organisme responsable
21601	Matane (rivière Matane)	Hydrométrique	CEHQ
21702	Saint-Ulric (rivière Blanche)	Hydrométrique	CEHQ
21916	Saint-Anaclet (petite rivière Neigette)	Hydrométrique	CEHQ
22003	Rimouski (rivière Rimouski)	Hydrométrique	CEHQ
22301	Notre-Dame-des-Neiges (rivière Trois-Pistoles)	Hydrométrique	CEHQ
7058560	Notre-Dame-des-Neiges	Météorologique	MDDELCC
705LG09	Saint-Eugène-de-Ladrière	Météorologique	MDDELCC
7050761	Rimouski (le Bic)	Météorologique	MDDELCC
7055406	Saint-Anaclet-de-Lessard	Météorologique	MDDELCC
7055122	Mont-Joli	Météorologique	MDDELCC
7050MM05	Baie-des-Sables	Météorologique	MDDELCC
7054640	Saint-Ulric	Météorologique	MDDELCC
7054642	Matane	Météorologique	MDDELCC
7055780	Padoue	Météorologique	MDDELCC
7052588	Saint-Gabriel-de -Rimouski	Météorologique	MDDELCC
7057395	Saint-Jean-de-Cherbourg	Météorologique	MDDELCC
7057024	Saint-Clément	Météorologique	MDDLCC
7056480	Rimouski	Météorologique	Environnement Canada
7055121	Mont-Joli	Météorologique	Environnement Canada
02000009	Notre-Dame-des-Neiges	Piézométrique	MDDELCC
02190002	Sainte-Angèle-de-Méridi	Piézométrique	MDDELCC
02000010	Baie-des-Sables	Piézométrique	MDDELCC
02190001	Sainte-Jeanne-d'Arc	Piézométrique	MDDELCC
02167001	Matane	Piézométrique	MDDELCC
02160001	Saint-René-de-Matane	Piézométrique	MDDELCC
02000002	Sainte-Luce	Piézométrique	MDDELCC
02200001	Saint-Narcisse	Piézométrique	MDDELCC
02000001	Saint-Fabien (parc du Bic)	Piézométrique	MDDELCC

2.3 Environnement humain

2.3.1 Portrait socioéconomique

Le Bas-Saint-Laurent a une économie fortement marquée par des activités traditionnelles liées à l'agriculture et à la forêt (CRÉBSL, 2015). Cette dépendance aux ressources naturelles dont les valeurs sont sensibles aux fluctuations des marchés combinées à l'éloignement des grands centres

de production et de consommation contribue à sa fragilité économique. Le territoire est caractérisé par une majorité de municipalités rurales et donc par une population dispersée, résultant en une faible densité d'occupation. Le **Tableau 2.5** présente l'évolution démographique par MRC entre 1961 et 2011.

Tableau 2.5. Évolution de la population par MRC avec son indice de dépendance économique (IDE)

Année	Population par MRC				Ensemble du Québec (millions)
	Basques	Rimouski-Neigette	Mitis	Matane	
2011	9 142	55 095	18 942	21 786	7 903
2006	9 475	53 193	19 365	22 247	7 546
2001	9 848	52 289	19 326	22 507	7 397
1996	10 204	52 677	20 160	23 723	7 138
1991	10 325	51 290	20 157	24 334	6 895
1981	11 919	49 021	22 166	25 559	6 338
1971	13 543	42 055	24 150	24 432	5 955
1961	16 300	38 805	27 341	26 779	5 129
1951	15 430	30 093	24 409	21 738	3 956

Source : Institut de la Statistique, 2015

D'après le **Tableau 2.5**, seule la MRC Rimouski-Neigette a vu sa population croître de manière constante au cours des dernières décennies. En fait, la ville de Rimouski qui regroupe près de 80% de la population de sa MRC agit en tant que pôle de services et d'attraction dont bénéficient les municipalités environnantes. Les MRC des Basques et de la Mitis ont subi une décroissance démographique à travers le temps, alors que la démographie de la MRC de la Matanie est demeurée relativement constante. Malgré la présence de centres urbains, le Bas-Saint-Laurent demeure marqué par une proportion importante de municipalités dévitalisées et en difficulté (60%). La classification des municipalités a été faite par le MAMOT et se base sur un indice de développement socioéconomique calculé pour la période 1997-2006. Les municipalités dévitalisées sont caractérisées par une importante décroissance démographique (soit une moyenne de 3,1% alors que l'ensemble de la province a connu une augmentation de 4,3%), une faible proportion de la population âgée de moins de 35 ans, un faible taux de scolarisation et une précarité sur le plan économique (MAMR, 2008).

2.3.2 Utilisation du sol

Les données concernant l'utilisation du sol proviennent du 4^e inventaire décennal écoforestier (présentement en cours) contenu dans le Système d'information forestière par Tesselle (SIFORT) et du Système d'information écoforestière (SIEF) du MRN. Ces données nous ont été transmises par l'OBVNEBSL. Cette base de données a aussi servi à produire la carte 8 A de la couverture forestière. La légende originale comprenait 13 classes qui ont été regroupées en huit, dans le but

d'améliorer l'aspect visuel et l'utilisation de la carte 7. Par exemple tous les polygones forestiers ont été regroupés en une seule classe : forestier. Le **Tableau 2.6** qui fait état des superficies occupées par les différentes classes d'utilisation du sol montre qu'une très grande superficie du territoire à l'étude est utilisée à des fins forestières (69%) et agricoles avec potentiel forestier (23%). La zone entièrement agricole est concentrée à l'extrémité ouest de la zone dans la MRC des Basques alors que la classe agricole avec potentiel forestier s'étale sur tout le territoire. Les zones dites anthropisées se concentrent le long du fleuve, là où les bassins de population sont les plus denses (Trois-Pistoles, Rimouski, Mont-Joli et Matane). Les milieux humides qui sont estimés à 0,9% du territoire, sont eux aussi principalement localisés sur les rives du Saint-Laurent. La partie du territoire qui est occupée par la forêt augmente en allant vers le sud quand on s'éloigne du fleuve et des zones urbanisées. Les milieux non perturbés par l'activité humaine et les milieux non-forestiers représentent respectivement 0,4 et 0,3 % du territoire étudié et sont aussi situés majoritairement en bordure de l'estuaire.

Tableau 2.6. Superficie des classes d'utilisation du sol.

Classes d'utilisation du sol	superficie (km ²)	% du territoire
Forestier	2668,3	69
Non forestier	13,2	0.3
Agricole	47,5	1.2
Agricole avec potentiel forestier	899,5	23
Milieu humide	35,6	0.9
Eau	63,2	1.6
Milieu non perturbé par activité humaine	15,23	0.4
Anthropisé	106,31	2.8

Source : SIEF 4^{ème} inventaire; ARCGIS, 2010

2.3.3 Affectation du territoire

L'affectation du territoire représente la vocation prioritaire d'une ou des partie(s) du territoire. Cette dernière est définie en tenant compte de la vocation actuelle du territoire ainsi que de son développement potentiel. La détermination des grandes affectations du territoire est une partie intégrante d'un schéma d'aménagement et de développement de chaque MRC. Selon les schémas d'aménagement des quatre MRC du territoire du PACES-NEBSL, les grandes affectations sont les suivantes : agricole, agroforestière, commerciale, conservation, forestière, industrielle, récréative, résidentielle et urbaine. Ces dernières sont représentées sur la carte 10. Les données proviennent du Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du Territoire (MAMOT) et ont été fournies par l'OBVNEBSL. La carte 10 montre que les vocations agricole et forestière dominent le paysage. Naturellement, les centres urbains sont répartis le long des rives du Saint-Laurent autour des villes de Trois-Pistole, Rimouski, Mont-Joli et Matane. Le **Tableau 2.7** montre le pourcentage du territoire de chaque MRC accordé à chaque affectation. Malgré

quelques différences entre les quatre MRC, les principales affectations demeurent l'agriculture, l'agroforesterie et la foresterie.

Tableau 2.7. Les grandes affectations du territoire par MRC

Affectation	MRC des Basques		MRC Rimouski-Neigette		MRC de Mitis		MRC de Matane	
	superficie (km ²)	% du territoire	superficie (km ²)	% du territoire	superficie (km ²)	% du territoire	superficie (km ²)	% du territoire
Agricole	264,8	<u>34%</u>	434,0	<u>45%</u>	150,5	12%	506,6	<u>79%</u>
Agroforestière	393,2	<u>50%</u>	0,1	0%	364,1	<u>30%</u>	12,2	2%
Commerciale	0	0%	0,6	0%	0,4	0%	0	0%
Conservation	11,0	1%	11,8	1%	16,7	1%	0	0%
Forestière	56,7	7%	410,9	<u>43%</u>	634,1	<u>53%</u>	96,1	15%
Industrielle	6,8	1%	3,0	0%	4,9	0%	0,0	0%
Récréative	15,1	2%	41,5	4%	11,7	1%	12,9	2%
Résidentielle	24,7	3%	6,0	1%	0	0%	0,0	0%
Urbaine	15,1	2%	47,4	5%	23,8	2%	11,2	2%

*Les valeurs soulignées représentent les affectations du territoire les plus dominantes dans chacune des MRC.

Source : portrait provincial en aménagement du territoire MAMOT, ARCGIS 2010

3 ACQUISITION DE DONNÉES ET TRAVAUX RÉALISÉS

3.1 Compilation de l'information existante

La réalisation du PACES-NEBSL a débuté par la collecte et la compilation d'une large gamme d'informations contenues dans des rapports et bases de données ministériels et municipaux. Une grande quantité d'informations a aussi été recueillie lors des rencontres et entrevues réalisées avec les partenaires régionaux. Le **Tableau 3.1** détaille les sources d'informations consultées pour la réalisation du PACES-NEBSL. Une première catégorie de documents est les rapports hydrogéologiques. Ils proviennent des archives du bureau central du MDDELCC à Québec et des municipalités du territoire du PACES-NEBSL ayant déjà réalisé des recherches en eau souterraine. Une seconde catégorie de source d'information provient des forages faits par le Ministère des Transports du Québec (MTQ) via une entente entre le MTQ et le MDDELCC, ainsi que par une entente entre l'UQAR et la direction régionale du MTQ pour l'obtention de relevés de sondages géotechniques associés au prolongement de l'autoroute 20 au Bas-Saint-Laurent. Également, le Système d'information hydrogéologique (SIH) du MDDELCC a été consulté pour y extraire l'information hydrogéologique et stratigraphique correspondant à la zone d'étude. Les données climatiques du territoire constituent la troisième catégorie d'information. Le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) a fourni les données d'apports verticaux, de températures et de précipitations. Aussi, le Service de l'information sur le milieu atmosphérique MDDELCC a fourni les données climatiques des stations météorologiques de son réseau sur le territoire à l'étude. Plusieurs données du territoire (routes, limites municipales et toponymie, topographie, hydrographie, limite des bassins versants, affectation du territoire, utilisation du sol, couverture végétale, milieux humides et pédologie) nous ont été transmises par l'OBVNEBSL qui les avait obtenues pour la production de son plan directeur de l'eau (PDE).

Tableau 3.1. Source des données consultées et utilisées dans le PACES-NEBSL

Thème	Source des données	Producteur des sources
Routes, limites municipales et toponymie	Système de découpage administratif du Québec (SDA) Base de données topographique du Québec (BDTQ)	MAMOT MERN
Topographie	Base de données topographiques du Québec (BDTQ) Couverture Lidar	MERN MSP - MAMOT
Hydrographie et limite des BV	Réseau hydrographique national (RHN) Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	RnCan MERN
Description du territoire	Banque de données sur les cultures assurées (BDCA) Base de données topographiques du Québec (BDTQ) Inventaire canadien des terres humides (ICTH) Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) Système d'information écoforestière (SIEF) Portail provincial en aménagement du territoire (PPAT)	Financière Agricole du Québec MERN Canards Illimités du Canada MAMOT
Pédologie	Aménagement rural et développement de l'agriculture (ARDA) Normes de cartographie écoforestière (SIEF)	IRDA MERN
Géologie du quaternaire	Géologie des formations de surface du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie	Jean Veillette - CGC
Géologie du roc	Base de données du Système d'informations géominières (SIGEOM) Carte Géologique du Québec DV-2002-06	MERN MERN
Hydrogéologie	Réseau de suivi des eaux souterraines Système d'information hydrogéologique (SIH) Forages géotechniques Rapports hydrogéologiques	MDDELCC MTQ Consultants, Municipalités MERN, consultants, municipalités
Qualité eau souterraine et de surface	Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ) Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA)	MRN MDDELCC
Hydrométrie	Réseau hydrométrique du Québec	CEHQ - MDDELCC
Météorologie	Service de l'information du milieu atmosphérique Apports verticaux	MDDELCC CEHQ
Prélèvements eaux souterraines	Banque de données des préleveurs d'eaux souterraines Répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable Système d'information et de gestion en aménagement du territoire Enquêtes de consommation faites par le PACES	MDDELCC MAMOT Municipalités
Activités anthropiques pouvant altérer la qualité de l'eau souterraine	Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT) Répertoire des dépôts et des terrains contaminés Informations répertoriées par partenaires	MAMOT MDDELCC OBVNEBSL MRC

3.2 Travaux de caractérisation

Dix grandes campagnes de terrain ont été réalisées afin d'obtenir l'information supplémentaire nécessaire afin de caractériser l'hydrogéologie, la géochimie et la stratigraphie des formations aquifères granulaires et rocheuses du territoire. Ces campagnes de terrain, sont résumées au **Tableau 3.2** et sont décrites en détails dans les prochaines sections.

Tableau 3.2. Synthèse des travaux terrain du PACES-NEBSL

Campagnes de terrain	Dates	Synthèse
Levés sismique réflexion	Automne 2013	16 km réalisés
Forages dans l'aquifère rocheux	Automnes 2013 - 2014	7 forages de l'aquifère rocheux de 30 à 50 m
Forages dans les dépôts meubles	Étés 2013 - 2014	33 sondages et installation de 17 piézomètres
Échantillonnage eau souterraine	Étés 2013 - 2014	164 échantillons : 127 puits privés 22 puits/piézos PACES 6 résurgences 9 piézomètres réseau de suivi des eaux souterraines
Essais de perméabilité (slug test/pompage)	Automnes 2013- 2014	16 essais à charge variable 7 pompages de courte durée
Perméamètre de Guelph	Été 2013	103 relevés
Mesures niveaux piézométriques	Étés 2013-2014	198 relevés piézométriques
Suivi des nappes	2013-2014	Suivi journalier de 4 piézomètres et de 5 puits de l'aquifère rocheux.
Jaugeage des cours d'eau	2013-2014	Installation de 7 stations de jaugeage des cours d'eau non jaugés par le CEHQ et mesures des débits pour développement de courbes de tarage.
Sondages de consommation en eau souterraine	Janvier 2014	40 municipalités interrogées

3.2.1 Levés sismique

Objectifs et stratégie d'échantillonnage

Des levés sismique réflexion ont permis d'obtenir de l'information sur la structure et la caractérisation des dépôts meubles, de même que sur la topographie du socle rocheux et sa profondeur. Les emplacements des profils ont été choisis dans l'objectif d'une meilleure définition de certains contextes hydrogéologiques sur le territoire du PACES-NEBSL en employant une méthode d'acquisition en continu contrairement à une méthode ponctuelle comme les forages.

Méthodologie

Des profils sismiques de faible profondeur ont été réalisés sur un total de 16 km. La compagnie MBSM Solution Inc. a procédé à la réalisation des relevés et au traitement des données. Cette technique permet d'étudier le comportement des ondes de cisaillement (SV-SH) et de compression (P) dans le sous-sol à des profondeurs variables. Ces ondes sont envoyées à partir d'une source vibrante multidirectionnelle (**Figure 3.1A**) qui permet de balayer une plage de fréquences entre 20 et 500Hz. La réponse est ensuite mesurée par deux trains de 24 récepteurs (géophones) de 18 m de long. Les géophones peuvent échantillonner le signal de manière verticale, parallèle et transversale. Les géophones étaient espacés de 75 cm et placés en alternance (**Figure 3.1B**).

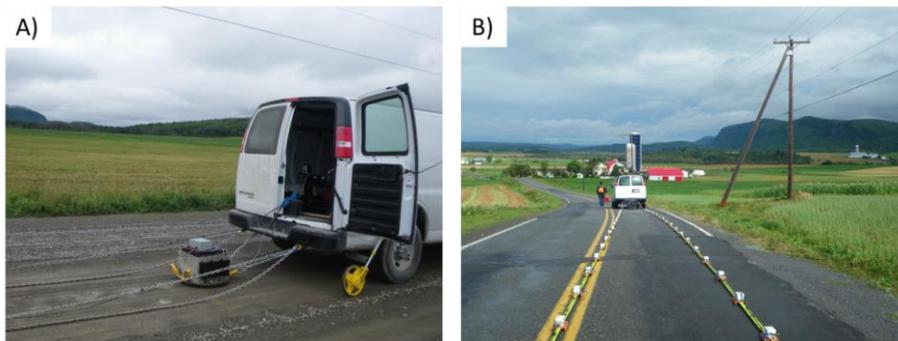


Figure 3.1. Levés sismique réflexion dans la vallée de Neigette. A) Source vibrante qui émet les ondes S et P. B) Trains de géophones (récepteurs).

Synthèse des travaux

Les levés ont eu lieu en septembre 2013. Sept profils dont la longueur varie entre 1,4 et 2,8 km ont été faits sur le delta de Trois-Pistoles à Notre-Dame-des-Neiges (2 profils), dans la vallée de la rivière Neigette (2 profils), à Sainte-Angèle-de-Mérici, à Saint-Ulric et dans la vallée de la rivière Matane (2 profils). Les profils sont positionnés sur la **Figure 3.2** alors qu'un exemple de résultat est montré à la **Figure 3.3**.

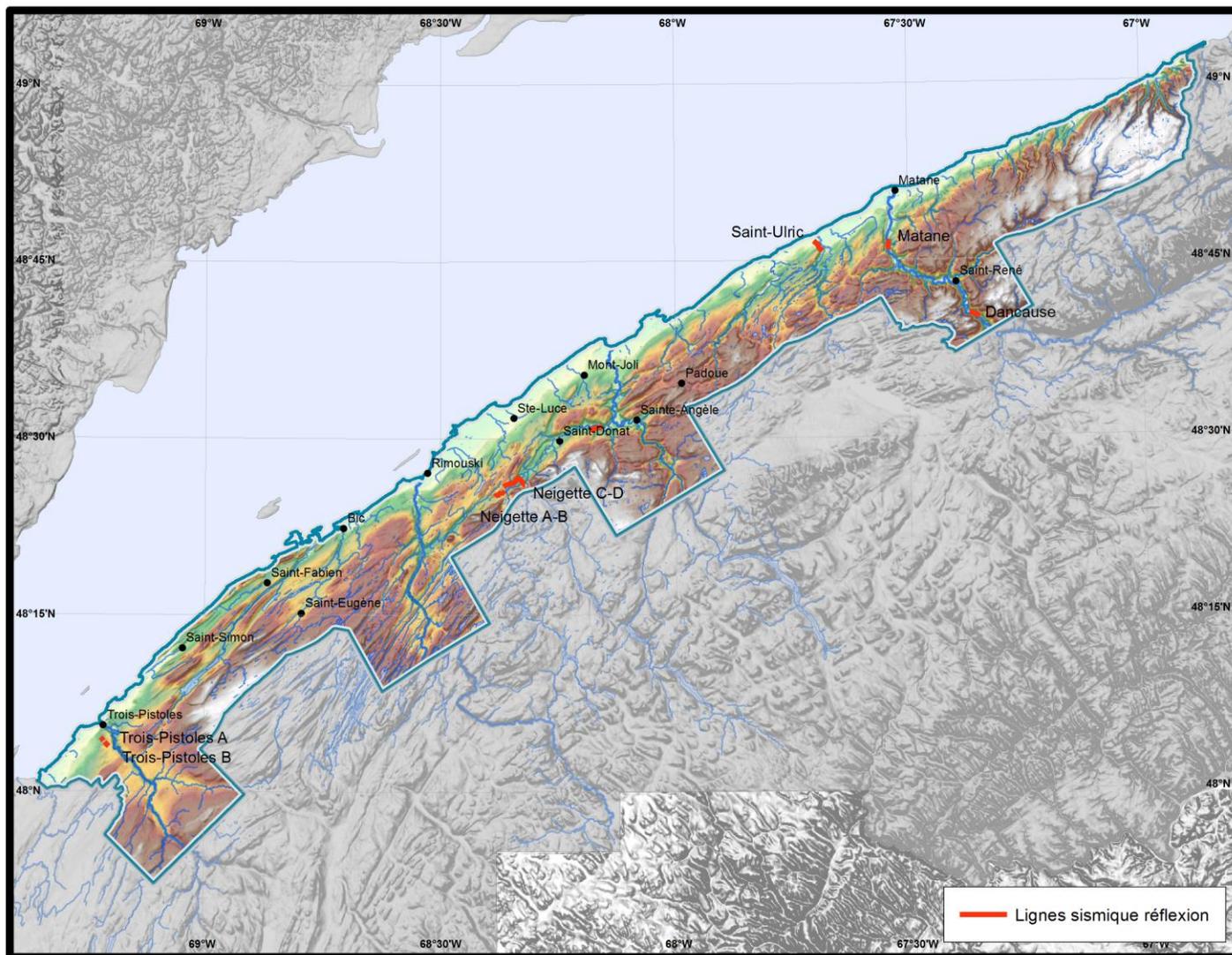


Figure 3.2 : Carte de localisation des levés sismique réflexion réalisés en septembre 2013.

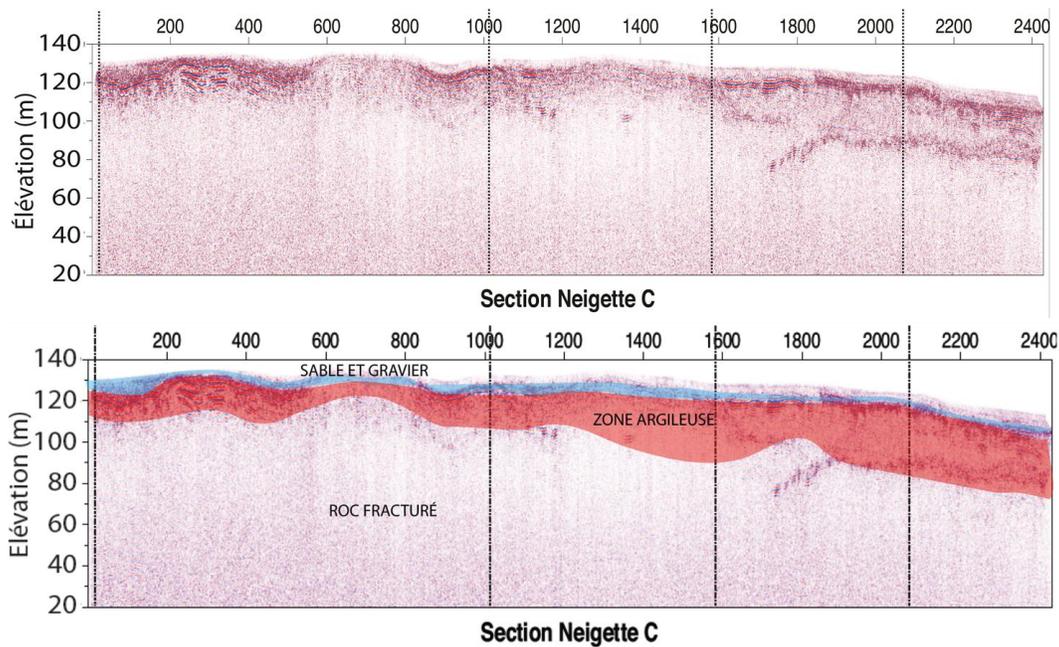


Figure 3.3 : Exemple de résultat et d'interprétation d'un levé sismique de la vallée de la rivière Neigette à Saint-Anaclet-de-Lessard.

3.2.2 Forages

Dépôts meubles

Objectifs et stratégie d'échantillonnage

Les sondages stratigraphiques visent à préciser la stratigraphie et l'épaisseur des dépôts quaternaires et à permettre l'installation de piézomètres aux endroits où les conditions hydrogéologiques étaient favorables. La localisation des sondages s'est faite de façon à combler des besoins spécifiques où l'information était insuffisante, à valider l'interprétation des données déjà compilées dans le projet ainsi qu'à bien définir les différents contextes hydrostratigraphiques du territoire. Tous les forages ont été réalisés sur des terrains privés où les autorisations avaient été préalablement obtenues.

Méthodologie

Les forages ont été réalisés en partenariat avec l'équipe de l'INRS-ETE à l'aide d'une foreuse géotechnique multifonctionnelle (Geotech605D) (**Figure 3.4**). Cette foreuse permet de travailler avec deux méthodes de forage selon les conditions hydrogéologiques attendues (Faveau, 2006). Les sondages stratigraphiques ont été faits par rotopercussion (RPSS), c'est-à-dire, en mode destructif comme une foreuse conventionnelle avec un marteau hydraulique et de l'air. Le

système RPSS produit un profil en continu des différents paramètres de forage durant l'enfoncement (pression à l'enfoncement, vitesse et pression de rotation de la tête, pression et vitesse de la percussion du marteau, pression et débit de l'air comprimé, etc.). Ces paramètres sont ensuite interprétés, en plus du jugement du foreur selon le comportement de l'équipement, pour l'identification sommaire des formations géologiques rencontrées. Ce type de sondage est utilisé d'une part pour la reconnaissance des dépôts meubles difficiles à forer (graviers, blocs, tills), mais peut aussi servir de « pré trou » pour l'installation de puits d'observation.



Figure 3.4. Sondage stratigraphique effectué en 2013 à Saint-Simon avec la foreuse géotechnique de l'INRS-ETE.

Synthèse des travaux

Deux campagnes de forages se sont déroulées au cours des étés 2013 et 2014. Au total, 33 sondages stratigraphiques ont été réalisés et 14 piézomètres ont été installés sur le territoire. En raison de la présence de matériel trop grossier, trop compact ou de till sur l'ensemble des sites, tous les sondages ont été faits en mode RPSS. Les piézomètres étaient composés d'un tube de PVC de 25,4 mm de diamètre et d'une crépine à la base où l'eau pénètre par des stries horizontales espacées de 2,5 mm ayant une ouverture de 0,15 mm. Durant les forages, des échantillons provenant des débris de forage ont été récupérés à intervalle régulier afin d'identifier la nature des dépôts meubles. La localisation des sondages est présentée à **Figure 3.6** tandis que

les descriptions stratigraphiques des sondages et les schémas de conception des piézomètres sont présentés à l'Annexe 1 (Figures 1 à 33). Une contribution financière additionnelle du MDDELCC a permis de mettre en place deux nouvelles stations de suivi du réseau de suivi des eaux souterraines dans la vallée de la rivière Mitis.

Forages conventionnels de l'aquifère rocheux

Objectifs et stratégie d'échantillonnage

Les forages conventionnels dans l'aquifère rocheux visaient à connaître les propriétés hydrauliques d'unités géologiques rocheuses représentatives du territoire, à échantillonner l'eau contenue dans ces unités pour en évaluer sa qualité et faire le suivi des variations du niveau de l'aquifère rocheux. De plus, les forages ont aussi fourni de l'information sur la stratigraphie et les épaisseurs des dépôts meubles.

Les sites ont été localisés de manière à combler les zones où les données hydrogéologiques des formations schisteuses et de shale, unités géologiques que l'on retrouve sur la grande majorité du territoire du PACES-NEBSL, étaient considérées comme insuffisantes. Plusieurs études antérieures d'approvisionnement en eau du territoire mentionnent que les formations schisteuses/shales du territoire pourraient être considérées comme des formations aquifères rocheuses peu productives et peu favorables à l'approvisionnement en eau pour une municipalité. Puisqu'elles ne sont que très peu sollicitées, à l'exception de l'alimentation en eau de puits privés, ces unités géologiques étaient donc très peu documentées. Aussi, les sites de forage étaient ciblés en partenariat avec les municipalités dépourvues de réseaux d'approvisionnement en eau souterraine et où aucune étude hydrogéologique n'avait été faite dans le passé.

Méthodologie

En septembre 2013, l'UQAR a lancé un appel d'offres ciblé pour le forage de cinq puits dans le socle rocheux (profondeur maximale : 45 m par forage). La compagnie Les Puits Artésiens Deschênes Inc. de Rivière-Ouelle a été mandatée pour la réalisation des travaux. Les travaux de forage se sont déroulés en novembre 2013 à l'aide d'une foreuse conventionnelle de type rotoperçussion (**Figure 3.5**). Les puits ont tous été construits à l'aide d'un tubage d'acier ASTM A589-96 grade B de 150 mm mis en place jusqu'à une profondeur minimale de 1 m dans le roc. Dans le cas où l'épaisseur des dépôts meubles était inférieure à la longueur standard du tubage (6 m), ce dernier était enfoncé dans le roc sur les cinq premiers mètres et scellé avec une collerette de bentonite. Afin de respecter les exigences réglementaires en vigueur (Règlement sur le captage des eaux souterraines), le diamètre du forage sur les cinq premiers mètres était de 254 mm alors qu'il était de 150 mm une fois dans le roc.



Figure 3.5. Forage de l'aquifère rocheux dans la municipalité de Saint-Éloi

Synthèse des travaux

Cinq forages ont été faits dans les municipalités de Saint-Éloi, Notre-Dame-des-Neiges, Saint-Eugène-de-Ladrière, Sainte-Luce et Padoue. Avec la contribution financière additionnelle du MDDELCC deux autres forages de l'aquifère rocheux ont été faits à proximité de la ligne de rivage, à Notre-Dame-des-Neiges et à Baie-des-Sables. Ces puits additionnels permettent d'augmenter le nombre de puits faisant parti du Réseau de suivi des eaux souterraines. Le **Tableau 3.3** résume les détails de construction des puits. Durant les forages, des échantillons provenant des débris de forage ont été récupérés à intervalles réguliers afin d'identifier la nature des dépôts meubles et du socle rocheux. Chacun des puits a permis d'analyser la qualité de l'eau souterraine, d'effectuer des essais de pompage de courte durée pour obtenir les paramètres hydrauliques et d'installer des capteurs de pression permettant de faire le suivi des variations journalières du niveau de la nappe à la fréquence d'une lecture à toutes les six heures. La carte de localisation des forages apparaît à la **Figure 3.6** et les schémas de construction de tous les puits sont illustrés à l'Annexe 2 (Figures 34 à 38).

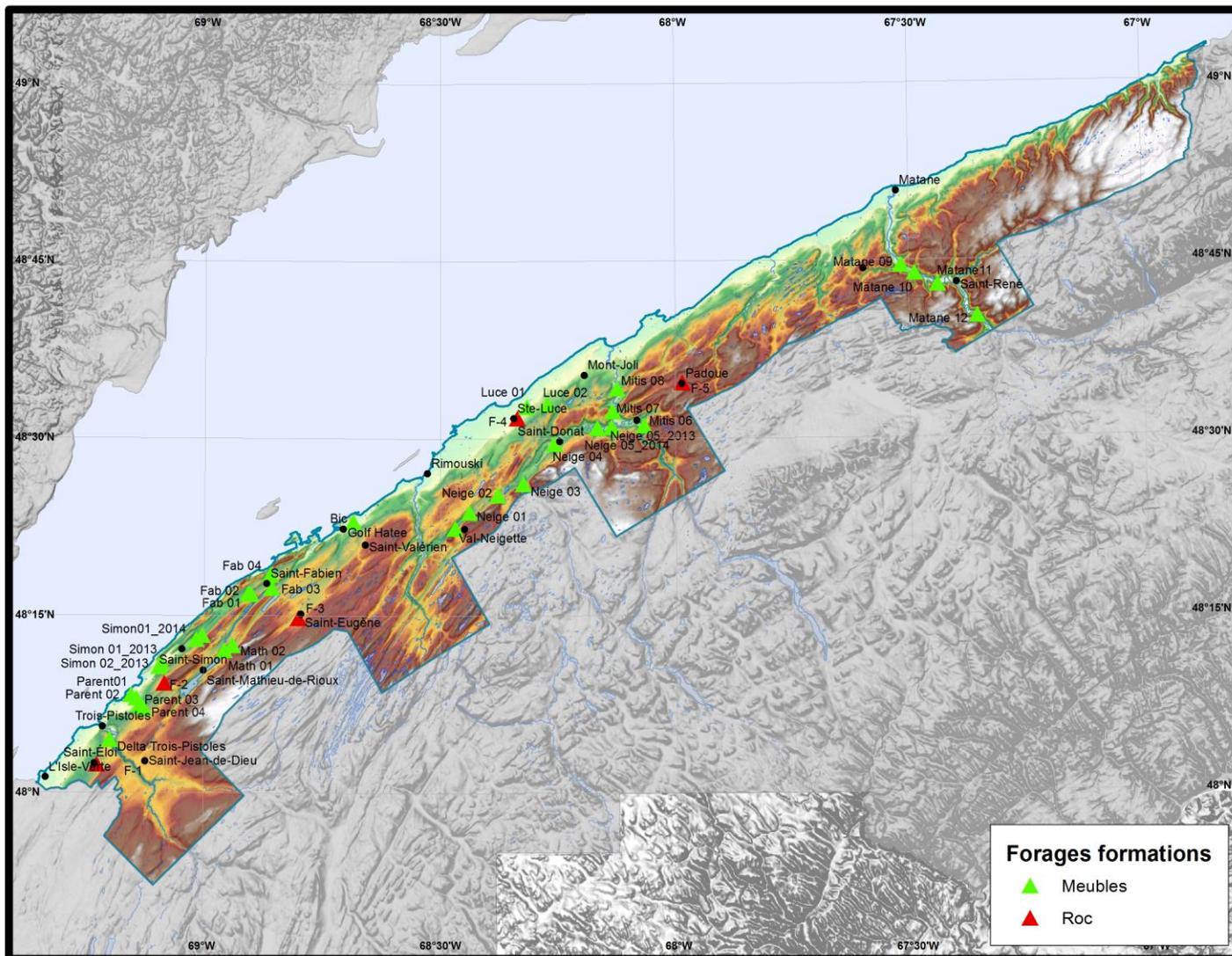


Figure 3.6 : Localisation des forages réalisés par le PACES-NEBSL.

Tableau 3.3. Détails de construction des forages dans le roc

Forage	Municipalité	Prof. (m)	Prof. Roc (m)	Lithologie	Niveau statique(m)
F-1	Saint-Éloi	45,8	15,89	Schiste noir	9,82
F-2	Notre-Dame-des-Neiges	45,72	0,91	Schiste	6,66
F-3	Saint-Eugène-de-Ladrière	30,5	0,91	Schiste ardoisier/grès	2,92
F-4	Sainte-Luce	45,7	5,18	Schiste noir	2,19
F-5	Padoue	45,7	Affleurant	Schiste noir	1,04

3.2.3 Échantillonnage d'eau souterraine et de pluie

Objectifs et stratégie d'échantillonnage

L'objectif premier de ces travaux était d'établir un portrait actuel de la qualité de l'eau du territoire selon les critères de potabilité du Gouvernement du Québec et des normes de Santé Canada. Ces travaux visaient aussi à identifier les différents types/groupes d'eau se trouvant sur le territoire et analyser la présence ou l'absence de liens entre ces types/groupes d'eau, la géologie, le type d'aquifère, la profondeur (à laquelle l'eau a été prélevée), la proximité de l'estuaire, etc. Finalement, l'échantillonnage d'eau souterraine avait pour but de mieux cerner les processus géochimiques, la dynamique de recharge et le temps de résidence de l'eau dans les unités aquifères du nord-est du Bas-Saint-Laurent. Afin d'établir des comparatifs entre l'eau des précipitations et l'eau souterraine, quatre stations pluviométriques ont été déployées au printemps 2014 (Notre-Dame-des-Neiges, Rimouski en bord de mer, Saint-René-de-Matane, Rimouski sur le terrain de l'UQAR). Cet échantillonnage avait pour objectif d'établir une droite météorique locale préliminaire pour le nord-est du Bas-Saint-Laurent en analysant les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$). Six échantillons ont aussi été pris dans les rivières Bic, Sud-Ouest, Porc-Pic, Neigette (Saint-Mathieu-de-Rioux), Neigette (Sainte-Angèle-de-Mérici) et Mitis, à l'étiage à des fins de comparaison avec les échantillons d'eau souterraine et de précipitation.

Méthodologie

Lors de la première phase d'échantillonnage en 2013, la méthodologie établie pour le choix des sites d'échantillonnage consistait à créer une grille de 122 cellules de 33 km² chacune, qui fut superposée à la carte du territoire PACES-NEBSL. L'idée était de prélever un échantillon par cellule de manière à couvrir la totalité du territoire. Dans un premier temps, les sites visés pour l'installation de piézomètres, les sites de résurgences potentielles et les puits appartenant au réseau de suivi du MDDELCC ont tous été localisés. Ensuite, tous les puits inscrits dans le Système d'information hydrogéologique (SIH) ayant été installée depuis 1995 ont été répertoriés.

Rapidement, il fut établi qu'il serait impossible d'échantillonner un puits par cellule étant donné qu'une grande partie du territoire est inhabitée; ces sections ont donc été exclues de la grille d'échantillonnage. De plus, la base de données du SIH étant incomplète (le téléphone, le nom ou l'adresse étant souvent absents), une cinquantaine de puits seulement a pu être répertoriée à partir de cette base de données. Les autres puits ont été trouvés en faisant du porte-à-porte dans les zones préalablement ciblées pour totaliser les 122 échantillons prévus pour cette première campagne d'échantillonnage. La seconde phase d'échantillonnage qui eut lieu en 2014 a été planifiée pour retourner dans des zones où l'information était manquante soit à cause de porte-à-porte infructueux en 2013 ou encore d'un bilan ionique inadéquat sur les échantillons de 2013, ce qui implique que l'échantillon est inutilisable pour les analyses statistiques. Cette fois-ci, la méthode employée pour l'échantillonnage de puits privés fut uniquement le porte-à-porte. De façon à standardiser la prise d'échantillons, nous avons suivi le protocole d'échantillonnage de l'eau souterraine de Blanchette et al. (2010). Les puits ont été purgés jusqu'à la stabilisation des paramètres physico-chimique (pH, température, salinité, conductivité et DO%). Ces derniers étaient mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multi paramètres YSI (modèle : 600LS). Généralement, l'échantillon était pris directement dans le puits à l'aide d'une pompe péristaltique ou de type Tornado. Lorsque le puits était inaccessible, l'échantillon était pris au robinet, en s'assurant au préalable qu'aucun système de traitement n'était présent entre le puits et le robinet. Dans le cas de puits abandonnés ou peu utilisés, le volume du puits était purgé de trois à cinq fois. L'eau échantillonnée était filtrée à l'aide de filtres jetables en nitrocellulose de 0,45 µm ou de filtres Waterra haute capacité (FHT) dans des bouteilles de 125 ml fournies par le laboratoire (Maxxam Analytique Inc.) qui contenaient des agents de conservation (**Figure 3.7**). Les échantillons étaient ensuite gardés au frais (4°C ou moins) puis envoyés chez Maxxam à Montréal pour les analyses. Les paramètres analysés en laboratoire ainsi que ceux mesurés *in situ* avec la sonde multi-paramètres sont décrit ci-dessous :

- **Anions** : Chlorures (Cl), Bromures (Br), Sulfates (SO₄), Nitrates, nitrites (N-NO₂ et N-NO₃), Fluorures (F);
- **Nutriments** : Azote ammoniacal (N-NH₃), Phosphore total inorganique (P_{ino});
- **Métaux** : Aluminium (Al), Lithium (Li), Antimoine (Sb), Magnésium (Mg), Argent (Ag), Manganèse (Mn), Arsenic (As), Molybdène (Mo), Baryum (Ba), Nickel (Ni), Béryllium (Be), Potassium (K), Bismuth (Bi), Plomb (Pb), Bore (B), Sélénium (Se), Calcium (Ca), Silicium (Si), Cadmium (Cd), Sodium (Na), Chrome (Cr), Strontium (Sr), Cobalt (Co), Titanium (Ti), Cuivre (Cu), Uranium (U), Étain (Sn), Vanadium (V);
- **Sulfures** : Sulfure (S²⁻);
- **Paramètres inorganiques (in situ)** : Température, pH, conductivité, salinité, oxygène dissous.



Figure 3.7 : Utilisation d'un filtre Watterra haute capacité lors de l'échantillonnage d'eau du puits du réseau de suivi des eaux souterraines à Notre-Dame-des-Neiges.

La majorité des échantillons (109 échantillons sur 163) proviennent de l'aquifère rocheux alors que les 54 autres proviennent de puits aménagés dans des dépôts granulaires dont la moitié sont des puits de surface.

Lors de l'échantillonnage de l'eau souterraine, 123 (83 en 2013, 40 en 2014) prélèvements ont aussi été faits pour l'analyse des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) dans des bouteilles HDPE de 30 ml sans filtration puis conservés à température pièce jusqu'au moment de leur analyse au laboratoire d'isotopes stables et légers du GEOTOP de l'UQAM. L'analyse est effectuée en EA-IRMS et les résultats sont standardisés contre le standard VSMOW.

$\delta^{18}\text{O}$ eau exprimé en ‰ vs VSMOW ($\pm 0,05\text{‰}$ à 1σ)

$\delta^2\text{H}$ eau exprimé en ‰ vs VSMOW ($\pm 1\text{‰}$ à 1σ)

Le $\delta^{13}\text{C}$ fut aussi analysé pour 74 puits (33 en 2013 et 35 en 2014). L'eau fut prélevée dans des bouteilles ambrées de 250 ml et piégée par du chlorure de mercure (HgCl_2) afin de permettre la conservation des échantillons. Les analyses du $\delta^{13}\text{C}$ ont été faites à l'UQAR sur le carbone

inorganique dissous contenu dans les échantillons. Avant d'entreprendre les analyses, de l'acide phosphorique (H_3PO_4) est injecté à l'échantillon pour permettre la transformation des carbonates dissous en CO_2 ainsi que leur dégazage. Le gaz de l'échantillon est ensuite analysé à l'aide du GC-MS qui permet de détecter les concentrations de CO_2 contenant du ^{13}C et celles contenant du ^{12}C . Le ratio $^{13}C/^{12}C$ calculé est ensuite converti en valeur de $\delta^{13}C$ selon une droite de calibration faite avec des standards de $\delta^{13}C$ connus. Ces standards ont préalablement été dosés en phase particulaire sur un IRMS au laboratoire du CAIR de l'UQAR et en phase dissoute sur un EA-IRMS au Géotop.

Pour l'analyse de la géochimie de l'eau de pluie, les précipitations ont été collectées dans des réservoirs dont la construction fut adaptée des modèles développés par Gröning et al. (2012) et la International Atomic Energy Agency (2002) (**Figure 3.8**). Les précipitations ont été mensuellement échantillonnées, permettant ainsi d'obtenir des échantillons cumulatifs des précipitations du mois de mai au mois d'octobre 2014. Les stations ont été installées à des altitudes différentes: Notre-Dame-de-Neiges (191m), Rimouski en bord de mer (10m), Saint-René-de-Matane (56m), Rimouski sur le terrain de l'UQAR (42m). Les isotopes stables de l'eau, $\delta^{18}O$ et δ^2H , ont été analysés en EA-IRMS au GEOTOP. Des échantillons de neige provenant de la station de Saint-René-de-Matane ont aussi été recueillis et analysés à la fin de l'hiver 2014.



Figure 3.8. Conception des collecteurs d'eau de pluie utilisés dans le PACES-NEBSL.

Synthèse des travaux

Deux campagnes d'échantillonnage d'eau souterraine ont été réalisées durant le projet. La première campagne a eu lieu l'été 2013 et 122 puits ont été échantillonnés. La seconde qui a eu lieu à l'été 2014 a permis d'ajouter 42 puits additionnels. Ces deux périodes d'échantillonnage ont permis de prélever l'eau de 127 puits de particuliers, des 22 piézomètres installés durant le projet, de neuf puits appartenant au Réseau de suivi sur les changements climatiques, dont quatre ont été installés durant le projet ainsi que six résurgences. Ces campagnes d'échantillonnage ont aussi permis la collecte de 23 échantillons de précipitations (liquide et solide) et de six échantillons d'eau de rivière à l'étiage. La localisation des points d'échantillonnage d'eau souterraine et d'eau de pluie est présentée à la **Figure 3.9**.

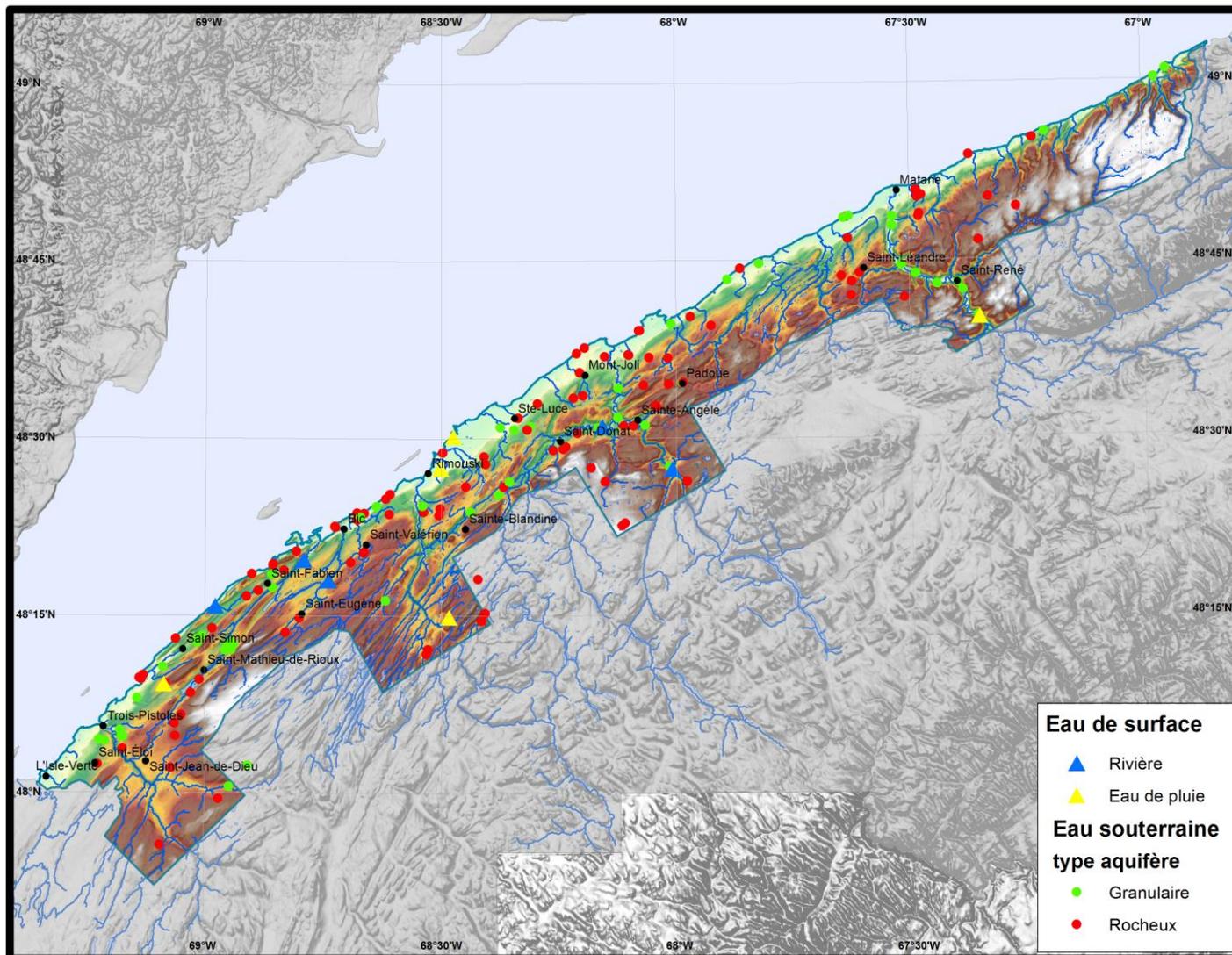


Figure 3.9 : Localisation des points d'échantillonnage d'eau souterraine et de pluie des campagnes d'échantillonnage de 2013 et de 2014.

3.2.4 Estimation des propriétés hydrauliques

Objectifs et stratégie d'échantillonnage

La connaissance des propriétés hydrauliques des formations géologiques est essentielle dans le cadre d'une étude de caractérisation hydrogéologique puisqu'elles permettent de quantifier les écoulements souterrains. Parmi ces propriétés, on retrouve la transmissivité (T) et la conductivité hydraulique (K) qui peuvent être déterminées à partir de différentes méthodes selon les types d'aquifères. Puisque les formations schisteuses du territoire étaient considérées comme des formations aquifères peu productives, donc peu favorables à l'approvisionnement d'une municipalité, ces formations géologiques étaient très peu documentées. L'obtention de la conductivité hydraulique du milieu non-saturé (K_{fs}) à l'aide du perméamètre de Guelph permet de caractériser la perméabilité des différents types de dépôts de surface et de renseigner sur la vulnérabilité et la recharge des aquifères. Les sites ont été ciblés de manière à procurer une couverture complète des différents types de dépôts quaternaires du territoire.

Méthodologie

Pour les aquifère rocheux, les essais de pompage ont été employés (**Figure 3.10**). Les essais ont été réalisés à l'aide d'une pompe submersible conventionnelle et à l'aide d'une pompe Waterra Tornado compte tenu de la faible productivité de l'aquifère rocheux. Les essais de pompage conventionnels de longue durée (72 hrs) n'étaient pas envisageables en raison de la faible productivité des puits. Des paliers variant de 40 à 120 min à des débits variant entre 4 et 36 L/min ont alors été réalisés dépendamment de la productivité du roc.



Figure 3.10 : Réalisation d'un essai de pompage dans le puits de Saint-Eugène-de-Ladrière en novembre 2013.

Pour les formations meubles, les essais à charge variable ont permis d'obtenir rapidement et avec peu d'équipement une bonne estimation de la conductivité hydraulique du milieu saturé (K). Les essais à charge variable ("slug tests") sont beaucoup plus courts à réaliser et demandent beaucoup moins de logistique matériel que les essais de pompage conventionnels et permettent tout de même d'obtenir une bonne estimation de la conductivité hydraulique locale. Ce type d'essai est dit ponctuel, car contrairement aux essais de pompage, il ne permet que de caractériser des horizons perméables limités du fait que la zone affectée par le déplacement du volume d'eau est restreinte.

Deux méthodes ont été utilisées pour réaliser les essais à charge variable (**Figure 3.11**). La première était la méthode pneumatique qui consistait à sceller le piézomètre, à augmenter la pression sur la colonne d'eau afin de faire descendre le niveau d'eau et à relâcher la pression, ce qui avait pour effet de provoquer un rabattement du niveau de l'eau dans le piézomètre. La seconde méthode consistait à immerger rapidement un "slug" dans le piézomètre et à le retirer une fois la charge revenue à son niveau initial. Avec cette méthode, des essais de chute et de remontée ont été réalisés. Pour les deux méthodes, une sonde de pression (de type Hobo ou

Solinst) était au préalable immergée au fond du piézomètre afin de mesurer en temps réel les variations de niveau d'eau à l'intérieur du piézomètre.



Figure 3.11 : Réalisation d'essais à charge variable. A) Méthode pneumatique avec une pompe à vélo; B) Méthode conventionnelle d'insertion d'un «slug».

Pour déterminer la conductivité hydraulique du milieu non-saturé (K_{fs}), des essais de perméabilité à l'aide du perméamètre de Guelph ont été faits (**Figure 3.12**). La méthode consiste à mesurer un débit d'infiltration constant de l'eau dans un sol non saturé par le maintien d'un niveau d'eau (charge constante). L'eau injectée dans le milieu non saturé par le maintien d'une charge constante parvient à saturer localement le milieu et c'est à ce moment que le débit d'infiltration devient constant.

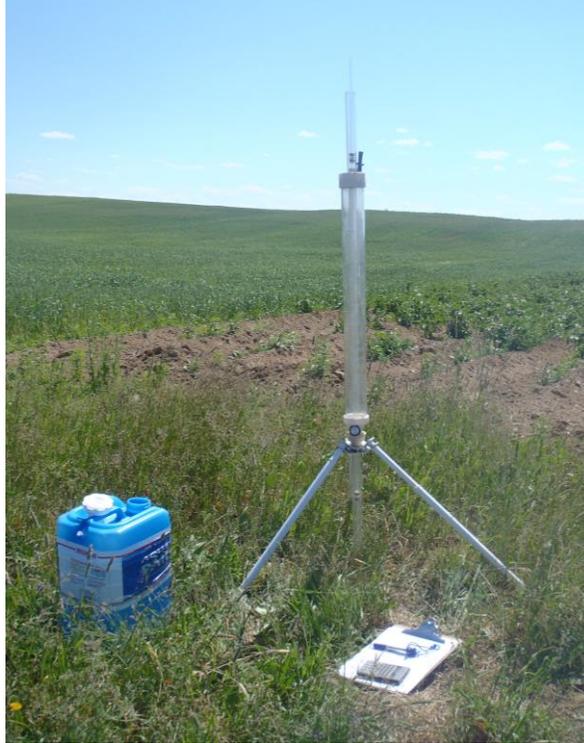


Figure 3.12 : Réalisation d'un essai au perméamètre de Guelph à Trois-Pistoles en juillet 2014.

Synthèse des travaux

Les essais de pompage ont été effectués en novembre 2013 dans sept puits de l'aquifère rocheux. Les puits qui ont été pompés sont les cinq puits forés par le PACES-NEBSL, le puits d'un particulier et le piézomètre de la station 02200001 du Réseau de suivi des eaux souterraines du MDDELCC à Saint-Narcisse-de-Rimouski. Les essais à charge variable ont été effectués dans les 14 piézomètres installés par le PACES-NEBSL, ainsi que dans les deux stations du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec présentes sur le territoire (stations 2167001 et 2000002) installées dans les dépôts meubles. Pour ce qui est des relevés de perméamètre de Guelph, 103 relevés ont été faits dans tous les types de dépôts de surface. La **Figure 3.13** montre la localisation de tous ces essais hydrauliques effectués en 2013 et 2014.

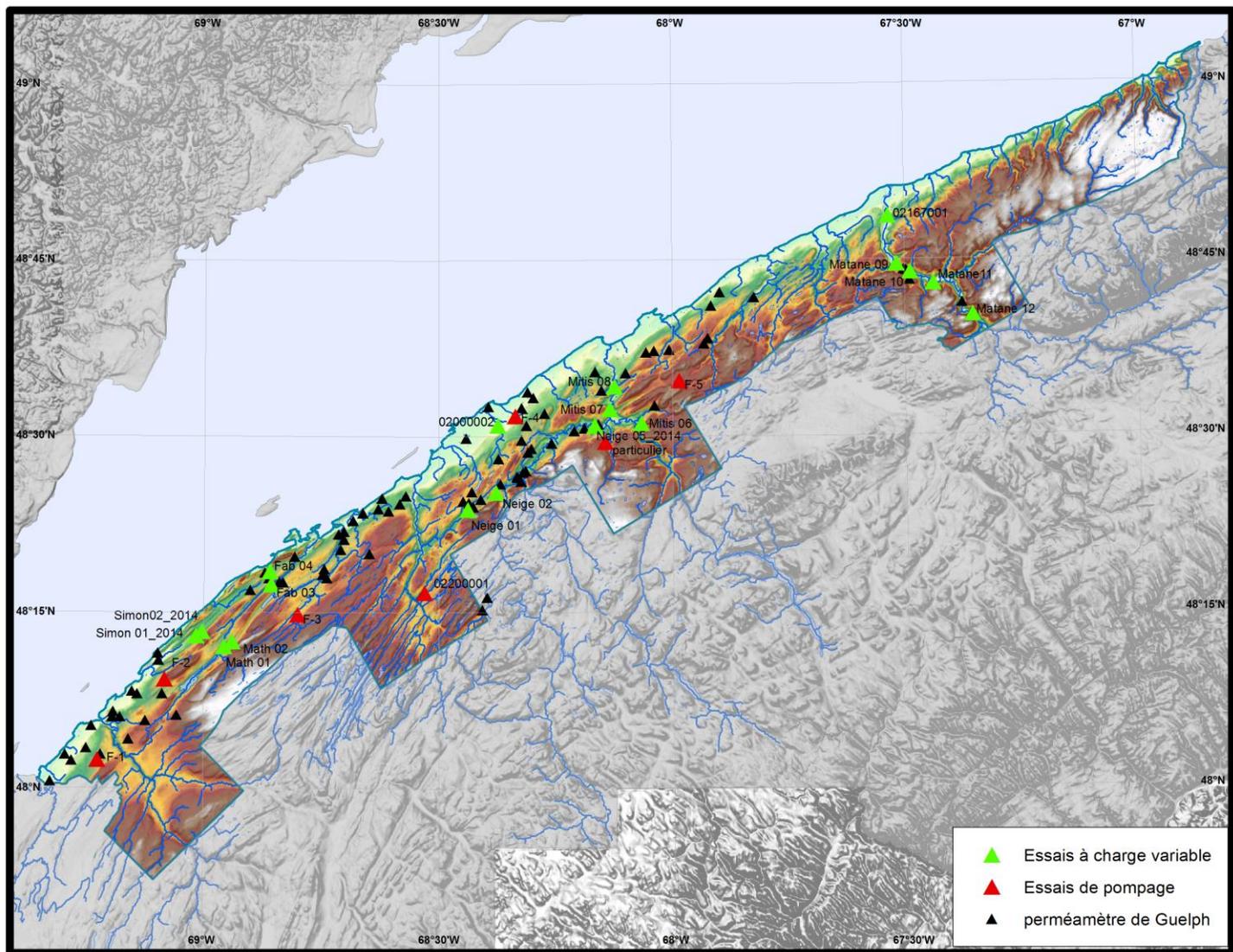


Figure 3.13 : Localisation de tous les essais hydrauliques réalisés dans le cadre du PACES-NEBSL.

3.2.5 Niveaux piézométriques

Objectifs et stratégie d'échantillonnage

Les niveaux d'eau mesurés lors de l'échantillonnage des puits de particuliers et des piézomètres mis en place par le PACES-NEBSL ont été intégrés à la base de données pour la réalisation de la carte des écoulements souterrains. De plus, le suivi des niveaux d'eau dans le temps permet de comprendre la dynamique des aquifères et de contribuer à la quantification de la recharge des aquifères.

Méthodologie

Les niveaux d'eau ont été mesurés à l'aide d'une sonde à niveau Héron. La position de chaque puits a été relevée au GPS et l'élévation extraite à partir du modèle d'élévation numérique. L'utilisation de capteurs de pression dans les puits/piézomètres a permis d'obtenir la charge hydraulique et la température à tous les six heures. Le suivi temporel des niveaux d'eau a été fait à partir de capteurs de pression de type Hobo U20 et de Solinst Levellogger Edge.

Synthèse des travaux

Un total de 198 niveaux d'eau a été mesuré durant la durée du projet. Quatre forages dans l'aquifère rocheux ont été munis de capteurs de pression alors que dans les dix piézomètres aménagés dans les dépôts meubles, quatre ont été équipés de sondes de pression.

3.3 Saisie, validation et archivage des données

Au cours de la phase I du projet, les données compilées des rapports hydrogéologiques étaient colligées dans une base de données PostgreSQL dont l'architecture avait été développée par l'INRS. Pour diverses raisons, un transfert vers une base de données Access qui conserve la structure de la base PostgreSQL et qui respecte les exigences du MDDELCC a été effectué à partir du printemps 2013.

Pour saisir les données hydrogéologiques compilées, 16 formulaires de saisie ont été développés à l'UQAR. Le **Tableau 3.4** présente la liste de ces formulaires de saisie et sur la **Figure 3.14** on peut voir deux exemples de formulaires. Plus de 100 rapports hydrogéologiques de consultants et de ministères ont été compilés et intégrés dans la base de données. Avec l'ensemble de l'information provenant des rapports hydrogéologiques, des bases de données déjà existantes (SIH, MTQ), et de l'ensemble des données acquises durant le projet, la BD-NEBSL contient plus de 8000 objets associés à la géochimie, à la stratigraphie et à l'hydrogéologie. Le **Tableau 3.5**

résume le nombre de forages compilés dans la BD-NEBSL alors que la **Figure 3.15** montre la distribution de ces points.

Tableau 3.4. Liste des 16 formulaires de saisie de la BD-NEBSL.

Formulaires de saisie de la BD-NEBSL	
1. Localisation de l'objet	9. Perception de la qualité de l'eau
2. Propriétaire	10. Niveau d'eau
3. Margelle (puits)	11. Stratigraphie
4. Captage (puits)	12. Échantillonnage d'eau
5. Infrastructures (puits)	13. Qualité d'eau échantillonnée
6. Activité(s) polluante(s)	14. Analyse d'eau échantillonnée
7. Essais de pompage	15. Résultats d'analyses d'eau échantillonnée
8. Observation (s)	16. Résultat <i>in situ</i> de l'eau échantillonnée

Tableau 3.5. Synthèse des forages intégrés à la base de données

Base de données	Sources	Nombre
Système d'information hydrogéologique (SIH)	MDDELCC	4043
Ministère du Transport	MTQ	242
Rapports hydrogéologiques	Consultants et gouvernementaux	286
Travaux terrain	PACES-NEBSL	37
Réseau de suivi des eaux souterraines	MDDELCC	8
TOTAL		4616

A) **NEBSL 5079** Utilisateur obj_id NEBSL5079 Recherche un enregistrement Fermer formulaire
 obj_update 2014-01-16 loc_id loc_nebsl5079

Type d'objet Description Observation
 Nom original
 Niveau de diffusion Enregistrer Modifier

Localisation Propriétaire Margelle Puits_Captage Puits_infra Activités polluantes

Localisation obj_id NEBSL5079 idloc_nuin Loc_id loc_nebsl5079

Sélectionner une référence Titre Auteur ref_id

Coordonnées

Projection Zone Modifier
 Coord X m E Source (X, Y) Enregistrer les modifications
 Coord Y m N
 Coord Z m Source (Z)

Numéro de photo aérienne

Municipalité

B) **terrain_tbl_log_strat** Fermer formulaire

strat_id strat_obs_name_id

Séquence Objet_id

De E M strat_munsell
 À E M

Description Modifier
 Enregistrer modifications

Fiabilité de l'information

Facies

Dominant
 Secondaire
 Tertiaire
 Quatre
 Cinq
 Six

Ajouter la nouvelle stratigraphie
 Vider les champs

SelectLogStrat					
Séquence	De (m)	À (m)	Dominant	ame_id	strat_id
1	0 m	4 m	q_S1	<input type="text" value="111"/>	<input type="text" value="276"/>
2	4 m	8,3 m	q_F1	<input type="text" value="111"/>	<input type="text" value="277"/>
3	8,3 m	25 m	q_R	<input type="text" value="111"/>	<input type="text" value="278"/>

Enr : 1 sur 3 | Aucun filtre | Rechercher

Contrôle à supprimer. À vérifier.

Figure 3.14. Exemples de formulaire de saisie de la BD-NEBSL A) formulaire de localisation de l'objet B) formulaire d'observation pour la stratigraphie.

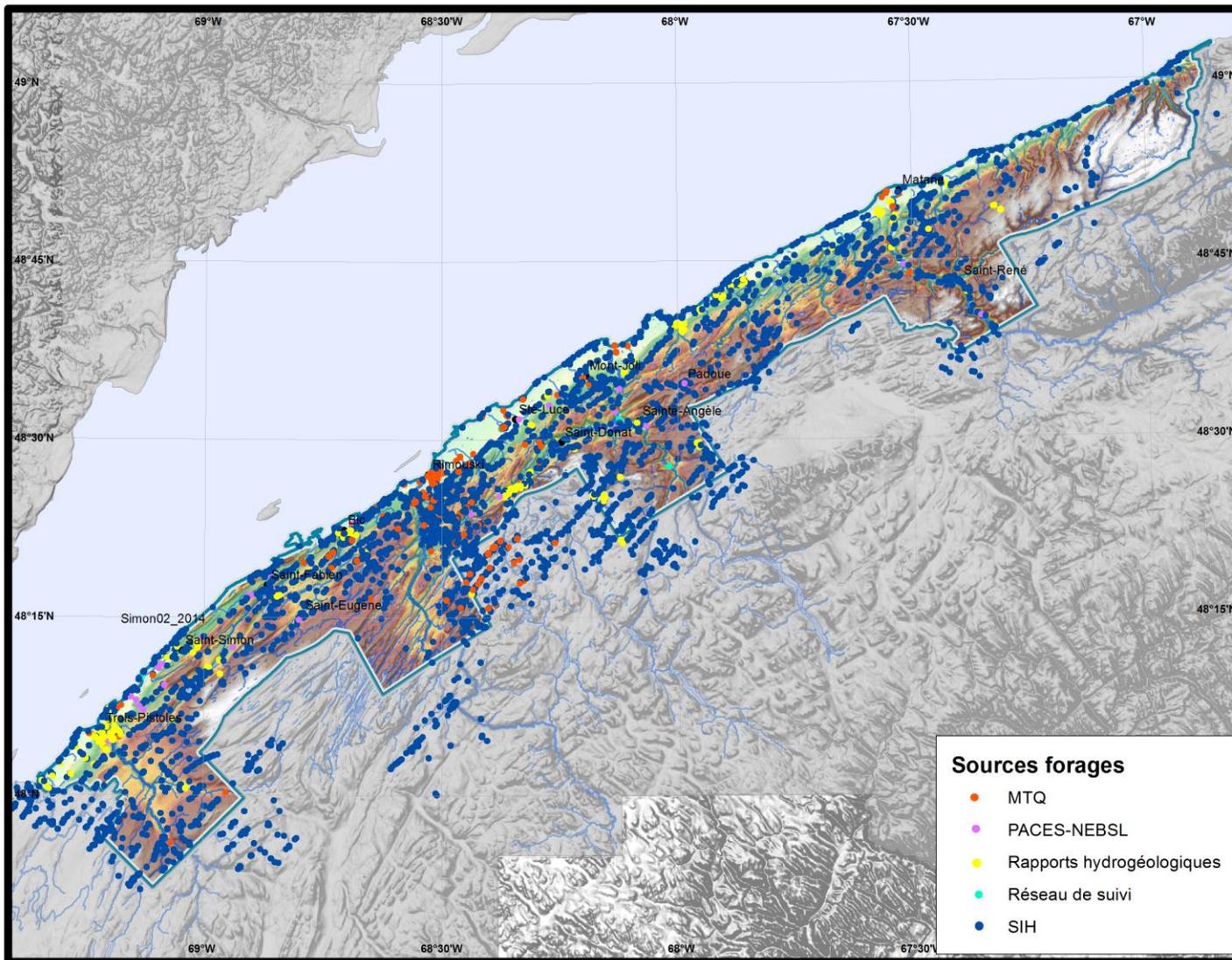


Figure 3.15 : Localisation de tous les forages saisis dans la BD-NEBSL.

3.4 Rencontres et formations avec les partenaires

Plusieurs rencontres et formations destinées aux acteurs de l'aménagement du territoire du NEBSL ont été organisées afin d'élaborer une stratégie de transfert des connaissances hydrogéologiques du programmes PACES. Une première série de rencontres avait déjà eu lieu à l'automne 2012 avec tous les partenaires du projet. Ce premier contact avait permis de présenter le projet ainsi que d'entamer le dialogue avec les partenaires afin de pouvoir cerner les enjeux, problématiques et besoins sur le territoire à l'étude. En juin 2013, une deuxième série de rencontres s'est déroulée dans les quatre MRC partenaires au projet. Ces nouvelles rencontres avaient pour but de faire un bilan de la *phase I* ainsi que de faire la présentation des travaux terrain qui se dérouleraient sur leur territoire durant l'été et l'automne 2013. Finalement, durant la dernière phase du projet, deux formations ont été données par l'équipe du PACES-NEBSL. La première à la demande de l'OBV Matapédia-Restigouche fut donnée lors de leur Assemblée Générale. La deuxième s'est déroulée à l'UQAR et avait pour but d'informer les partenaires sur les notions de bases en hydrogéologie ainsi que sur la réglementation relative aux eaux souterraines. Le **Tableau 3.6** résume les activités auxquelles l'équipe a participé entre 2012 et 2015 afin de présenter et donner une visibilité au PACES-NEBSL.

Tableau 3.6. Synthèse des activités auxquelles l'équipe du PACES-NEBSL a participé durant le projet.

Activité	Date
Première présentation du projet aux partenaires PACES-NEBSL dans les MRC des Basques, de la Matanie, de la Mitis et de Rimouski-Neigette.	Automne 2012
Rencontre avec L'OBVNEBSL, la CRÉ, le CRE et le comité ZIP pour présenter le projet	Automne 2012
Présentation du PACES-NEBSL au colloque du RQES lors de l'ACFAS 2013.	7 mai 2013
Présentation du projet PACES-NEBSL à l'Assemblée des membres du Conseil régional de l'environnement du Bas-Saint-Laurent.	29 mai 2013
Rencontre avec la direction régionale du MTQ pour discuter de l'obtention de données de forage sur le territoire du PACES-NEBSL.	10 juin 2013
Présentation aux partenaires de l'avancement du PACES-NEBSL ainsi que des résultats des travaux terrain de l'été 2013 dans les MRC des Basques, de la Matanie, de la Mitis et de Rimouski-Neigette.	11-12-13 et 17 juin 2013
Présentation du PACES lors d'une soirée d'information sur le marais salé de Cap-Marteau organisée par le comité ZIP du sud de l'estuaire et l'OBVNEBSL.	24 octobre 2013
Présentation d'une affiche du PACES-NEBSL au carrefour des géosciences et des ressources minières Québec Mines.	17 novembre 2013
Présentation du PACES-NEBSL lors d'un midi des sciences organisé à l'UQAR.	26 novembre 2013
Participation à une journée d'information et de discussion organisé par le MAPAQ sur les thèmes de la qualité de l'eau, de l'air, des sols, de la santé humaine et la préservation de la biodiversité en lien avec l'agriculture.	10 décembre 2013
Participation à une rencontre entre la municipalité, les producteurs agricoles et les clubs conseil en agroenvironnement de Sainte-Luce pour une concertation sur la mise en œuvre du plan de protection de l'eau potable de la municipalité de Sainte-Luce tout en conservant les activités agricoles.	11 mars 2014
Présentation du PACES-NEBSL lors d'une journée d'information sur la protection de l'eau et de la biodiversité en milieu agricole à l'intention des producteurs agricoles, organisée par l'UPA et le MAPAQ.	19 mars 2014
Organisation d'une journée sur les eaux souterraines dans le cadre d'un cours de cycle supérieur de gestion des ressources hydriques du programme de maîtrise en géographie de l'UQAR. Durant la journée, il y a eu des présentations des étudiants du cours sur la gestion de l'eau souterraine au Québec et à l'internationale, une présentation aux partenaires de Roxane Lavoie sur le développement de l'outil ATES pour l'intégration de l'eau souterraine dans la planification territoriale et une autre sur l'avancement des travaux du PACES-NEBSL.	27 mars 2014
Formation en hydrogéologie donnée aux partenaires du projet par Renald McCormack	10 juin 2014
Formation en hydrogéologique et présentation du PACES-NEBSL à l'AGA de l'OBV de Matapédia	12 juin 2014

4 CONTEXTES GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

La combinaison de la géologie et de la caractérisation hydrogéologique représente l'approche appropriée pour la représentation régionale des aquifères rocheux et granulaires. Cette approche nécessite une synthèse des connaissances géologiques des unités rocheuses et des sédiments quaternaires qui les recouvrent. Le cadre géologique et l'architecture stratigraphique des dépôts quaternaires doivent être bien établis pour permettre une cartographie fiable et adéquate des propriétés hydrauliques à l'échelle régionale.

Dans l'optique d'une caractérisation hydrogéologique régionale, il est essentiel de décrire les formations géologiques rocheuses offrant une grande variété de productivité hydraulique de par leur porosité et leur perméabilité. La porosité primaire comprend tous les pores développés lors de la formation de la roche (espaces inter-granulaires). Une forte porosité primaire n'entraîne pas automatiquement une grande perméabilité de la roche. Elle peut contribuer certainement à l'emmagasinement de l'eau, mais ne représente pas l'aptitude de la laisser circuler. La porosité secondaire représente le niveau de fracturation produit dans la roche par des contraintes mécaniques (tectonisme), hydrauliques ou chimiques. Un grand niveau de fracturation peut entraîner une bonne perméabilité. La qualité chimique de l'eau qui y circule provient quant à elle de la composition minéralogique des unités lithostratigraphiques.

4.1 Géologie du socle rocheux

Au niveau morphostructural, la région du Bas-Saint-Laurent fait partie de l'Orogénèse des Appalaches. Les roches sédimentaires constituant le socle rocheux du territoire étudié appartiennent à deux périodes d'âges différents séparés par la faille normale Neigette. Au nord de la faille, c'est la zone de Humber où l'on retrouve une séquence de roches carbonatées d'âge Cambro-Ordovicien issue de l'orogénèse taconienne. On y retrouve principalement les groupes de Trois-Pistoles (argilite, schiste, conglomérat, grès feldspathique), de Saint-Roch (argilite, siltite rouge et vert), de Rosaire (quartzite et schiste ardoisier, conglomérat, grès, calcaire) et le groupe de Trinité (siltite de grès, calcaire et schistes). Les formations de Tourelle, de Remieu et de Rivière-Ouelle appartiennent également au groupe d'âge Cambro-Ordovicien et sont principalement composées de grès, de calcaire, de conglomérat, de mudrock et de claystone. Les crêtes appalachiennes sont principalement constituées de grès, de conglomérat et de calcaire alors que les sillons sont constitués de roches beaucoup plus tendres. Au sud de la faille Neigette se trouve la ceinture de Gaspé où l'on retrouve les roches d'âge Siluro-Dévonien issues de l'orogénèse acadienne. On y retrouve principalement les groupes des Calcaires supérieurs de Gaspé et le Groupe de Chaleurs partie inférieure et supérieure qui sont tous composés de mudrock, de grès et de calcaire. L'orientation NE-SO des divers systèmes de failles (de chevauchement, normales, inverses, dextres, etc.) résulte des divers plissements subis par ces

roches lors des phases d'orogénèse. L'information relative à la géologie du socle rocheux est présentée sur la carte 12.

Deux domaines géologiques caractérisent donc le territoire à l'étude. L'unité taconienne contient les groupes et formations dont la lithologie est principalement composée de roches «tendres» (argilite, schistes, siltite, ardoise) avec la présence dans certains secteurs de barres appalachiennes constituées de roches plus «dures» (conglomérat et de grès). L'unité acadienne est quant à elle formée de roches plus «dures» telles que les grès, les calcaires et le conglomérat. Ces deux domaines géologiques sont donc distinct géologiquement, mais aussi hydrogéologiquement en raison des différences au niveau des propriétés hydrauliques qui les caractérisent (porosité primaire/secondaire, conductivité hydraulique, coefficient d'emménagement et transmissivité).

4.2 Géologie du Quaternaire

La géologie du Quaternaire du territoire résulte d'une dynamique complexe rythmée par les processus liés à la glaciation, à la déglaciation et à l'invasion marine au cours des derniers 30000 à 40000 ans. Dans le PACES-NEBSL, cette thématique a bénéficié d'un effort particulier de notre équipe qui y a vu l'opportunité de synthétiser les différentes études produites depuis 50 ans. Des recherches complémentaires réalisées en partenariat avec la CGC ont permis de compléter la cartographie des dépôts meubles, de compiler les données sur les mouvements glaciaires et d'établir la liste des datations radiocarbone disponibles.

4.2.1 Introduction

Dans les années 1990, la Commission Géologique du Canada (CGC) avait entrepris la cartographie des dépôts meubles du Bas-Saint-Laurent dans la foulée du projet de cartographie des formations en surface de la Gaspésie (Veillette et Cloutier, 1993). Ce projet avait été mené à terme, mais la carte, restée manuscrite, n'a jamais été éditée. En 2012 un partenariat a été établi entre Jean Veillette de la Commission Géologique du Canada et le PACES-NEBSL afin de compléter la cartographie des dépôts quaternaires du Bas-Saint-Laurent. Ce partenariat a permis de finaliser et de valider la couverture non éditée. Le partenariat a aussi permis de compiler et de cartographier les données sur les écoulements glaciaires, soit les stries et autres marques d'érosion glaciaire sur le substrat rocheux ainsi que les trainées de dispersion glaciaire. Pendant ce temps, une équipe de l'UQAR sous la direction de Bernard Héту procédait à la compilation des datations radiocarbone et au tracé de la limite marine de la Mer de Goldthwait au Bas-Saint-Laurent. Toutes ces données sont rassemblées sur la carte des formations quaternaires du Bas-St-Laurent (Veillette et al. en préparation). Cette carte, qui reprend à peu de choses près la même légende que la carte de la Gaspésie (Veillette et Cloutier, 1993), fait la synthèse des nombreux travaux publiés antérieurement (Lee, 1962 ; Dionne et Héroux, 1966; Dionne, 1968; Leblais, 1973 ; Martineau, 1977, 1979a, 1979b; Dion et Maranda, 1978; Locat, 1978 ; Desmarais, 1988 ;

Prichonnet et Desmarais, 1985 ; Rappol et Russell, 1989; Rappol, 1993 ; Hétu, 1998). Elle repose sur une photo-interprétation extensive à l'échelle du 1/40 000 couvrant tout le territoire du Bas-Saint-Laurent. Le travail de terrain a consisté en des visites systématiques sur l'ensemble du territoire visant à vérifier et à uniformiser les unités. Pour le détail de la méthodologie, nous renvoyons le lecteur à la notice méthodologique qui accompagne la carte de Veillette et al. (en préparation).

Des campagnes de relevés géophysiques et de forages ont été réalisées au cours des étés 2013 et 2014 en complément des travaux cartographiques. Ces relevés visaient à préciser la stratigraphie, l'architecture et l'épaisseur des dépôts meubles.

4.2.2 Histoire des évènements du Quaternaire

Les études réalisées depuis les travaux pionniers de Chalmers (1898, 1906), Coleman (1922) et Lee (1955, 1959, 1962) permettent de reconstituer les grandes étapes de l'histoire glaciaire de la région ((Locat, 1976 ; Chauvin et al. 1985 ; Lebus et David, 1977, David et Lebus, 1985 ; Martineau et Corbeil, 1983 ; Rappol et Russell, 1989 ; Rappol, 1993 ; Prichonnet, 1995 ; Richard et al.1997 ; Hétu, 1998 ; Marchand et al. 2014). Si l'on fait abstraction de la date ^{14}C de $40\ 640 \pm 420$ BP (TO-3714) obtenue sur un fragment de bois de caribou (*Rangifer tarandus*) – considéré comme remanié – récolté par J.-C. Dionne dans les sédiments de la Moraine de Saint-Antonin, près de Rivière-du-Loup (Harrington, 2003), tous les évènements et les dépôts décrits ci-dessous sont considérés comme appartenant au dernier cycle glaciaire du Wisconsinien supérieur.

Au maximum de la dernière glaciation, toute la région du Bas-Saint-Laurent est sous l'emprise d'un écoulement glaciaire vers le sud-est attribué à l'Inlandsis Laurentidien. Cette direction d'écoulement, qui est attestée dans le Maine et le New Hampshire jusqu'au littoral de l'Atlantique (Gerath et al.1985 ; Newman et al.1985 ; Dorion et al.2001), est responsable du semis d'erratiques précambriens observés partout dans la région (Rappol, 1993 ; Prichonnet, 1995) ainsi que des nombreuses marques d'érosion glaciaire (stries, broutures, queue-de-rat, etc.) orientées vers le sud-est (Lortie et Martineau, 1987 ; Rappol, 1993). Les principales vallées glaciaires du territoire sont elles-mêmes orientées vers le sud-est. Plusieurs d'entre elles sont occupées par de profonds lacs de surcreusement glaciaire perpendiculaires à la structure géologique (lacs à la Croix, Témiscouata, Pohénégamook, Grand Lac Squatec, etc.; cf. Shilts et al.1989, 1992). Ces nombreux lacs témoignent de l'intensité de l'érosion glaciaire produite par l'Inlandsis Laurentidien.

Vers la fin de la dernière période glaciaire (entre 18 000 et 16 000 ans cal. BP)¹, peu de temps avant le début de la déglaciation, un puissant courant de glace (*ice stream*) s'est installé dans la vallée du St-Laurent (Rappol, 1993 ; Shaw *et al.*2006). Canalisé par la vallée du Saint-Laurent, ce courant de glace, qui a contribué à accélérer la déglaciation en évacuant d'énormes volumes de

glace vers le golfe du Saint-Laurent, résulte de l'amincissement de l'inlandsis et de l'influence grandissante des principaux reliefs adjacents (Appalaches au sud, Bouclier au nord). Ce puissant courant de glace qui s'écoulait vers le nord-est a laissé de nombreuses traces (stries, collines profilées, roches moutonnées asymétriques) le long de la rive sud de l'estuaire et sur les îles du Saint-Laurent (Lortie et Martineau, 1987 ; Dionne, 1993, 2001a ; Rappol, 1995). La vallée du Saint-Laurent a joué un rôle déterminant dans le mode de déglaciation. La déglaciation de la rive sud du Saint-Laurent a été très rapide grâce au développement d'une baie de vêlage qui a remonté la vallée de la pointe de la Gaspésie à Trois-Pistoles en un peu plus de 2000 ans (Chauvin et al.1985 ; David et Lebus, 1985 ; Rappol, 1993 ; Occhietti et al.2011 ; Houde-Poirier, 2014). Les plus vieilles dates ^{14}C disponibles entre Forillon et Rimouski, toutes comprises entre 16 500 et 14 500 ans cal. BP¹, démontrent que la déglaciation de la rive sud de l'estuaire a été quasi instantanée à l'échelle géologique. La tête de la baie de vêlage a atteint Matane et Rimouski vers 15 000 BP, Rivière-du-Loup vers 14 300 ans BP, puis Québec vers 13 700 ans BP (Chauvin *et al.*1985; Héту, 1998; Rappol, 1993). L'ouverture de ce long bras de mer a eu pour conséquence l'isolement d'une calotte glaciaire autonome dans les Appalaches. D'après la répartition des marques d'écoulement glaciaire, le centre de dispersion de cette calotte était situé dans le Maine, dans le bassin de la rivière Aroostook (Newman *et al.*1985; Lowell, 1985; Rappol, 1993; Borns et al.2001). Ce changement majeur dans la configuration des glaciers, qui s'opère en moins de 2000 ans, a eu de profondes répercussions sur les écoulements glaciaires. Dans le Bas-Saint-Laurent, la glace s'écoule alors en direction de la vallée du Saint-Laurent nouvellement déglacée, soit vers le nord-ouest, le nord ou le nord-est suivant les secteurs, donc en sens inverse par rapport à l'Inlandsis Laurentidien (Lortie et Martineau, 1987 ; Rappol, 1993).

Si la déglaciation de la rive sud du St-Laurent a été rapide, grâce à l'ouverture d'une baie de vêlage, elle a été en revanche beaucoup plus lente sur la terre ferme. **Malgré toutes les études réalisées depuis un siècle, force est de constater que les étapes de la déglaciation au-delà de la limite marine sont à peine esquissées, en raison notamment d'un cadre chronologique qui reste fragmentaire et de l'absence de grands fronts morainiques.** Mais nous disposons de quelques repères. Après l'ouverture de la baie de vêlage, la marge de la calotte appalachienne s'est stabilisée sur les premiers reliefs rocheux saillants. Le contour de cette calotte, qui est encore très dynamique comme l'attestent les marques d'écoulements glaciaires et les formes fuselées notés sur tout le territoire, suit approximativement le tracé de la limite marine. Dans la région de Rimouski, la marge septentrionale de la calotte appalachienne s'est stabilisée le long des premières grandes barres appalachiennes émergées. Des deltas de contact glaciaire situés vers 135-140 m d'altitude en soulignent le tracé. Héту (1998) désigne cette première marge glaciaire, antérieure à l'invasion de la Mer de Goldthwait dans la vallée de la Neigette (~15 000 BP), du nom de Moraine de Luceville. On note le même phénomène dans la région de Rivière-du-Loup : la Moraine de Saint-Antonin, qui correspond à un alignement de kames, d'épandages et de deltas fluvioglaciaires, s'est édifiée au droit d'une crête rocheuse qui a stabilisé la marge glaciaire

¹ Pour alléger la présentation de la chronologie, nous utilisons la médiane de la fourchette des dates étalonnées à 2 sigma. L'étalonnage des dates conventionnelles a été faite au moyen du logiciel en ligne CALIB 7.1

appalachienne le long de la limite marine, fixée à 166-167 m dans ce secteur (Martineau et Corbeil, 1983; Chauvin et al.1985). La Moraine de St-Antonin, construite vers 14 300 BP, est de loin la plus imposante construction marginale du Bas-Saint-Laurent. La marge glaciaire est demeurée en contact ou à proximité de la Mer de Goldthwait pendant au moins 500 ans. Durant cette période, des quantités importantes de sédiments glaciaires ont été déversées directement dans la mer à la fois par la calotte glaciaire, les icebergs et les eaux fluvioglaciaires. C'est la phase glacio-marine. Par la suite, la marge glaciaire s'est retirée sur le plateau à des distances variables de la limite marine, mettant fin à la phase glacio-marine (~13 200 BP derrière Rimouski). Durant cette phase, les vallées qui entaillent les plateaux (Gaspésie) et le relief appalachien (Bas-Saint-Laurent) ont drainé de grandes quantités d'eaux fluvioglaciaires qui se déversaient dans la Mer de Goldthwait, construisant des deltas étagés à des altitudes décroissantes sous la commande du relèvement glacio-isostatique. Les deltas régressifs les plus imposants sont les niveaux intermédiaire et inférieur du complexe deltaïque de Trois-Pistoles (Dionne, 1968), le complexe deltaïque de la Rimouski (Héту, 1998) et le delta de Price (Locat, 1976, 1978).

Après la phase glaciomarine, la marge appalachienne s'est progressivement retirée vers le sud. Les étapes de la déglaciation dans l'arrière-pays bas-laurentien ne sont pas connues avec précision. Vers la fin de son existence la calotte appalachienne est devenue inactive comme le démontre les nombreux eskers dispersés sur le territoire (Martineau, 1977, 1979a, 1979b; Chauvin et al.1985). Dans la phase finale du processus de déglaciation, l'émergence des principales barres appalachiennes a provoqué l'abandon de masses de glace résiduelle dans les sillons (vallées) comme en témoignent les complexes fluvioglaciaires bosselés (kames, eskers, kettles) qu'on y observe. Les vallées de la Neigette et de Saint-Fabien en constituent de beaux exemples (Héту, 1998). La disparition des dernières masses de glace résiduelles des Hautes Terres est difficile à situer dans le temps car les données sont à la fois rares, dispersées et de valeur inégale. Diverses données semblent indiquer que les dernières masses de glace, devenues inactives, ont fondu sur place dans le nord du Maine à la charnière Pléistocène-Holocène il y a environ 11 000 ans (Bornes *et al.*2004).

L'invasion de la mer de Goldthwait coïncide avec l'ouverture de la baie de vèlage (Dionne, 1977, 1997). Elle est diachronique à l'échelle du territoire, c'est-à-dire qu'elle est plus précoce à l'est (vers 15 000 BP à Matane) et plus tardive à l'ouest (vers 14 300 BP à Rivière-du-Loup). Située vers 160-165 m à l'ouest de Saint-Fabien (Dionne, 1972a, 1977, 2002a ; Locat, 1978), la limite marine s'abaisse progressivement vers l'est pour atteindre 135-140 m d'altitude dans la région de Rimouski (Héту, 1998) et 100-105 m d'altitude à Matane (Dionne et Coll, 1995). La phase marine principale se divise en deux périodes : après une phase de sédimentation glaciomarine (diamicton), sous l'influence directe de la marge glaciaire, on passe à une phase marine argileuse d'eau profonde qui a débuté lorsque la marge glaciaire s'est éloignée des côtes (après 13 000 - 13 200 BP). La phase régressive se signale par la mise en place de séries de plages soulevées, de terrasses marines et de deltas étagés (Dionne, 1972a ; Locat, 1978 ; Héту, 1994, 1998). Durant l'émersion, les rivières postglaciaires se sont encaissées dans les sédiments antérieurs et les ont

découpé en terrasses. Plusieurs études retracent l'évolution postglaciaire du niveau marin relatif dans les différents secteurs du territoire étudié. Depuis la publication des premières courbes d'émersion en forme de "J" (Elson, 1998 ; Locat, 1977 ; Lortie et Guilbault, 1984), les recherches réalisées par Dionne (1988a, 1988b, 1997, 1999, 2001b, 2002a) ont démontré que l'évolution postglaciaire du niveau marin relatif était beaucoup plus complexe. Après une phase d'émersion rapide entre la déglaciation et 8500 ans BP, le niveau marin relatif est descendu sous le niveau actuel (≤ 10 m) au milieu de l'Holocène (7800-6750 BP) pour ensuite remonter jusqu'à la cote de +10 m (6600-4900 BP). C'est la Transgression Laurentienne. Le niveau Mitis (+6 m) a été atteint vers 1950 BP (Dionne, 1988a, 2001b). Les enregistrements les plus complets sont ceux de Matane (Dionne et Coll, 1995 ; Marchand et al.2014), de Rimouski (Hétu, 1994) et de Rivière-du-Loup (Dionne, 2002a).

4.2.3 Nature et distribution des dépôts meubles

Les dépôts meubles qui apparaissent sur la carte 13 ont été subdivisés en quatre familles qui comprennent elles-mêmes des groupes et des sous-groupes (**Tableau 4.1**) : 1) les altérites indifférenciées; 2) les sédiments glaciaires et fluvioglaciaires; 3) les sédiments marins et 4) les dépôts postglaciaires (cf. carte des dépôts meubles).

La distribution des différents types de sédiments varie considérablement à l'échelle du territoire, et ce, tant au niveau des épaisseurs (section 4.4) que de la nature des sédiments. Les plus grands corps sédimentaires du territoire sont localisées en dessous ou à proximité de la limite marine, dans les vallées fluviales et dans les sillons appalachiens (Locat, 1978; Martineau, 1977, 1979a, 1979b; Hétu, 1998; cf. figure 1). Sous la limite marine, en dehors des vallées, il s'agit principalement de dépôts d'argile marine et glaciomarine surmontés de sables et de graviers littoraux, souvent modelés en crêtes de plages, en flèches littorales et en tombolos. Là où la couverture de sables et graviers littoraux est absente, ou encore trop mince (< 1 m) pour avoir une influence sur le drainage, de grandes tourbières se sont développées à la surface des grandes plaines argileuses qui s'étalent pour la plupart entre 40 et 15 mètres d'altitude. Les plus vastes sont situées entre Rimouski et Mont-Joli, près de Saint-Fabien et à l'ouest de Matane. La portion aval des vallées, en dessous et à proximité de la limite marine, est occupée par des complexes deltaïques emboîtés, des épandages fluvioglaciaires, des dépôts de contact glaciaire (deltas de contact glaciaire, terrasses de kame, kames) et des dépôts alluviaux découpés en terrasses. La vallée de Matane, étudiée par Marchand et al. (2014), est un bon exemple.

Au-delà de la limite marine, les corps sédimentaires les plus volumineux se rencontrent essentiellement dans les vallées fluviales, les cuvettes lacustres (Shilts et al.1989, 1992) et les sillons appalachiens (Hétu, 1998). Ces dépressions, qui ont servi à la fois de voies d'évacuation des eaux fluvioglaciaires, puis fluviales, et dans certains cas de zones de fonte *in situ* des dernières masses de glace résiduelles, sont encombrées de dépôts de contact glaciaire –

essentiellement des kames, quelques rares eskers – de terrasses fluvioglaciaires et de dépôts alluviaux postglaciaires découpés en terrasses. Les fonds de vallées sont par endroits recouverts de limons de débordement (plaines alluviales) et de petits cônes alluviaux (Boucher, 1996; Héту et Bail, 1996; Héту, 2008). En dehors des vallées, le roc est omniprésent et quand il est masqué par des dépôts meubles, ils sont presque toujours à la fois minces et discontinus. Il s'agit le plus souvent, là où le roc est friable (schiste, argilite, siltstone, mudstone, mudroc, etc.), d'altérites indifférenciées, de moins d'un mètre d'épaisseur, de placages de till plus ou moins remanié et de dépôts fluvioglaciaires ponctuels (kames isolés, eskers). Sur les buttes et les crêtes de roches dures (certains conglomérats, grès quartzitique), le roc apparait dès qu'on enlève la terre végétale.

Tableau 4.1. Types de dépôts que l'on retrouve au Bas-Saint-Laurent et leur description (tableau tiré de Veillette et al. en préparation).

Chronologie	Type de dépôt	Description	Type de dépôt spécifique	Description sommaire	Code
DÉPÔTS POSTGLACIAIRES			Colluvions	blocs, gravier, sable et silt recouvrant les flancs et les fonds de vallées.	9
			Dépôts organiques	Tourbe et débris végétaux mis en place dans des bassins peu profonds sur les sédiments marins à grain fin, dans des bassins rocheux et dans les plaines alluviales.	8
			Dépôts alluviaux	sable, gravier, silt et blocs mis en place dans les plaines alluviales anciennes ou actuelles et sous forme de deltas.	7
SÉDIMENTS MARINS	DÉPÔTS MARINS ACTUELS	sédiments stratifiés, généralement fossilifères, mis en place en milieux estuarien, littoral et deltaïque.	Sédiments de la zone intertidale	silt, sable, dépôts organiques; de 1 m à 5 m d'épaisseur.	6b
			Sédiments littoraux	sable, gravier et blocs; de 1 à 5 m ou plus d'épaisseur; plages, cordons et flèches.	6a
	DÉPÔTS MARINS ANCIENS	sédiments stratifiés, généralement fossilifères; mis en place en milieux littoral, deltaïque et d'eau profonde et à proximité de la marge glaciaire lors de la submersion par la mer de Goldthwait.	Sédiments glaciomarins	diamicton silto-argileux fossilifère; argiles rougeâtres ou grises, caillouteuses et fossilifères.	5d
			Sédiments littoraux	sable, gravier et blocs, plages et cordons.	5c
			Sédiments deltaïques	sable, gravier, silt et blocs;	5b
			Sédiments d'eau profonde	silt et silt argileux, massifs à finement laminés, avec des lits sablonneux;	5a
SÉDIMENTS GLACIAIRES ET PROGLACIAIRES	DÉPÔTS GLACIOLACUSTRES	sédiments stratifiés mis en place dans des lacs proglaciaires	Sédiments deltaïques	sable, silt et gravier de 1 à 5 m ou plus d'épaisseur; deltas	4b
			Sédiments d'eau profonde	rythmites de silt et d'argile; de 1 à 3 m d'épaisseur.	4a
	DÉPÔTS FLUVIOGLACIAIRES	sédiments stratifiés, mis en place au contact ou à proximité du glacier.	Sédiments deltaïques	sable, gravier et blocs, de 1 à 20 m d'épaisseur; deltas.	3c
			Sédiments de plaine d'épandage	sable et gravier, de 1 à 30 m d'épaisseur; terrasses.	3b
			Sédiments de contact glaciaire	gravier, sable, blocs comprenant les eskers, certaines moraines, les Kames et les terrasses de kame.	3a
	DÉPÔTS GLACIAIRES	till à matrice sablo-silteuse généralement carbonatée et qui contient des galets striés de lithologies mixtes; de 1 à 20 m d'épaisseur.	Till épais	couverture généralement continue d'épaisseur moyenne de 1 m ou plus.	2b
			Till mince	couverture discontinue d'épaisseur moyenne inférieure à 0,5 m.	2a
ALTÉRITES INDIFFERENCIÉES			Manteau résiduel	fragments rocheux anguleux et altérites provenant du substrat rocheux sous-jacent; les erratiques glaciaires sont absents ou rares et reposent généralement à la surfaces du dépôt; de 0,2 à 2 m d'épaisseur. L'unité 1e désigne les aires caractérisées par une plus grande abondance d'erratiques	1, 1e
			Roche en place	roc et roc à couverture mince de dépôts meubles (moins de 0,5 m).	R

A) Roc (R) et altérites indifférenciées (1 et 1e)

Ces deux unités cartographiques couvrent à elles seules plus de 60% du territoire étudié. Elles sont omniprésentes au-dessus de la limite marine et en dehors des vallées. La plus grande partie des affleurements rocheux dénudés (R) sont localisés dans la portion ouest du territoire (St-Simon, Saint-Fabien, Bic) où ils correspondent à des barres appalachiennes de roches dures (grès quartzitique, quartzite, conglomérat). Plusieurs de ces affleurements ont conservé des lambeaux de polis glaciaires et quelques stries (Kamouraska, Rocher Blanc près de Rimouski) épargnés par la météorisation postglaciaire. Dans l'est du territoire, les barres rocheuses, de relief plus modeste, sont moins fréquentes, notamment dans la zone côtière (sous la limite marine) où elles percent localement à travers la couverture de dépôts marins (à St-Anaclet et à Pointe-au-Père par exemple). Au sud de Rimouski, les collines rocheuses qui flanquent la vallée de la Neigette, et tout particulièrement l'escarpement de ligne de faille qui la borde sur son versant sud, font également partie des zones dominées par les affleurements rocheux. Dans les Hautes-Terres, l'unité la plus répandue est représentée par les altérites indifférenciées (1). Ayant généralement moins d'un mètre d'épaisseur, elles sont constituées de fragments rocheux anguleux à subanguleux baignant dans une abondante matrice silto-sableuse mal triée. Ces matériaux proviennent de la destruction *in situ* des affleurements rocheux par la gélifraction, l'hydroclastie et les processus intervenant dans la pédogénèse. Selon Locat (1978) les altérites les plus épaisses (jusqu'à 4,5 m) se rencontrent sur les argilites là où les plans de clivage sont quasi verticaux.

Dans le Bas-Saint-Laurent, contrairement à la Gaspésie (Bédard et David, 1991; Bédard, 1993), rien n'indique que ce manteau d'altération soit antérieur à la dernière glaciation. Étant constitué de matériaux peu évolués chimiquement, il est considéré comme étant postglaciaire. Il résulte de la destruction des pols glaciaires par les processus d'altération mécanique et la pédogénèse amorcée avec l'installation d'un couvert forestier continu il y a 8000 ans environ (Richard et al. 1992; Richard et Larouche, 1994). L'unité 1e désigne les zones qui se distinguent par une plus grande abondance d'erratiques, parmi lesquels figure une quantité variable d'erratiques précambriens oscillant entre 0 et 50 ‰ selon les stations de comptage. Bien que présents sur l'ensemble du territoire, ils sont particulièrement abondants dans le Témiscouata et la région des lacs Humqui et à la Croix (Rappol, 1993; Prichonnet, 1995). Dans plusieurs secteurs, ce semis très lâche d'erratiques dispersés à la surface du manteau d'altération représente la seule évidence du passage de l'inlandsis laurentidien à travers le Bas-Saint-Laurent.

B) Les sédiments glaciaires, fluvioglaciaires et glaciolacustres (2, 3 et 4)

i) *Les sédiments glaciaires (2a, 2b)*

Les sédiments glaciaires regroupent les dépôts mis en place sous le glacier alors qu'il était encore actif. Ils ont été ventilés en deux classes, soit les tills minces (2a), en placages discontinus de moins de 0,5 m d'épaisseur, et les tills épais (2b) qui se présentent en couverture continue de plus

d'un mètre d'épaisseur (2b) (**Figure 4.1**). À l'échelle régionale, les principales nappes de till sont localisées dans trois secteurs différents :

- a) **à l'ouest** sur les hauts plateaux derrière Trois-Pistoles et Saint-Simon, plus particulièrement autour de Saint-Jean-de-Dieu, de Saint-Mathieu-de-Rioux et de Saint-Eugène-de-Ladrière. Selon, Locat (1978), cette dernière nappe de till s'étend sur plus de 10 km en direction de Saint-Valérien et elle atteint au moins 2 mètres d'épaisseur;
- b) **au centre**, sur le plateau autour de Sainte-Angèle-de-Mérici, de Saint-Gabriel-de-Rimouski et de Saint-Damase;
- c) et finalement **à l'est** dans le secteur de Saint-Adelme (au sud et à l'est de Matane).

C'est d'ailleurs dans ce dernier secteur, plus précisément dans la vallée de la Tamagodi, un affluent de la rivière Matane, que Lebus et David (1977) ont observé les seules coupes de la région qui comportent plus d'un till. Deux tills séparés par des sédiments fluvioglaciers et glacio-lacustres ont été définis : 1) le Till de Tamagodi (3 m d'épaisseur), compact, gris foncé, fissile et calcaireux (silt + argile = 64% à la base, près des argiles lacustres, et 38% au sommet), probablement mis en place par un glacier appalachien s'écoulant vers le NO ; 2) et, au-dessus, formant la surface du terrain, le Till de Langis (4 m d'épaisseur), compact, gris foncé et calcaireux (silt et argile = 50-55%), probablement associé à l'Inlandsis Laurentidien. Au total, les sédiments quaternaires déposés dans la vallée du ruisseau Tamagodi dépassent les 20 mètres par endroits et la séquence abrite au moins deux aquifères confinés, un premier dans les sédiments sablo-graveleux sous le Till de Tamagodi et un second dans les sédiments sablo-graveleux qui sont coincés entre les deux tills et les sédiments glacio-lacustres qui les séparent (Lebus et David, 1977). Un troisième till surmonté par des sédiments glacio-marins a été observé par Lebus et David (1977) à plusieurs endroits le long du littoral à l'est de Matane. Dénommé Till de Petite-Matane, ce till gris foncé, compact et calcaireux devient plus graveleux vers le haut. Faisant environ 3 m d'épaisseur à la coupe type, il repose sur un plancher rocheux poli et strié dont les marques d'érosion indiquent un écoulement vers le nord-est.

Dans la partie ouest du territoire, Locat (1978) a distingué deux tills, soit un till «marin», plus argileux, dans la zone submergée par la Mer de Goldtwaith, et un till brun qualifié de «continental», plus sableux celui-là, observé dans le secteur de Saint-Eugène-de-Ladrière. Cette dernière nappe de till, qui fait environ 2 m d'épaisseur a pu être suivie sur au moins une dizaine de kilomètres en direction de Saint-Valérien.

Partout ailleurs dans les Hautes-Terres, on n'observe qu'une seule nappe de till qui se présente le plus souvent sous la forme d'un drapage relativement mince et discontinu, plaqué directement sur la roche en place (**Figure 4.1**). Dérivant principalement de roches sédimentaires silto-argileuses (schiste, argilite, siltstone, mudstone, mudrock,...) contenant une proportion significative de calcaire et de dolomie, le till régional, d'une grande monotonie, est constitué de graviers et de galets striés dispersés dans une matrice silto-argileuse carbonatée (contenu en carbonates variant

entre 3,5% et 12% selon les mesures de Locat, 1978 et de Dionne, 1972), de couleur brun-rouge, grise ou gris-bleu suivant la nature du substrat (Martineau, 1977, 1979a, 1979b; Lebus et David, 1977; Locat, 1978). Les blocs de plus de 20 cm de diamètre y sont relativement rares. Étant compacts et riches en fines (silt et en argile), les tills appalachiens sont plutôt imperméables et, par conséquent, ils affichent un comportement hydrogéologique très proche de l'argile marine.



Figure 4.1 : Exemples de vestiges glaciaires dans le Bas-Saint-Laurent. A) Affleurement de roc poli et strié près de Lejeune, Témiscouata; B) Stries glaciaires près de Dégelis, Témiscouata; C) Till mince sur un affleurement de shale rouge poli et strié près du Bic; D) Till brun sur un affleurement de shale rouge poli et strié près de Transfiguration; E) Till mince sur un affleurement de shale gris poli et strié près de L'Isle-Verte. On aperçoit un bloc précambrien près des arbres; F) Till argileux, gris et carbonaté, d'origine appalachienne, près de Grand-Métis.

ii) *Les sédiments fluvioglaciaires (3a, 3b, 3c)*

Les dépôts fluvioglaciaires regroupent les sédiments déposés par les eaux de fusion qui s'échappaient des glaciers durant la déglaciation. Ils ont été regroupés en trois catégories : (**Figure 4.2**): (A) les sédiments de contact glaciaire, déposés, comme le nom l'indique, en contact avec le glacier, soit sur la glace, sous la glace ou contre un mur de glace (3a); (B) les sédiments de plaine d'épandage, étalés devant le glacier par les eaux de fusion sur des distances variables qui se comptent en centaines de mètres ou en kilomètres (3b) et (C) les sédiments deltaïques qui se déposent lorsque les eaux de fusion se déversent dans une nappe d'eau, qu'il s'agisse de la mer (3c) ou d'un lac (4b).

Étant tous constitués de matériaux granulaires stratifiés, essentiellement du sable et du gravier avec parfois des lits de cailloux ou de blocs, ils diffèrent les uns des autres principalement par leur morphologie, le contexte de mise en place, l'architecture interne et les déformations qui les affectent. Étant très poreux et donc propices à l'infiltration, ces matériaux granulaires se comportent comme des zones de recharge des aquifères.

Les **sédiments de contact glaciaires (3a)** regroupent les eskers, les kames, les terrasses de kame et certaines moraines frontales telle la Moraine de Saint-Antonin, surtout constituée de sédiments fluvioglaciaires (**Figure 4.2**) (Lee, 1962; Dionne, 1972a; Martineau, 1979). Bien que présents ponctuellement sur les plateaux, les principales masses de sédiments de contact glaciaire sont situées dans les vallées fluviales et au fond des sillons appalachiens (**Figure 4.2A**; Héту, 1998). Ils affichent généralement un relief en bosses et creux, et sont souvent troués de kettles (**Figure 4.2A**). En coupe, ce sont les dépôts de contact glaciaire qui présentent les sédiments les plus grossiers (**Figure 4.2D**) et les changements de granulométrie les plus marqués d'un lit à l'autre (**Figure 4.2B**). De plus, on y observe souvent de nombreuses déformations post-sédimentaires liées à la fonte des masses de glace résiduelles (failles normales, basculements, etc.). Située près de Rivière-du-Loup, la Moraine de Saint-Antonin, mise en place contre la marge glaciaire appalachienne peu de temps après le début de la déglaciation (Martineau, 1977; Martineau et Corbeil, 1983), est la plus importante masse de sédiments fluvioglaciaires du Bas-Saint-Laurent et elle est d'ailleurs exploitée depuis plusieurs décennies par de nombreuses gravières (**Figure 4.2C et D**). À l'intérieur des limites du territoire couvert par cette étude, les principales masses de sédiments de contact glaciaire sont situées sur le plateau de Saint-Jean-de-Dieu, dans l'arrière-pays de Trois-Pistoles, dans la vallée de la Rimouski au sud du pont de l'autoroute 20 (Rappol, 1993), dans la vallée de la Neigette entre Sainte-Blandine et Sainte-Angèle-de-Mérici, où l'on observe localement des champs de kames et des lambeaux d'eskers partiellement fossilisés sous les argiles marines (**Figure 4.3**; Héту, 1998), et, enfin, dans la vallée de la rivière Matane. Cette vallée est bordée des deux côtés par une série de belles terrasses de kame dont les replats, troués de kettles, sont perchés à quelques dizaines de mètres au-dessus du fond de la vallée (Coll, 1994; Marchand et al.2014). L'épaisseur des sédiments fluvioglaciaires qui se sont déposés entre la langue glaciaire et les versants de la vallée dépassent localement les 40 mètres (Coll, 1994).



Figure 4.2. Exemples de modelés et de dépôts fluvioglaciaires dans le Bas-Saint-Laurent. A) Modelé de décrépitude (kames et kettles) dans un sillon appalachien près de Saint-Narcisse-de-Rimouski; B) Kame près du Bic; C et D) Dépôts de contact glaciaire de la Moraine de Sainte-Antonin; E) Delta de contact glaciaire de Luceville; F) Delta de contact glaciaire près de Saint-Simon.

Les **sédiments de plaine d'épandage** (3b) sont constitués de sable, de gravier et de cailloux, généralement mieux stratifiés et mieux triés que les dépôts de contact glaciaire. Les sédiments de plaine d'épandage ont été étalés devant le glacier par les eaux de fusion qui s'en échappaient. Comme l'écoulement des eaux de fusion était contraint par la topographie préexistante, on les retrouve principalement dans les sillons appalachiens et les vallées fluviales. Souvent, dans ces dernières, ils se présentent sous la forme de hautes terrasses perchées au-dessus des plaines

alluviales postglaciaires. Leurs replats, parcourus de chenaux en tresse reliques (**Figure 4.3D**), offrent un aspect très différent des plaines alluviales à méandres qui représentent le style fluvial dominant de la période postglaciaire (**Figure 4.3F**). Cette catégorie de sédiments couvre au total une superficie relativement réduite, les principales unités étant situées au nord-ouest de Saint-Jean-de-Dieu et près du hameau de Neigette.

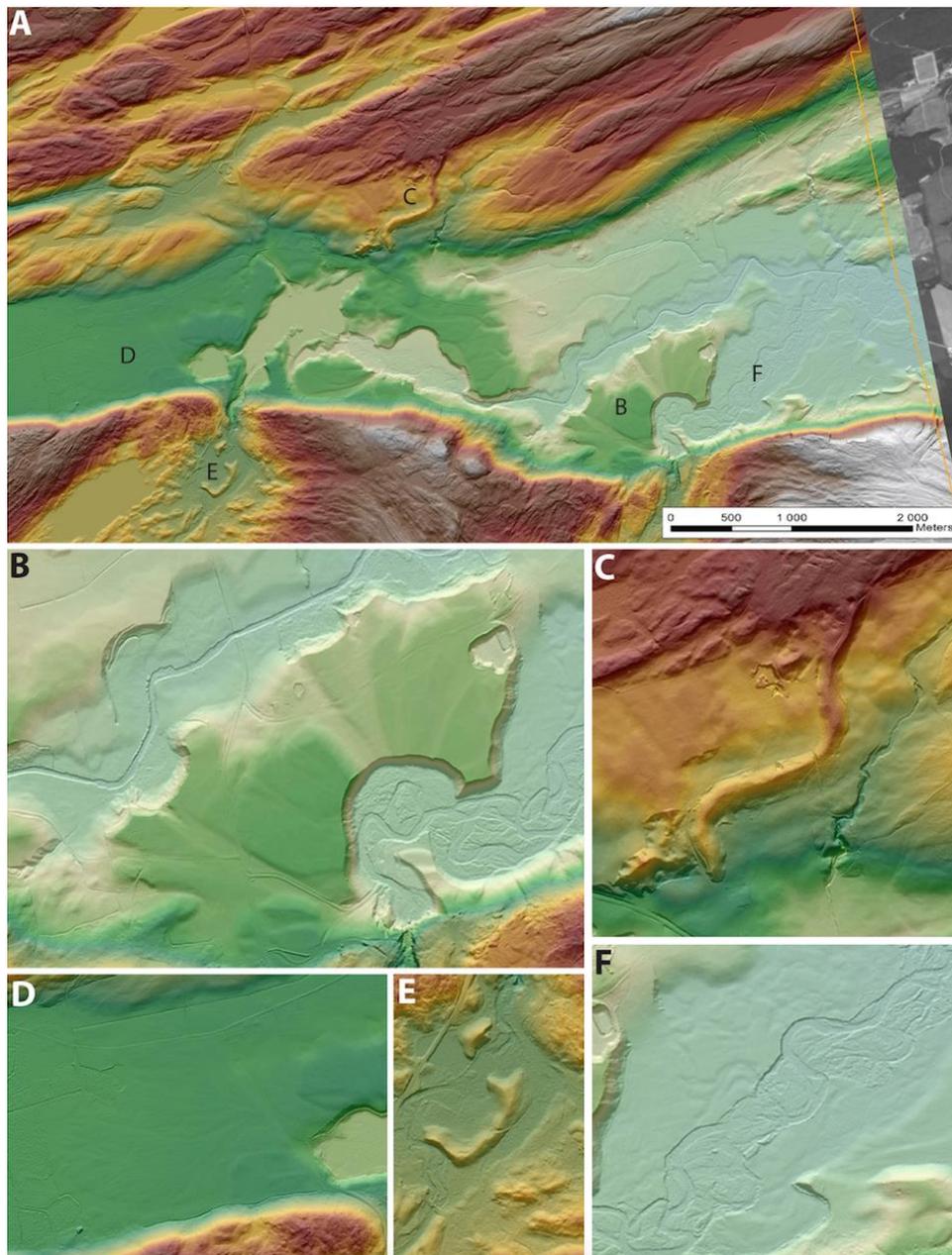


Figure 4.3. Géomorphologie quaternaire d'une partie de la vallée de la Neigette. – A) Vue d'ensemble du secteur analysé; B) Delta fluvio-glaciaire dont de replat est parcouru de chenaux; C) Esker qui alimente le delta de Saint-Anaclet au nord (en dehors du cadre); D) Épandage fluvio-glaciaire sillonné de chenaux en tresse; E) Kames dans une dépression du plateau de Sainte-Blandine; F) Plaine alluviale d'une rivière à méandres.

Les sédiments deltaïques (3C) d'origine fluvioglaciaire, bien que très localisés, sont plus répandus. Cette catégorie regroupe les deltas d'origine fluvioglaciaire construits à proximité ou en contact avec la marge glaciaire. Les sédiments deltaïques occupent deux contextes distincts. Certains sont situés à l'embouchure des vallées qui drainaient les eaux de fusion alors que d'autres sont accolés au flanc nord des barres rocheuses qui ont servi de point d'ancrage à la marge glaciaire après l'ouverture de la baie de vélage qui remontait la vallée du Saint-Laurent (Héту, 1998). Les trois deltas fluvioglaciaires (3c) les plus importants du territoire sont situés à Trois-Pistoles (Lee, 1962; Dionne, 1968; Locat, 1978; cf. **Figure 4.4**), à Saint-Fabien (Locat, 1978; Héту, 1998) et au sud de Luceville (Locat, 1978; Dion et Maranda, 1979; Héту, 1998; cf. **Figure 4.5**). Ces trois deltas sont situés respectivement à 160-165 m, 160 m et 135-140 m d'altitude. D'autres deltas fluvioglaciaires de plus petites dimensions ont également été observés à l'est de Saint-Anaclet (135-140 m) près du Ruisseau-à-la-Loutre, au sud de Sainte-Odile (140 m), près de Saint-Simon et dans la vallée de la Neigette (123-129 m; Héту, 1998). Constitués surtout de sables et de graviers, ils montrent en coupe des lits frontaux fortement inclinés (20°-25°) surmontés par des lits sommitaux caillouteux faiblement inclinés (< 5°) vers le nord (figure 2E). Les gravières et les forages révèlent des épaisseurs de l'ordre de 10 à 30 mètres de matériaux granulaires.

À l'exception des deltas de Saint-Simon et de Matane, tous ces deltas ont été construits à la limite marine, qui passe de 160-165 m à Trois-Pistoles à 100-105 m dans le secteur de Matane (Locat, 1978, Dionne et Coll, 1995; Héту, 1998). Les deltas de Sainte-Odile, de Saint-Anaclet (alimenté par un esker) et de Luceville sont des deltas de contact glaciaire dont la mise en place remonte à plus de 15 000 ans. Ces trois deltas et quelques kames alignés, dont ceux du Bic, se sont construits le long de la marge glaciaire appalachienne avant l'invasion marine dans la vallée de la Neigette. Héту (1998) en précise la signification paléogéographique dans le modèle de déglaciation régional.

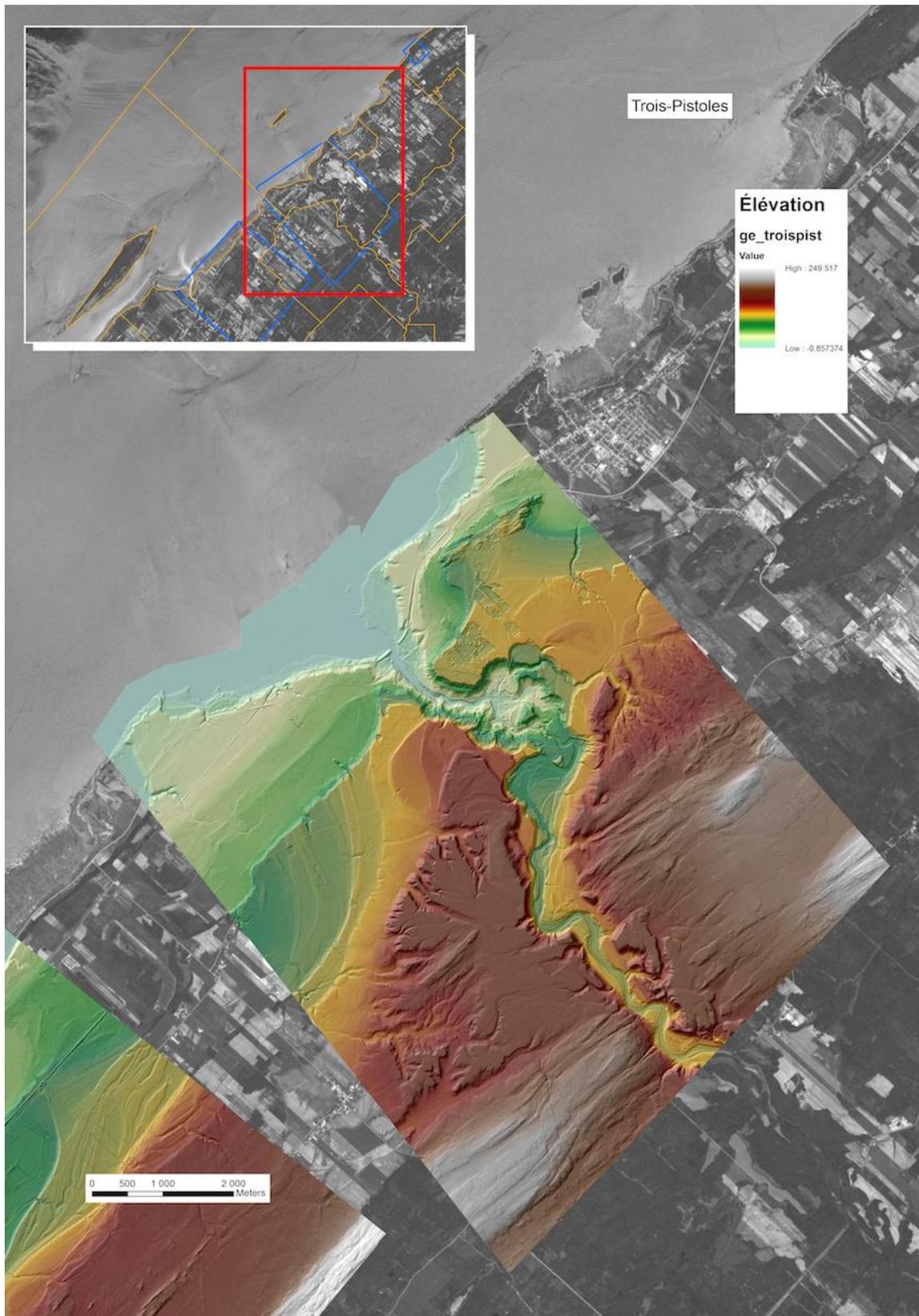


Figure 4.4. Le replat du delta fluvioglacière de Trois-Pistoles domine une série de falaises mortes et de lignes de rivage de la Mer de Goldthwait.

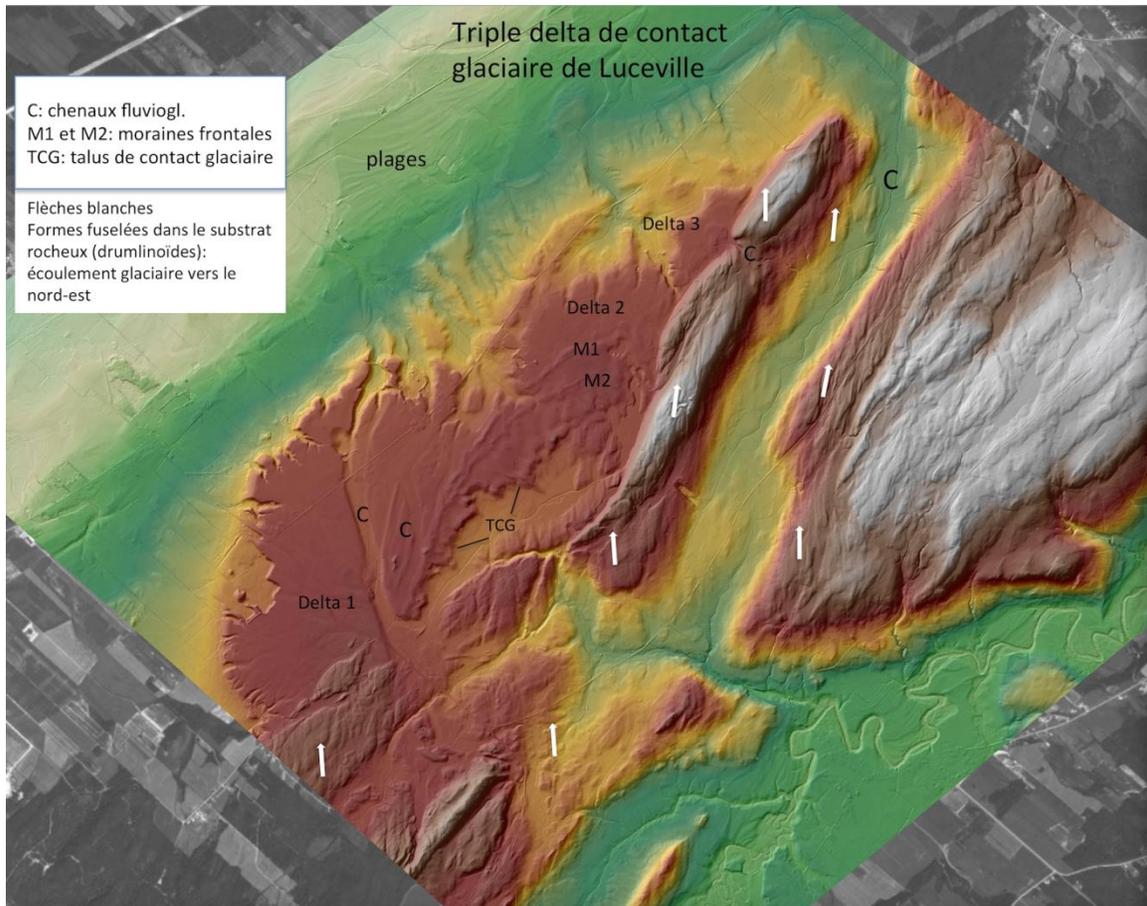


Figure 4.5 : Le triple delta de contact glaciaire de Luceville. Noter les chenaux fluvioglaciaires (C), le talus de contact glaciaire (TCG), les deux moraines frontales (M1 et M2) et les plages de la Mer de Goldthwait. Les formes fuselées dans le roc ont été produites par l'érosion glaciaire. (flèches blanches). Elles indiquent que le glacier appalachien s'écoulait vers le nord.

iii) Les sédiments glaciolacustres (4a et 4b)

L'adjectif «glaciolacustre» désigne les environnements lacustres dont le régime hydrosédimentaire est sous l'influence directe des glaciers qui fournissent à la fois la majeure partie de l'eau et des sédiments. Il s'agit la plupart du temps de lacs éphémères coincés entre le glacier et un relief. Les nombreux lacs glaciaires des Cantons de l'Est sont des exemples classiques (Larocque et al.2003). Les sédiments glaciolacustres rassemblent les sédiments fins (4a), d'eau profonde, mis en place par décantation (silt et argile), et les deltas sablo-graveleux (4b) construits sur les berges du lac par les eaux de fusion qui s'y déversaient. On ne connaît sur le territoire que trois endroits où affleurent des argiles glaciolacustres (4a), soit dans les vallées des ruisseaux de Langis et Tamagodi (au sud de Saint-René-de-Matane), où elles alternent avec des tills et des dépôts fluvioglaciaires (Lebuis et David, 1977), et près de Saint-Mathieu où Locat (1978) mentionne un dépôt varvé de 3 mètres d'épaisseur. Ce dernier lac aurait duré une trentaine d'années tout au plus. Des rythmites, des deltas et des terrasses lacustres ont en revanche été signalés à plusieurs endroits au sud du territoire cartographié par le PACES (Martineau, 1977,

1979a), les vestiges les plus connus étant ceux du grand lac glaciaire Madawaska qui recouvrait une large portion du Témiscouata depuis Lac-des-Aigles jusqu'à Grand-Sault au Nouveau-Brunswick (Lee, 1955, 1959; Kiewiet de Jonge, 1951; Martineau, 1979b; Kite et Stuckenrath, 1989; Shilts et al. 1989, 1992; Dumais et al. 1998).

C) Les dépôts marins anciens (5)

Cette grande famille de sédiments comprend une vaste gamme d'environnements sédimentaires. De par leur étendue, leur volume et leur épaisseur, les sédiments de la Mer de Goldthwait sont de loin les dépôts les plus fréquents sur le territoire. Omniprésents sous 100 à 170 m d'altitude (d'est en ouest), dans une bande côtière dont la largeur se tient le plus souvent entre 2 et 6 km (maximum de 9 km à Matane), ils revêtent un intérêt particulier dans la mesure où c'est également dans cette bande qu'est concentrée la majeure partie des villes et des villages. Dans cette zone, la couverture de dépôts marins n'est interrompue que par les quelques barres rocheuses qui émergent ici et là.

Les **dépôts marins anciens** ont été subdivisés en quatre catégories : les sédiments d'eau profonde (5a), les sédiments deltaïques (5b), les sédiments littoraux (5c) et les sédiments glaciomarins (5d). Nous les décrirons par ordre chronologique de mise en place.

i) Les sédiments glaciomarins (5d)

Dans la même logique que les sédiments glaciolacustres, les sédiments glaciomarins sont des sédiments marins dont les processus de mise en place et le faciès sont liés à la proximité d'un glacier. Lorsque le glacier est en contact avec la mer, des débris d'une taille allant de l'argile jusqu'aux blocs peuvent être déversés directement sur les fonds marins à partir d'une plate-forme de glace (*ice shelf*) ou par le biais des icebergs. Il en résulte un sédiment marin hétérométrique et mal trié pouvant contenir une forte proportion de cailloux et de blocs polis et striés (Coleman, 1922 ; Dionne, 1972a ; Lebus et David, 1977 ; Locat, 1978). Dans la région de Matane, les sédiments glaciomarins se présentent sous la forme d'un diamicton argileux riche en gravier et en cailloux qui repose directement, sans transition nette, sur le Till de Petite-Matane. Les deux faciès se ressemblent tellement à l'affleurement qu'il est parfois difficile de les distinguer sur le terrain, mais les analyses de laboratoires ont révélé que les dépôts glaciomarins contenaient des fragments de coquillages, des foraminifères (surtout de type *Elphidium*) et une proportion plus élevée de minéraux (pyroxènes, amphiboles) typiques des roches du Bouclier canadien (Lebus et David, 1977; Locat, 1978). Sur le territoire, ce type de sédiments se retrouve généralement sous 40 m d'altitude. Dans le secteur de Grand-Mitis, où ils font au moins 25 mètres d'épaisseur, les sédiments glaciomarins reposent directement sur le roc. Dans le secteur de Baie-des-Sables/Mont-Joli ils sont recouverts par une argile massive de couleur grise (Locat, 1978). Étant le plus souvent masqués par des dépôts plus récents, les dépôts glaciomarins affleurent rarement en

surface, mais on peut les observer à plusieurs endroits dans la falaise Mic-Mac et à la base des incisions fluviales, près des embouchures (Lebuis et David, 1977).

Les quelques datations au radiocarbone réalisées sur des fragments de coquillages récoltés dans les sédiments glaciomarins indiquent que leur mise en place a débuté il y a plus de 15 000 ans (Dionne, 1972a, 1977; Locat, 1977, 1978; Lebuis et David, 1977). Cette phase glaciomarine, qui correspond au Goldthwaitien I de Dionne (1977) et au Stade côtier de Locat (1978), aurait duré moins de 1000 ans.

ii) *Les sédiments marins d'eau profonde (5a)*

À mesure que les glaciers s'éloignaient des côtes et que les icebergs se faisaient de plus en plus rares, la sédimentation glaciomarine a été relayée par une sédimentation marine d'eau profonde essentiellement silto-argileuse (5a). On note des différences marquées dans la distribution de l'argile marine à l'échelle du territoire. Dans la partie ouest, l'argile marine affleure souvent à la surface du sol à des altitudes comprises entre 90 m et plus de 140 m. C'est le cas par exemple de part et d'autre du delta de Trois-Pistoles (140 m), dans les sillons de Saint-Simon (90-95 m), de Saint-Mathieu (130 m) et de Saint-Fabien (110-115 m), au sud de Rimouski (100-105 m) et dans la vallée de la Neigette (110 m). À l'est de Mont-Joli en revanche, l'argile marine est quasi absente au-dessus de 40 m, sauf en de rares endroits près de Matane. De plus, elle est généralement masquée par de la tourbe ou des sédiments littoraux.

À l'affleurement, les argiles marines de la Mer de Goldthwait sont le plus souvent massives, calcareuses, fossilifères et généralement de couleur grise à gris-bleu (**Figure 4.6A**). Dominés par l'argile (27% à 71%) et le silt (27% à 68%), elles contiennent entre 1% et 23% de sable (Lebuis et David, 1977 ; Locat, 1978). On y retrouve également des cailloux et des blocs dispersés dont une forte proportion (généralement plus de 50%) provient de la Côte-Nord (Dionne, 1972a, 2011). Ces gros éléments ont été transportés vers le sud par les icebergs qui se détachaient de l'Inlandsis Laurentidien. Celui-ci est resté en contact avec la Mer de Goldthwait pendant au moins 2000 ans. Enfin, les teneurs en carbonates de l'argile marine oscillent entre 5,2% et 10,9% (Locat, 1978). Les propriétés mécaniques des argiles marines de la région de Rimouski ont été analysées en détail par Dion et Maranda (1978).

iii) *Les sédiments deltaïques (5b)*

Même après s'être retirés loin des côtes, les derniers glaciers des Hautes-Terres ont continué à soutenir des débits beaucoup plus élevés que ceux de la période postglaciaire. De grandes quantités de sédiments provenant des bassins versants encore englacés ont été apportées à la côte pendant quelques millénaires encore. Ces apports de sédiments sablo-graveleux ont alimenté des deltas étagés et de belles séries de plages soulevées décrites plus bas. Les principaux deltas

construits durant la régression marine sont situés à l'embouchure de la rivière Trois-Pistoles (trois niveaux de deltas emboîtés sous le replat sommital : 150 m, 125-130 m, 105-110 m), à l'embouchure de la Rivière Rimouski, au site d'enfouissement sanitaire (85-89 m), à Price (79-84 m) et à Matane (70 m).

iv) Les sédiments littoraux (5c)

Les sédiments littoraux (5c) qui se sont déposés pendant la phase régressive de la Mer de Goldthwait sont principalement formés de sable et de gravier bien arrondis, bien triés, bien stratifiés et localement fossilifères (**Figure 4.6B** et **C**). C'est l'unité la plus répandue sous la limite marine, mais son épaisseur, qui varie entre moins d'un mètre et plus de 5 m, n'est jamais très importante. Morphologiquement les sédiments littoraux se présentent sous trois formes principales : séries de cordons littoraux, anciennes flèches littorales et tombolos (**Figure 4.6D** et **Figure 4.7**). Les sédiments littoraux reposent généralement sur les argiles marines, parfois sur le roc, plus rarement sur les sédiments glaciomarins ou le till.

Les plus grandes étendues de sédiments littoraux se retrouvent à l'est du Bic et à l'ouest de Saint-Simon. Cette unité est peu répandue dans le secteur des barres rocheuses qui s'étirent entre Saint-Simon et le Bic. À l'est de Rimouski, les sables littoraux sont omniprésents entre 40 m d'altitude et la limite marine, mais beaucoup plus rares entre 20 et 40 m où l'on rencontre surtout des plaines argileuses recouvertes de tourbe.

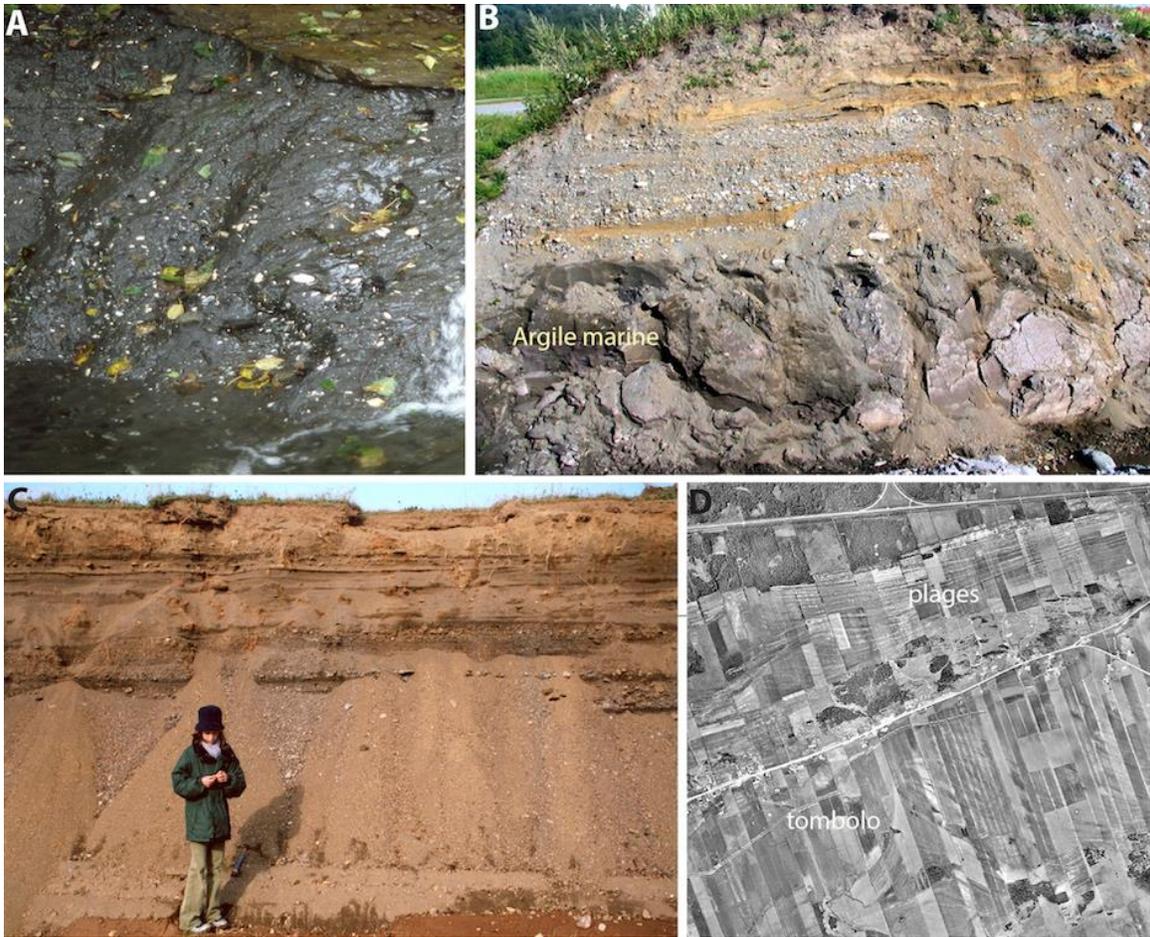


Figure 4.6. Exemples de sédiments marins déposés dans la Mer de Goldthwait. – A) Argile marine fossilifère dans la vallée de la Mitis; B) Sables et graviers littoraux surmontant des argiles marines derrière le magasin Rona de Rimouski; C) Dépôt littoral fossilifère près de Luceville; D) Plages et tombolo de la Mer de Goldthwait près de Saint-Anaclet.

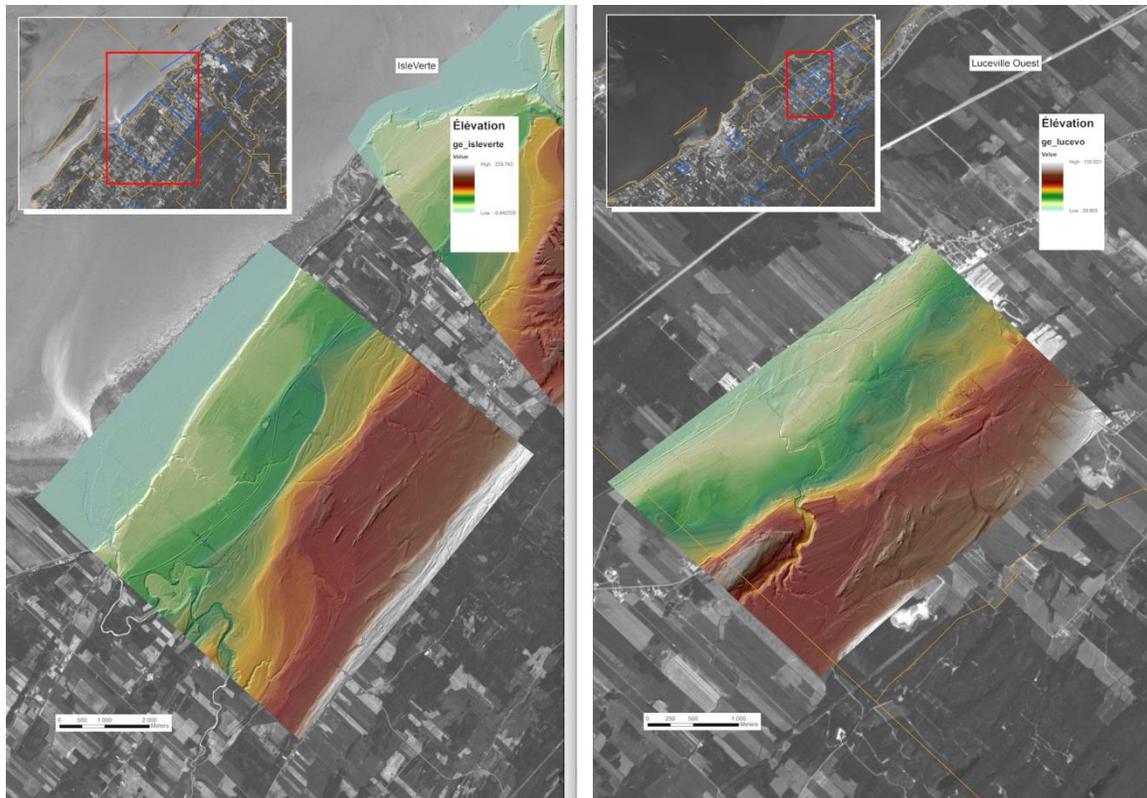


Figure 4.7. Terrasses marines, falaises mortes et plages de la Mer de Goldthwait près de L'Isle-Verte (à gauche) et de Luceville (à droite).

D) Les dépôts marins actuels (6)

Les dépôts marins actuels regroupent deux sous-types : les sédiments littoraux (6a) et les sédiments de la zone intertidale (6b).

Formant une étroite bande (généralement moins de 10 m) de sable et gravier qui ourle le trait de côte, les sédiments littoraux actuels sont concentrés dans les plages, les flèches littorales, les tombolos et les quelques queue-de-comète qui se sont développées derrière les îlots rocheux (notamment dans le Havre du Bic). Étant généralement plutôt minces (<2 m), cette unité repose le plus souvent, suivant le contexte, sur les argiles marines d'eau profonde ou sur le plancher rocheux des plates-formes d'érosion littorale. Les sables littoraux actuels sont adossés à des barres rocheuses ou à la Terrasse Mitis, une basse terrasse elle-même constituée de sables littoraux anciens et dont l'âge médian est de 2000 ans. La configuration des littoraux actuels du Bas-Saint-Laurent est très bien décrite dans les publications de Guilcher (1981) et de Dionne (2002b, 2007, 2011).

Dans le Bas-Saint-Laurent, on retrouve deux types d'estrans : 1) des plates-formes rocheuses d'érosion littorale situées le long des côtes rocheuses; 2) des estrans à blocs qui font de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de largeur. Les sédiments de la zone intertidale (6b)

appartiennent à cette seconde catégorie. Ces estrans, qui sont en fait des surfaces d'érosion taillées dans les argiles d'eau profonde de la Mer de Goldthwait (Dionne, 1988b, 2011), ne sont recouverts que d'une mince pellicule décimétrique de vase sableuse et de nombreux blocs pouvant former des dallages et des cordons glaciels de basse mer (Guilcher, 1981). Exceptionnellement, la couverture sableuse peut atteindre un mètre d'épaisseur comme c'est le cas à Saint-Fabien-sur-Mer (Dionne, 1988b).

E) Les dépôts postglaciaires (7, 8 et 9)

Des trois types de dépôts décrits ci-dessous, ce sont les dépôts alluviaux qui sont les plus répandus et les plus intéressants d'un point de vue hydrogéologique.

i) Les dépôts alluviaux (7)

Les plus répandus sont ceux qui constituent les plaines alluviales. On trouve aussi localement des cônes alluviaux à l'embouchure des petites vallées affluentes là où les fonds de vallée sont suffisamment larges pour permettre leur développement (Boucher, 1996; Héту et Bail, 1996; Héту 2008).

Les plaines alluviales correspondent aux sédiments déposés au fond des vallées par les rivières en crues. En milieu tempéré, les rivières à méandres représentent le style fluvial dominant. Sur le territoire étudié, les plus belles plaines alluviales à méandres sont celle de la rivière Matane, celle de la rivière Mitis et ses affluents et, dans une moindre mesure, celle de la rivière Trois-Pistoles en amont des rapides du kilomètre 3 (depuis l'embouchure). Coincée entre des versants rocheux abrupts, la rivière Rimouski est trop confinée pour construire une plaine alluviale à méandres.

Les plaines alluviales à méandres comprennent généralement deux unités stratigraphiques superposées (**Figure 4.8**), soit, à la base une couche de cailloutis de 1 à 2 mètres d'épaisseur déposée dans le lit de la rivière, et, au sommet, une couche de limon de débordement de 0,5 à 1,5 m d'épaisseur déposée lors des inondations. L'abaissement généralisé du niveau de base depuis la déglaciation sous l'influence du soulèvement glacio-isostatique a provoqué l'encaissement des cours d'eau et le développement de quelques niveaux de terrasses fluviales étagées. Ce phénomène a été étudié en détail par Marchand et al. (2014) dans un segment de la vallée de la rivière Matane.

ii) Les dépôts organiques (8)

Les dépôts organiques peuvent être subdivisées en deux grandes catégories : (1) les vastes tourbières qui ont commencé à se développer il y a 9500 ans à la surface des grandes plaines argileuses mal drainées abandonnées par la Mer de Goldthwait (Dyck et Blake, 1965; Gauthier et Grandtner, 1975; Garneau, 1987; Pellerin et Lavoie, 2000, 2003; Lavoie et al. 2001; Héту et Gray,

2002); (2) les cédrières et les mélézins tourbeuses qui se sont développées après 4000 ans BP dans les dépressions tapissées de till des Hautes-Terres (Richard et al. 1992 ; Héту et Gray, 2002). Les tourbières appartenant à la première catégorie sont de loin les plus vastes, les plus épaisses (jusqu'à 4 m) et les plus répandues. Les plus importantes sont situées à L'Isle-Verte (entre 30 et 50 m d'altitude), entre Saint-Simon et Saint-Fabien (entre 90 et 120 m d'altitude), entre Rimouski et Sainte-Flavie (entre 20 et 40 m), à Mitis-sur-Mer (15-40 m) et à Saint-Ulric (15-40 m). Les dépôts organiques appartenant à la seconde catégorie sont plutôt minces (< 1,5 m), généralement boisés et de petite dimension. On les retrouve principalement sur le plateau.

Rappelons que « La région du Bas-Saint-Laurent occupe le premier rang des régions productrices de tourbe avec environ 45 % de la production québécoise. De plus, elle est un leader mondial dans la production d'équipement pour la transformation de la tourbe. Une vingtaine d'entreprises y sont actives et emploient plus de 1 500 personnes. Cette industrie exporte environ 80 % de ses produits et ses technologies. » (EIEQ, 2015).

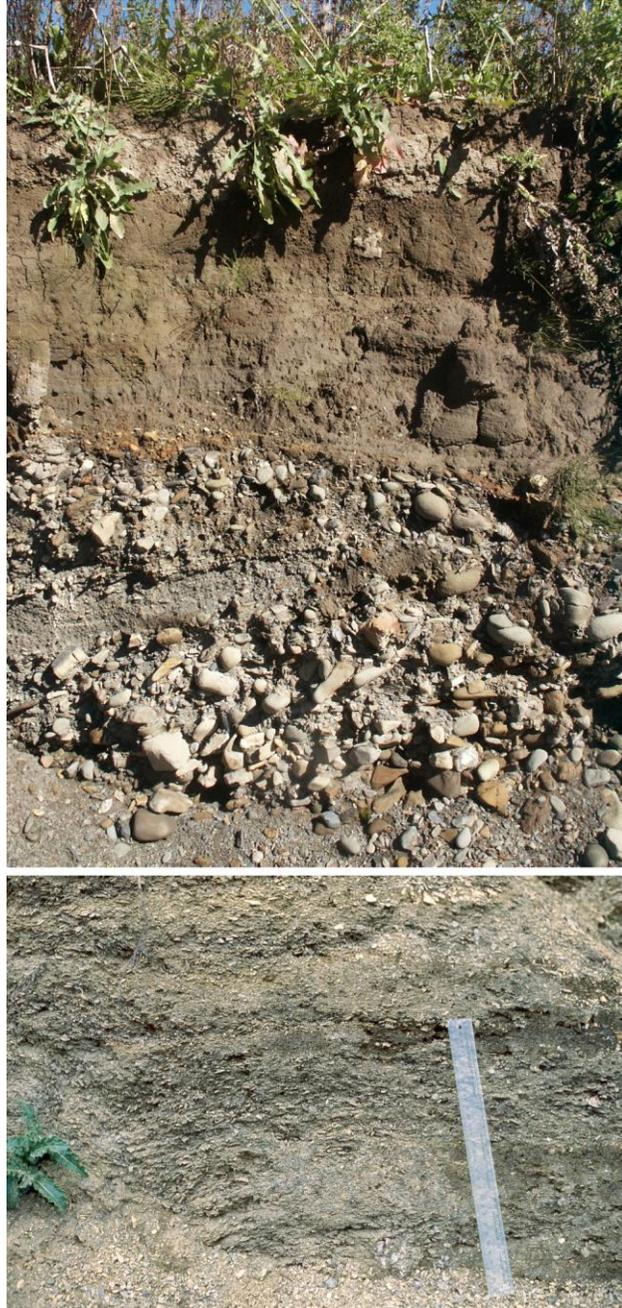


Figure 4.8 . En haut : coupe dans la plaine alluviale de la rivière Horton près de Squatec exposant les cailloutis du lit de la rivière surmontés par les limons de la plaine de débordement. En bas : colluvions périglaciaires dans vallées de la Neigette (petites plaquettes de shale anguleuses).

iii) Les colluvions (9)

Cette catégorie désigne la grande famille de dépôts de pentes. Elle regroupe une grande variété de dépôts colluviaux de nature, d'origine et d'âge variés, parmi lesquels figurent : 1) les talus d'éboulis de la vallée de la Neigette, de Saint-Fabien-sur-Mer et de Saint-Simon; 2) les colluvions

qui tapissent les versants boisés de part et d'autres des vallées fluviales; 3) les coulées argileuses comme celles de Rimouski et de Mitis (Locat, 1976; Dion et Maranda, 1978); et 4) des dépôts de pentes périglaciaires (grèzes) comme celui de la vallée de la Neigette (Hétu, 1987 p. 25-27; **Figure 4.8**). À l'exception des coulées argileuses, tous ces dépôts sont constitués de gravier, de cailloux et de blocs anguleux dégagés par la gélifraction et mobilisés par différents processus de versants tels les chutes de blocs, les avalanches, la reptation, la gélifluxion, etc. Ils peuvent également contenir en proportion variable des sédiments glaciaires, fluvio-glaciaires et marins remobilisés par les processus gravitaires. Étant relativement minces pour la plupart (< 1 à plus de 5 m pour les talus d'éboulis et les coulées argileuses), ils reposent le plus souvent directement sur la roche en place.

4.2.4 Stratigraphie, épaisseur et architecture des dépôts meubles

La stratigraphie et l'architecture des dépôts varient considérablement sur le territoire étudié. Trois composantes contrôlent en partie cette variabilité : la limite marine, les hautes et basses terres et le fait d'être dans une vallée ou sur un interfluve. Ces trois composantes combinées permettent de subdiviser les dépôts meubles en six grands environnements : 1) les basses plaines côtières; 2) les sillons appalachiens en dessous de la limite marine; 3) les sillons appalachiens au-dessus de la limite marine; 4) les vallées fluviales en dessous de la limite marine; 5) les vallées fluviales au-dessus de la limite marine; 6) les plateaux au-dessus de la limite marine.

Les coupes décrites ci-dessous, présentées de l'ouest vers l'est, recourent des portions de territoire appartenant à chacun de ces six environnements physiographiques. Dans les limites du territoire étudié, nous verrons que ce sont les environnements 1, 2 et 4 qui sont les plus fréquents et les plus étendus. Compte tenu de la grande hétérogénéité entre les forages, une simplification des unités stratigraphiques a été faite dans un souci d'uniformité et de représentativité. De plus, aucune donnée n'est disponible quant à une éventuelle succession d'unités lithostratigraphiques. Les coupes présentent donc verticalement qu'une seule unité lithologique. La **Figure 4.9** présente la localisation des coupes sur le territoire.

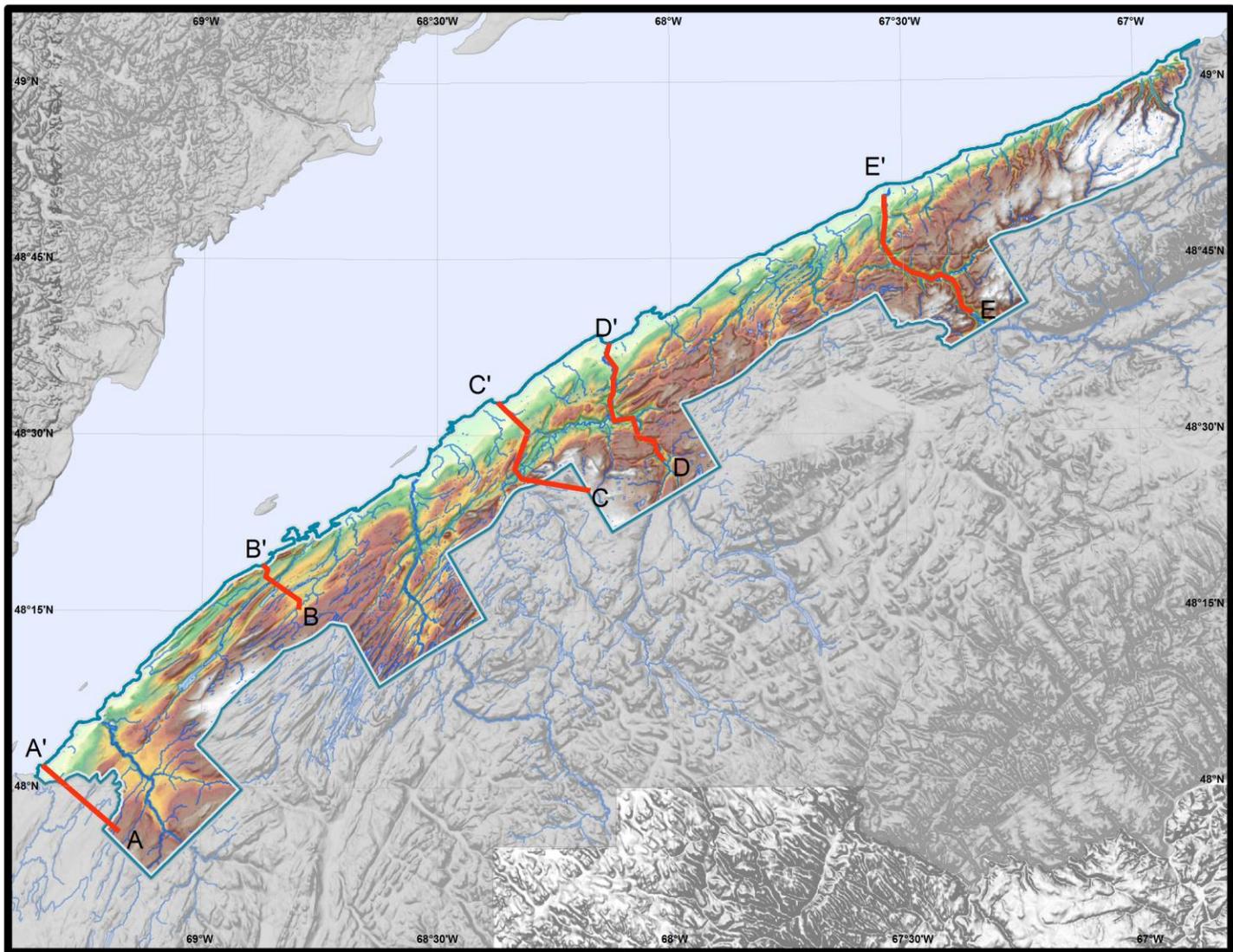
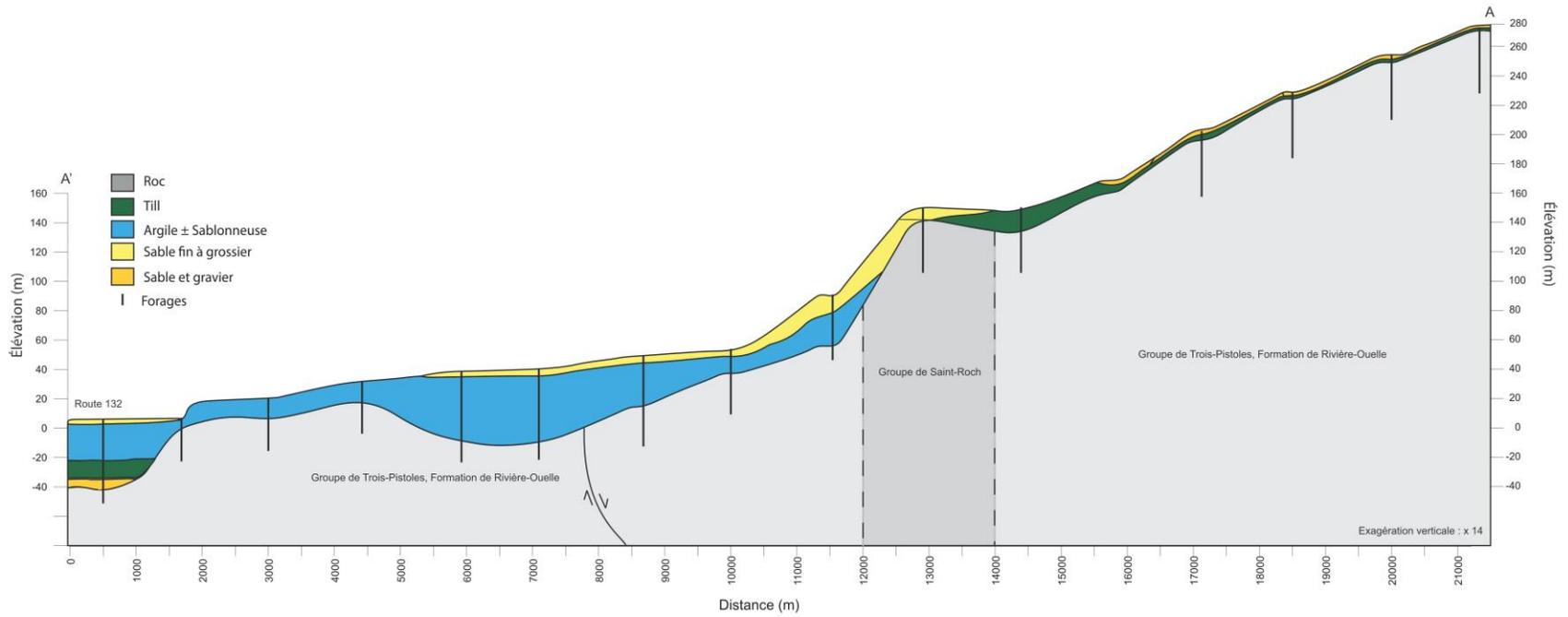


Figure 4.9 : Localisation des coupes stratigraphiques.

La coupe de l'Isle-Verte A-A'

Les basses plaines côtières sont fréquentes à l'ouest de Trois-Pistoles et à l'est de Rimouski. L'exemple type est représenté par la coupe de L'Isle-Verte (**Figure 4.10**). C'est sous la limite marine (~160-165 m) qu'on observe les plus gros volumes de sédiments. Le corps sédimentaire le plus important sur cette coupe est représenté par un épais dépôt d'argile marine qui atteint plus de 40 mètres d'épaisseur à 6 km du littoral et dont la base est située à environ 10 mètres sous le niveau de la mer. Ce grand corps sédimentaire, qui repose directement sur le roc, est surmonté par une couche de sable et gravier d'origine littorale dont l'épaisseur varie entre moins de 2 m et plus de 4 m. L'argile marine est recoupée près de la route 132 par la falaise Mic-Mac. Sous la route 132, l'argile marine surmonte une couche de till de 7 m d'épaisseur qui repose sur un mince (moins de 2 m) dépôt de sable et gravier dont l'origine reste indéterminée. Il pourrait s'agir d'un dépôt fluvioglaciaire d'englaciation ou d'un dépôt littoral préglaciaire. Quoi qu'il en soit, il offre la possibilité de la présence d'un aquifère contenant une eau saumâtre tel qu'observé à l'ouest du territoire, entre Rivière-du-Loup et Trois-Pistoles (McCormark, 1978). Au-delà de la limite marine, les dépôts, toujours très minces, reposent directement sur la roche en place. Il s'agit principalement de till, de sable fluvioglaciaire et de tourbe. À l'emplacement où la coupe a été faite, le socle rocheux se caractérise par les groupes de Trois-Pistoles (formation de Rivière-Ouelle) et de Saint-Roch. Ces deux groupes géologiques sont composés d'argilite, de schiste et de siltite.



La coupe de Saint-Eugène-Saint-Fabien B-B'

La coupe de St-Fabien – St-Eugène (**Figure 4.11**), située dans la partie ouest du territoire, est un bel exemple du type de sédimentation observé dans les sillons appalachiens sous la limite marine. Cette coupe perpendiculaire à la structure géologique permet d'observer une succession de sillons séparés par des barres de roches dures. Les sédiments quaternaires, qui peuvent atteindre jusqu'à 30 mètres d'épaisseur dans les sillons, sont quasi absents sur les versants et les crêtes des barres rocheuses. La séquence la plus complète, située dans le sillon de la route 132, superpose 10 mètres de till argileux compact, 5 à 12 mètres de sables et graviers fluvioglaciers et 10 à 12 mètres d'argile marine, en contact latéral avec les sables et graviers fluvioglaciers. En fait, l'argile marine occupe une dépression entre des kames et une barre rocheuse. Les sillons de la rivière du Sud-Ouest (et du lac de la station) et du Grand Lac Malobès abritent chacun un aquifère confiné dans des sables et graviers d'épaisseurs variables de 1 à 4 mètres surmontés par 4 à 10 mètres d'argile marine. Compte tenu de leur localisation stratigraphique sous les argiles marines, ces sables et graviers sont probablement d'origine fluvioglacière. Quant aux sables et graviers sommitaux, qui forment la surface du sol dans les sillons de la rivière du Sud-Ouest et du lac Malobès, ils sont probablement d'origine littorale. Le sillon de Saint-Eugène, au-dessus de la limite marine (~160 m dans ce secteur), est quasiment dépourvu de sédiment.

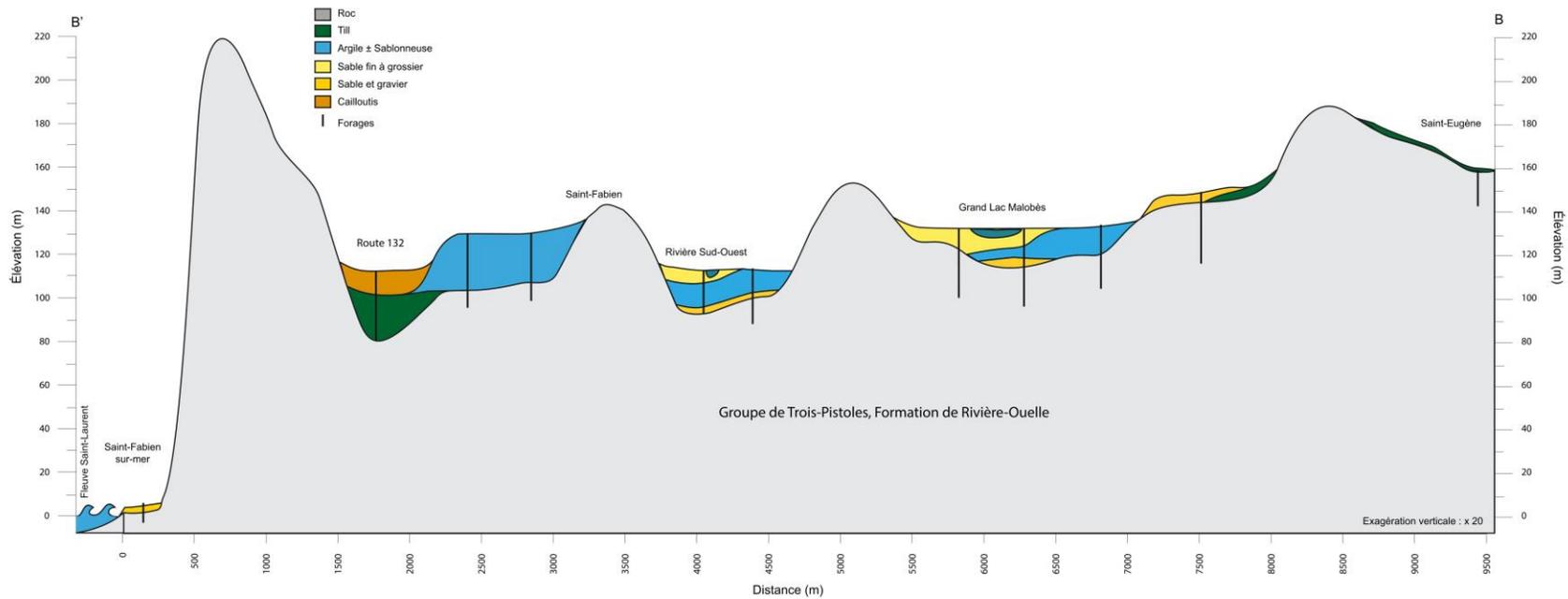


Figure 4.11 : Coupe transversale de Saint-Eugène-de-Ladrière à Saint-Fabien-sur-Mer

La coupe de Saint-Gabriel- Sainte-Luce C-C'

Cette coupe complexe (**Figure 4.12**) recoupe, du nord au sud, une portion de la basse plaine côtière, le delta de contact glaciaire de Luceville accroché au flanc nord de la barre appalachienne qui a servi de point d'ancrage à la marge glaciaire appalachienne juste après l'ouverture de la baie de vêlage, la vallée de la Neigette, bel exemple de vallée sous la limite marine, et, enfin, une portion de plateau au sud.

Tout comme à L'Isle-Verte, le corps sédimentaire le plus important de la basse plaine côtière est une couche d'argile marine de plus de 20 m d'épaisseur qui masque les ondulations du roc sous-jacent. Cette couche d'argile est surmontée par une mince couche de sable et gravier d'origine littorale. Les sables et graviers, parfois caillouteux, qui constituent le delta de Luceville (**Figure 4.3E** et **Figure 4.6**) font de 10 à 35 m d'épaisseur. Ce delta repose sur des graviers silteux interprétés comme du till, mais qui pourraient être également des dépôts glaciomarins. La barre rocheuse au sud du delta est pratiquement dépourvue de sédiments meubles, à l'exception d'un mince placage de till dans une petite dépression au pied de son flanc sud.

La vallée de la Neigette a connu une évolution relativement complexe (Hétu, 1998). D'abord occupée par la calotte appalachienne lors de la construction des deltas de contact glaciaire de Saint-Odile, de Saint-Anaclet et de Luceville, elle a ensuite été le lieu de fonte sur place de masse de glace résiduelle avant d'être envahie par la Mer de Goldthwait. Pendant la phase marine, les eaux fluvioglaciaires y construisaient deux deltas vers 127 m d'altitude; ils sont situés contre l'escarpement sud de la vallée un peu à l'est du hameau de Neigette (**Figure 4.3**). La stratigraphie de la vallée reflète cette histoire complexe. Elle débute à la base par une unité de sables et graviers fluvioglaciaires de 10 à 20 m d'épaisseur qui repose directement sur le roc. Ces matériaux granulaires sont scellés par une épaisse formation argileuse dont la puissance atteint par endroits près de 30 mètres. La séquence se termine en surface avec une seconde formation granulaire de 20 m d'épaisseur constituée de sables et graviers d'origine mixte (deltaïques par endroits, fluviaux dans la partie la plus basse de la vallée). Enfin, le plateau au-dessus de la limite marine ne présente qu'un mince placage de till moulant la roche en place. Le groupe de Chaleurs est composé de mudrock, de grès et de calcaire, alors que, tel que mentionné plus haut à la coupe A-A', les groupes de Trois-Pistoles et de Saint-Roch sont composés d'argilite, de schiste et de siltite.

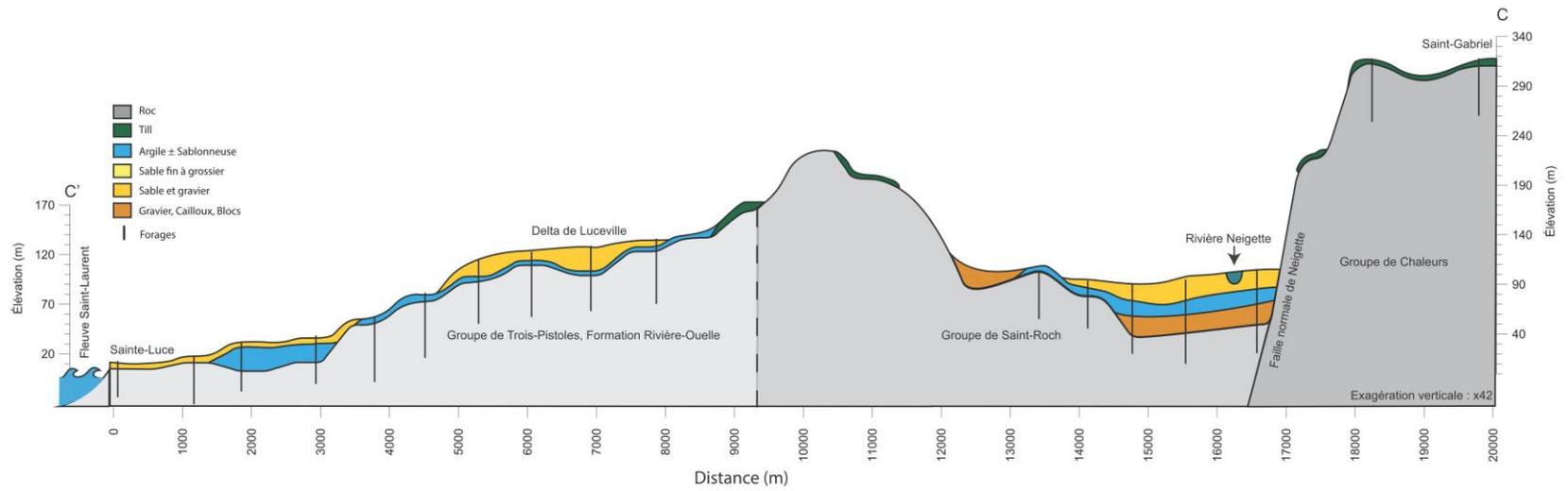


Figure 4.12. Coupe transversale de Saint-Gabriel à Sainte-Luce

La coupe de la vallée de Mitis D-D'

Cette coupe présente le fond de la vallée de la rivière Mitis entre le kilomètre 24 et l'embouchure (**Figure 4.13**). Tout comme la coupe de la rivière Matane décrite ci-dessous, elle illustre l'architecture des dépôts dans un tronçon de vallée fluviale sous la limite marine. Les sédiments de cette vallée qui a été envahie par la Mer de Goldthwait immédiatement après la déglaciation (dès 15 000 ans BP d'après une date obtenue par Locat (1977) près de Saint-Donat) sont décrits en détail par Desmarais (1988).

La vallée peut être subdivisée en deux sections. En aval de Sainte-Angèle-de-Mérici, le plancher rocheux ondulant de la vallée est partiellement masqué par des cailloutis d'origine fluvioglaciaire d'épaisseur variable (moins de 3 m entre les km 17 et 12 ; 8 m dans le secteur de Price) complètement scellés par une épaisse formation silto-sableuse s'apparentant à des dépôts marins de Mer de Goldthwait dont la puissance varie entre 10 m et plus de 40 m. La séquence se termine au sommet par des sables et graviers fluviaux et deltaïques (delta de Price) dont l'épaisseur moyenne est de l'ordre de 5-6 m. La portion aval de la vallée offre donc la possibilité d'un aquifère confiné d'où s'approvisionne la municipalité de Price et d'un autre aquifère confiné, soupçonné très productif, en aval de Sainte-Angèle-de-Mérici dans le secteur de la confluence de la rivière Neigette et de Mitis. Dans la portion amont de la coupe, entre les kilomètres 17 et 24, on observe principalement des sédiments granulaires, soit un cailloutis fluvioglaciaire à la base (3 à 15 m d'épaisseur), des sables silteux vraisemblablement d'origine estuarienne au milieu (± 10 m) et des sables et graviers fluviaux au sommet (± 10 m).

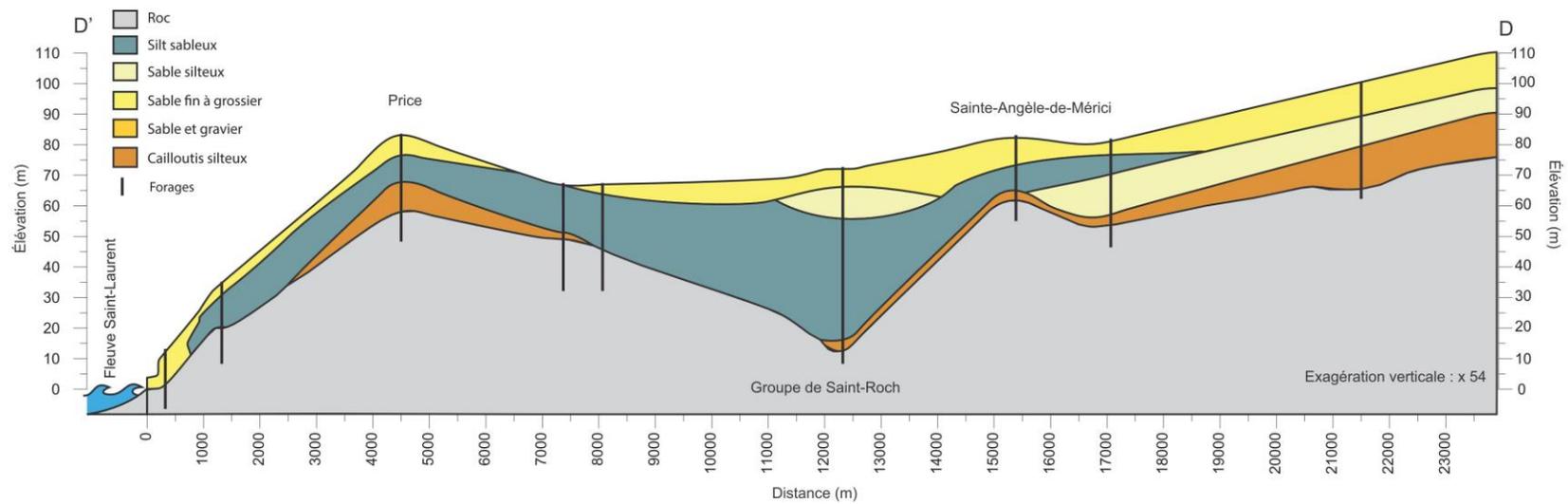
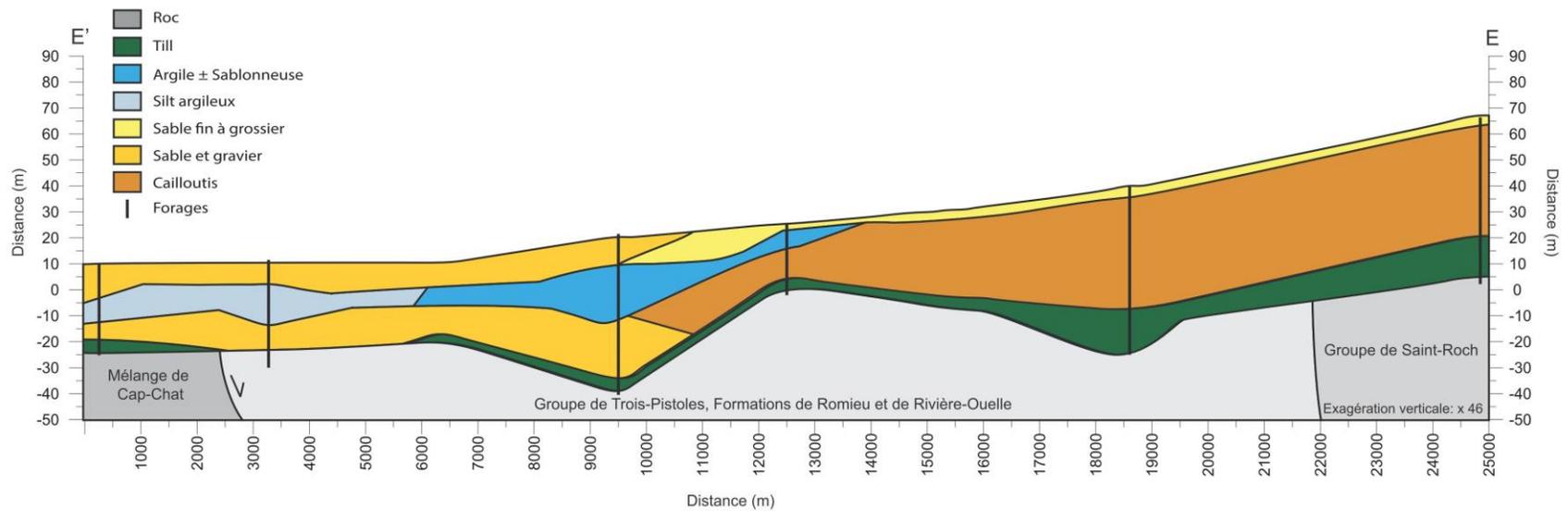


Figure 4.13 : Coupe longitudinale dans la vallée de la rivière Mitis

La coupe de la vallée de la rivière Matane E-E'

La vallée de la Matane a connu une évolution particulière qui est passablement différente des autres vallées du territoire. Durant la déglaciation, elle a longtemps été occupée par une langue glaciaire inactive. Les eaux fluvioglaciaires qui s'en échappaient ont accumulé contre ses flancs de gros volumes de sédiments fluvioglaciaires qui prennent aujourd'hui la forme de terrasses de kame accrochées aux versants rocheux de la vallée (Coll, 1995; Marchand et al.2014). Les replats de ces terrasses de kame, localement trouées de kettles, sont perchés à plus de 40 m au-dessus du fond de la vallée. Coincées entre les versants rocheux de la vallée et la plaine alluviale, ces terrasses de kame constituées de sédiments granulaires sont probablement des zones de recharge importantes pour l'aquifère contenu dans les sédiments fluvioglaciaires et fluviatiles qui tapissent le fond de la vallée. Après la déglaciation, la vallée a été envahie par un bras relativement étroit de la Mer de Goldthwait. Les sédiments qui composent le remplissage sédimentaire de la vallée entre les kilomètres 7 et 9 ont été décrits en détail par Marchand et al. (2014).

Les terrasses de kame ne sont pas apparentes sur la coupe car elle a été levée le long de la route qui suit le fond de la vallée entre le Village Dancause et le centre-ville de Matane (**Figure 4.14**). Le remplissage sédimentaire de la vallée peut être subdivisé en deux parties. Étant relativement simple dans la partie amont (entre les km 11 et 25), puisqu'il est essentiellement composé d'un mince dépôt de till (<3 à >15 m) surmonté d'un épais cailloutis fluvioglaciaire (20 à plus de 50 m d'épaisseur), il devient plus complexe dans la section aval. Le remplissage essentiellement granulaire de la partie aval contient en son centre une grande unité composée de sédiments fins (argile et silt) coincée entre deux formations de sable et gravier. Le roc sous l'unité de sable et gravier inférieure est scellé par une couche de till sur la majeure partie de cette section. Alors que la partie amont abrite un aquifère libre composé de sables, de graviers et de blocs d'origine fluviatile et fluvioglaciaire, la partie aval (à partir du centre de ski Mont-Castor) héberge un aquifère confiné coincé entre la couche de till basal et l'unité de sédiments fins (argile et silt). Cet aquifère confiné est probablement alimenté, du moins localement, par les zones de recharge qui transitent à travers les terrasses de kames, mais principalement par les dépôts granulaires libre situés dans la portion amont de la vallée.



4.3 Délimitation des grands contextes hydrogéologiques régionaux

Sur le territoire étudié, on distingue deux principaux contextes hydrogéologiques correspondant aux régions physiographiques : la Plaine Côtière et les Hautes-Terres (**Figure 4.15**). La zone de la Plaine Côtière fait référence aux territoires qui ont été submergés par la mer de Goldthwait il y a environ 13 000 ans. L'altitude des territoires submergés décroît d'Ouest en Est (Hétu, 1998), c'est-à-dire qu'une plus grande superficie de territoires a été immergée dans le secteur de Trois-Pistoles (altitude ~165m) que dans celui des Méchins (altitude ~90m). La Plaine Côtière comprend les grandes plaines agricoles de faible dénivelé en bordure de l'estuaire maritime où l'on retrouve 16 (41%) municipalités du territoire étudié. Elle comprend également tous les fonds de vallée entre les crêtes rocheuses, tel que la vallée de la route 132 dans les secteurs de Saint-Fabien et de Saint-Simon, ainsi que la majorité des vallées alluviales, comme dans les secteurs de Saint-Mathieu-de-Rioux, Saint-Donat et Sainte-Angèle-de-Mérici. Les Hautes-Terres englobent tous les reliefs dont l'altitude est supérieure à ~150 m. Elles sont le contexte hydrogéologique dominant avec 73 % de la superficie du territoire d'étude. Elles correspondent aux hauts plateaux disséqués et ondulés ou aux massifs de collines arrondies où les dépôts meubles sont minces. À titre d'exemple, les municipalités de Saint-Valérien, Saint-Octave, Saint-Narcisse et Sainte-Blandine sont localisées sur les Hautes-Terres. D'un point de vue hydrogéologique, les deux contextes sont distincts en raison des épaisseurs et de la nature des dépôts meubles qu'on y retrouve et qui influenceront des dynamiques hydrogéologiques distinctes.

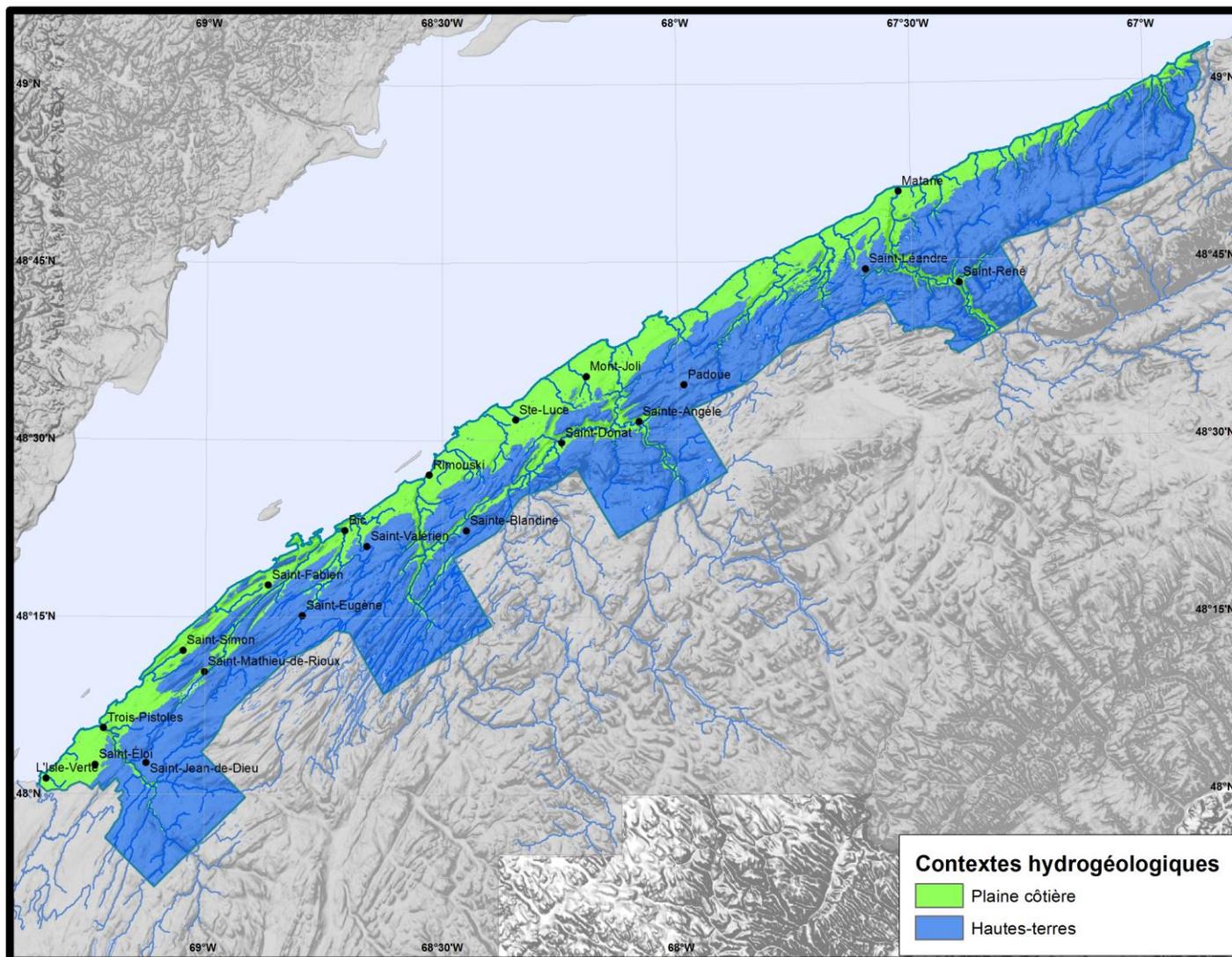


Figure 4.15. Délimitation des contextes hydrogéologiques régionaux du territoire du PACES-NEBSL.

4.4 Épaisseur de dépôts meubles

Descriptif du livrable

Une carte isopaque, ou carte de l'épaisseur totale des dépôts meubles, est essentielle à la connaissance des systèmes aquifères et des aquitards car elle permet d'orienter rapidement les recherches en eau.

Méthodologie

Les données utilisées pour la réalisation de ce livrable proviennent des forages et des levés sismique réalisés dans le cadre du projet, ainsi que les bases de données de forages du SIH, du MTQ, de la compilation des rapports de recherche en eau des municipalités du territoire et de la carte des dépôts meubles. Les épaisseurs des différentes unités hydrostratigraphiques provenant de ces différentes sources ont toutes été additionnées et ont été directement interpolées par krigeage ordinaire en fonction de chacun des contextes hydrogéologiques et de la limite marine estimée à 150 m.

Analyse du livrable

Sur la carte 15, on retrouve les épaisseurs de dépôts meubles les plus importantes au niveau des deltas de Trois-Pistoles, de Saint-Anaclet, de Luceville, de Price et de Matane avec une épaisseur maximale observée de 65 m à Trois-Pistoles. On retrouve également des épaisseurs considérables dans les fonds de vallée des rivières Matane (épaisseur moyenne de 30 m), Neigette (moyenne de 45 m secteur chute Neigette) et Mitis (60 m à Sainte-Angèle-de-Mérici secteur confluence rivières Mitis-Neigette). On retrouve de très faibles épaisseurs de sédiments recouvrant le roc sur les hautes terres (épaisseurs de moins de 2 m). La carte 15 permet de faire ressortir que les dépôts meubles de grande épaisseur sont plutôt ponctuels sur le territoire, ce qui fait que les aquifères granulaires de bonne envergure sont assez rares et très localisés sur le territoire.

En complément à l'estimation de l'épaisseur totale des dépôts meubles, l'épaisseur des sédiments argileux et des sédiments sus-jacents aux sédiments argileux a aussi été estimée (**Figure 4.16** et **Figure 4.17**). Étant donné que les sédiments sous-jacents aux sédiments argileux sont très localisés et généralement de faible épaisseur, aucune carte traitant de cet aspect n'a été produite.

La distribution des épaisseurs de sédiments argileux estimées (**Figure 4.16**) fait bien ressortir les contextes hydrogéologiques du Bas-Saint-Laurent et la limite marine de la mer de Goldthwait puisque les unités argileuses s'étendent sur presque la totalité de la Plaine Côtière, entre les crêtes appalachiennes, ainsi que dans les fonds de vallée en contraste avec les Hautes-Terres. Une épaisseur maximale de 60 m est observée dans le secteur de Trois-Pistoles. On retrouve également des épaisseurs de plus de 25 m autour de Rimouski et dans les vallées des rivières

Neigette et Mitis. Ces variations d'épaisseur permettent d'évaluer le degré de confinement des aquifères captifs. Ces sédiments argileux réduisent considérablement l'infiltration et la circulation d'eau souterraine, diminuant ainsi la recharge potentielle des aquifères sous-jacents aux sédiments argileux, tout en jouant le rôle de frontière protectrice diminuant ainsi leur vulnérabilité.

L'approvisionnement en eau à partir de puits de surface (souvent appelés fontaines) est largement employé sur le territoire du Bas-Saint-Laurent. Les dépôts meubles constituant ces aquifères de surface sont principalement des sédiments littoraux ou des sédiments sableux alluviaux. La **Figure 4.17** représente la distribution des valeurs d'épaisseur de matériel identifié comme étant «granulaire» surmontant une unité argileuse imperméable pour les contextes hydrogéologiques de la Plaine Côtière et dans les vallées alluviales. La **Figure 4.17** montre que ce sont dans les deltas de Trois-Pistoles, de Price et de Matane, ainsi que dans le secteur de la chute Neigette et en aval de la vallée de la Matane que l'on retrouve les plus grandes épaisseurs de dépôts granulaires surmontant l'argile. Ces unités atteignent plus de 20 m par endroits et malgré cette épaisseur, la portion saturée de ces corps granulaires est si faible (par exemple les deltas de Trois-Pistoles et du Bic) qu'il devient fort difficile de soutirer un volume d'eau souterraine intéressant.

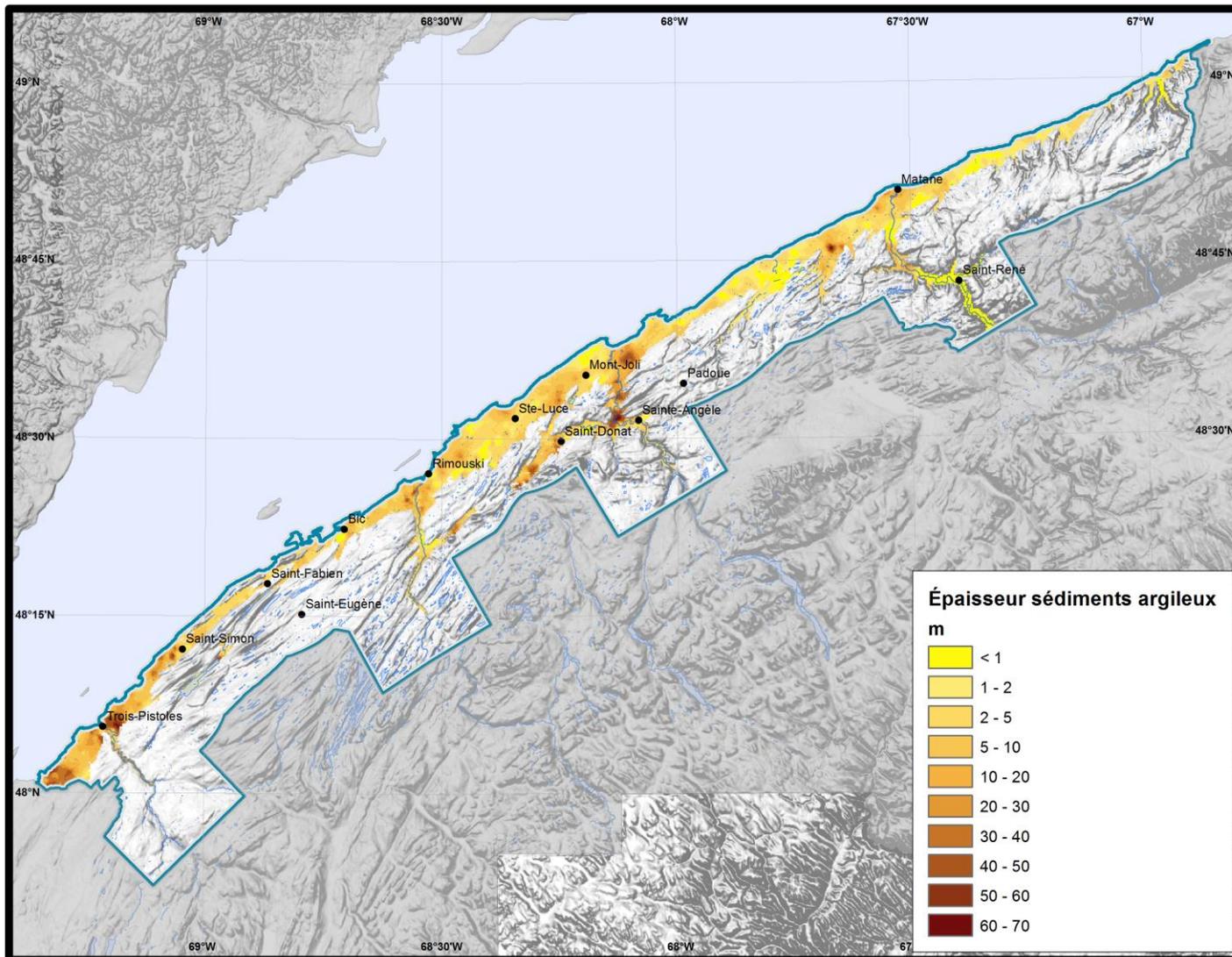


Figure 4.16. Épaisseur de sédiments argileux.

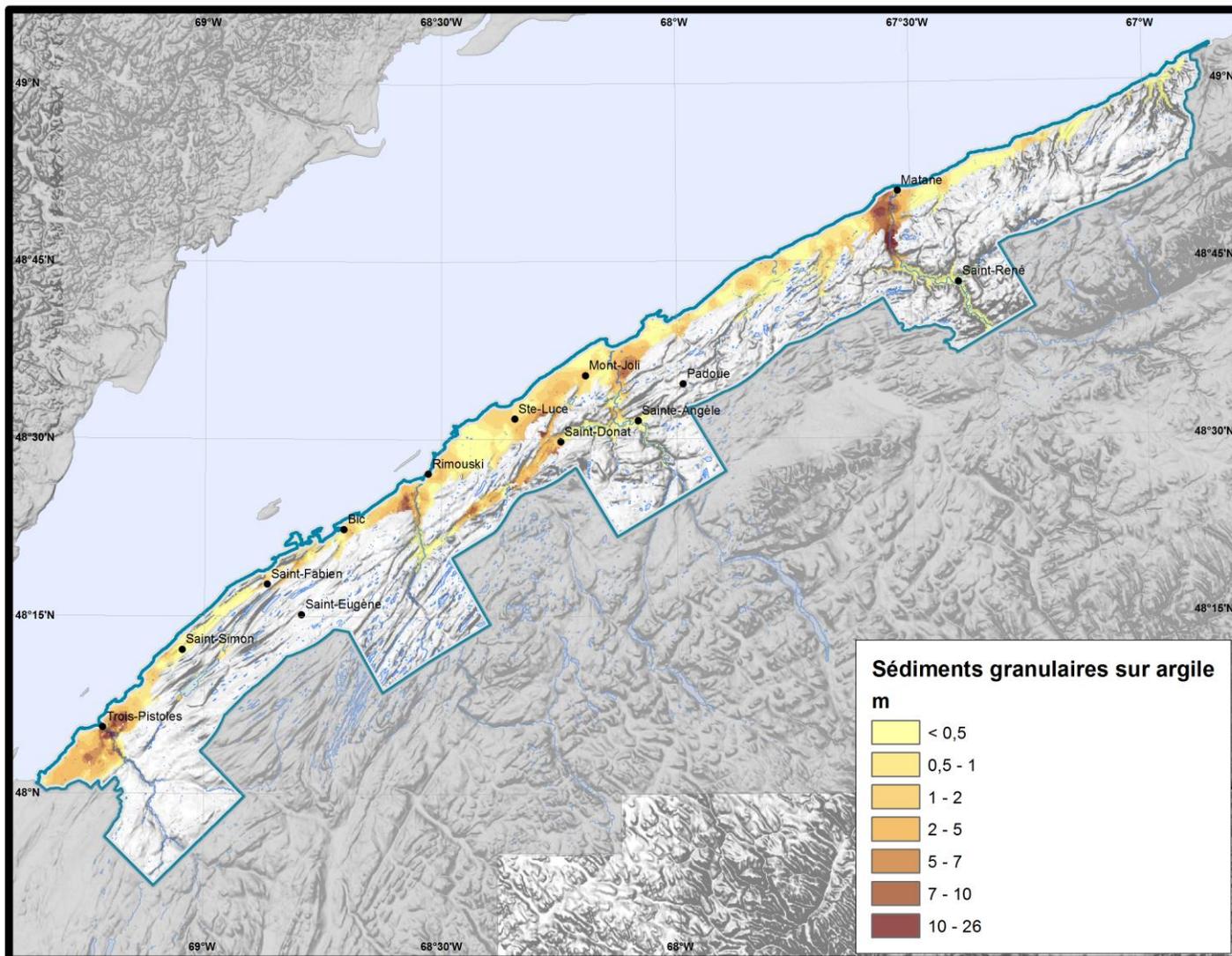


Figure 4.17. Épaisseurs de sédiments granulaires surmontant les sédiments argileux.

4.5 Topographie du roc

Descriptif du livrable

Le livrable Topographie du roc (carte 16) représente l'altitude du socle rocheux. Une carte de la profondeur du roc est un outil utile afin de repérer d'éventuelles vallées enfouies pouvant contenir d'importants aquifères granulaires.

Méthodologie

La topographie du roc a été calculée en jumelant deux méthodes. Dans les secteurs avec de grandes épaisseurs de dépôts, l'élévation du socle rocheux a directement été interpolée en soustrayant l'épaisseur des dépôts de l'élévation du sol. La morphologie du socle rocheux devient ainsi indépendante de la surface du terrain. Pour les secteurs à faible épaisseur de dépôts où la surface du sol est susceptible de refléter la morphologie du roc, la grille de l'épaisseur de dépôts meubles a été soustraite à la grille d'élévation du terrain.

Analyse du livrable

Sur le territoire, on observe que la morphologie du socle rocheux reflète la topographie de surface avec une diminution progressive de l'élévation du roc des Hautes-Terres vers l'estuaire, à l'exception des imposants deltas perchés. Les deltas de Trois-Pistoles, de Luceville, de Price et de Matane, en sont de bons exemples. À ces endroits, le socle plonge graduellement vers l'estuaire, alors que la topographie de surface se trouve à être surélevé par des deltas. Par ailleurs, quelques surcreusements du socle sont observables dans les vallées des rivières Neigette, Mitis et Matane, dont un particulièrement important à la confluence des rivières Mitis et Neigette à Sainte-Angèle-de-Mérici, où se trouve un aquifère granulaire productif, captif sous une épaisse couche d'argile. Comme on peut le voir sur la coupe stratigraphique de la rivière Matane (**Figure 4.14**), le profil longitudinal du socle rocheux de la vallée Matane présente une succession de crêtes et sillons enfouis sous les dépôts meubles.

4.6 Conditions de confinement

Descriptif du livrable

La carte 17 illustre la distribution spatiale des niveaux de confinement de l'aquifère rocheux de la zone d'étude. Les conditions de confinement applicables aux aquifères granulaires peuvent être différentes de celles déterminées pour l'aquifère rocheux. Compte tenu que ce type d'aquifère apparaît de façon discontinue et occupe des superficies plutôt limitée sur le territoire d'étude, aucune carte de confinement régionale pour ces dépôts n'a été produite. La nature et l'épaisseur des dépôts meubles constituant l'aquitard qui surmonte l'aquifère rocheux contrôlent le degré de

confinement de ce dernier. Le niveau de confinement peut donner un premier aperçu sur les zones de recharge préférentielles et sur la vulnérabilité de l'aquifère. Il peut également donner des indices sur la géochimie de l'eau.

Méthodologie

Les zones de confinement ont été déterminées par l'interpolation des épaisseurs des sédiments fins (**Tableau 4.2**). Dans le cas où plusieurs unités imperméables étaient présentes dans la description des forages, le niveau de confinement a été évalué selon l'unité la plus épaisse et non selon la somme de toutes les unités. La carte des dépôts meubles et des affleurements rocheux a aussi été utilisée pour combler les zones où il n'y avait aucun forage. Les différents critères utilisés pour définir les conditions de confinement sont résumés dans le **Tableau 4.2**.

Tableau 4.2. Critères de définition des conditions de confinement

Conditions de confinement	Critères utilisés
Nappe captive	Plus de 3 m de sédiments argileux ou plus de 5 m de sédiments fins.
Nappe semi-captive	De 1 à 3 m de sédiments argileux ou de 3 à 5 m de sédiments fins.
Nappe libre	Moins de 1 m de sédiments argileux ou moins de 3 m de sédiments fins.

Analyse du livrable

Sur la carte 17 on observe que les zones de nappe captive sont principalement localisées dans les secteurs ayant une altitude inférieure à 120 m, altitude légèrement inférieure à la limite d'immersion marine de la mer de Goldthwait. Ces secteurs correspondent entre autres à la Plaine Côtière, au fond des vallées (ex.: des rivières Mitis, Neigette ou Sud-Ouest) et aux sillons situés entre deux crêtes appalachiennes (ex. : le long de la route 132, secteurs de Saint-Simon / Saint-Fabien). L'aquifère rocheux du fond de la vallée de Matane est aussi considéré comme étant en condition captive en raison de la grande épaisseur de sédiments fins (till) qui recouvre le roc sur l'entièreté de la vallée. Les conditions de nappe semi-captives sont présentes majoritairement dans les Hautes-Terres et correspondent aux secteurs de till épais identifiés sur la carte de dépôts meubles. Les zones de nappe libre correspondent aux zones de manteau résiduel et d'affleurements rocheux.

4.7 Contextes hydrostratigraphiques

Description du livrable

Le livrable des contextes hydrogéologiques du guide des conditions générales de la réalisation des projets PACES (MDDELCC, 2011) a été redéfini sous l'appellation contextes hydrostratigraphiques. Cette modification a été apportée afin d'éviter toute confusion entre l'interprétation des grands contextes hydrogéologiques définis du territoire (la Plaine Côtière et les Hautes-Terres) qui ont des dynamiques hydrogéologiquement distinctes, et le livrable qui originellement avait la même appellation, mais qui réfèrait à la définition des séquences hydrostratigraphiques types du territoire. Le livrable des contextes hydrostratigraphiques (carte 18) représente la représentation planimétrique des séquences typiques d'unités hydrostratigraphiques que l'on retrouve sur le territoire du PACES-NEBSL. Ces séquences typiques ont été définies selon la fréquence à laquelle elles sont rencontrées dans les descriptifs de forages.

Méthodologie

Les sédiments ont été regroupés en fonction de leur potentiel hydrogéologique, de la dominance du matériel et de leur épaisseur. Quatre unités hydrostratigraphiques ont donc été définies : 1) matériel granulaire; 2) sédiments argileux; 3) sédiments fins; 4) roc. La **Figure 4.18** présente les regroupements effectués pour la définition des quatre unités hydrostratigraphiques. L'épaisseur de chaque unité a été prise en compte dans le choix et la simplification des contextes types, sauf dans certains cas. Par exemple, lorsqu'une lentille de granulaire d'une épaisseur non-significative était rencontrée à l'intérieur d'une épaisseur considérable d'argile, ou encore dans les cas où la séquence hydrostratigraphique devenait trop complexe et non représentative régionalement (au-delà de 4 unités hydrostratigraphiques). Les regroupements ont permis de définir huit séquences typiques :

- 1) granulaire / roc;
- 2) granulaire / sédiments argileux / granulaire/roc;
- 3) granulaire / sédiments argileux / roc;
- 4) granulaire / sédiments fins / roc;
- 5) sédiments argileux /granulaire / roc;
- 6) sédiments argileux / roc;
- 7) sédiments fins / roc;
- 8) roc affleurant;

La répartition des séquences hydrogéologiques types a été faite à partir de la distribution des forages fiables à l'intérieur des polygones de la carte des dépôts meubles. A l'intérieur de chaque polygone, les forages étaient interrogés pour connaître les contextes dominants. Les polygones étaient ensuite redécoupés en fonction de la répartition des séquences. Dans les secteurs sans

forage, par exemple dans les hautes terres, la séquence était attribué en fonction de la description des dépôts meubles (ex. : till mince sur roc).

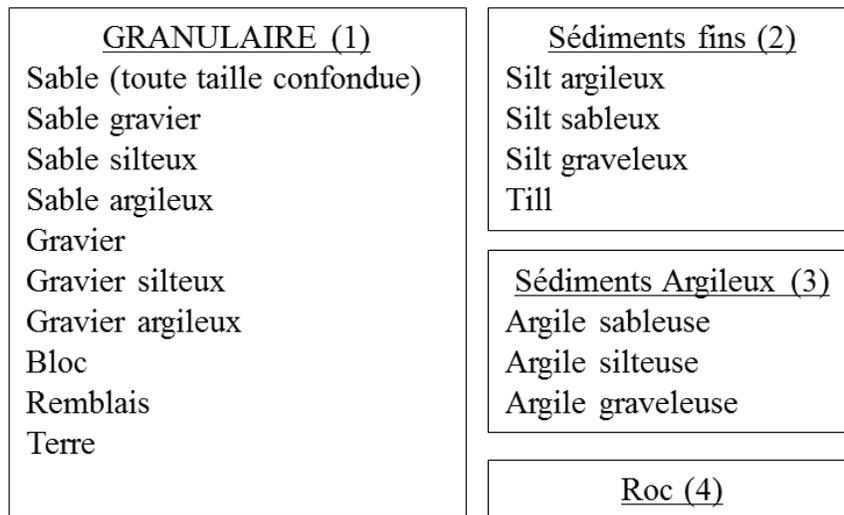


Figure 4.18. Regroupement des unités hydrostratigraphiques retrouvées dans la description des forages des différentes sources pour la définitions des unités hydrostratigraphiques.

Analyse du livrable

La distribution des séquences hydrostratigraphiques du livrable 18 (carte 18) indique une prédominance de la séquence de sédiments granulaires sur roc dans le contexte des Hautes-Terres. Ces sédiments granulaires correspondent aux altérites de la carte des dépôts de surface (carte 13). Sur la Plaine Côtière, la carte 18 montre que la séquence hydrostratigraphique dominante est celle du matériel granulaire / matériel argileux / roc. Cette séquence typique correspond aux sables littoraux surmontant l'argile marine de la mer de Goldthwait déposée sur le roc. Dans les vallées, on retrouve localement des aquifères granulaires captifs sous les sédiments argileux. Ces sédiments argileux sont souvent surmontés d'une mince couche de sédiments alluviaux récents, comme on peut l'observer sur la carte des dépôts de surface (carte 13). Sur la majorité de la vallée de la Matane, on retrouve la séquence de matériel granulaire / sédiments fins / roc. Dans cette vallée, les sédiments granulaires sont grossiers et sont composés d'alluvions et de matériel fluvioglaciaire sur une grande épaisseur (> 30 m en moyenne, puissance saturée de 28 m), alors que les sédiments fins sont interprétés comme du till épais et jouent le rôle d'aquitard de l'aquifère rocheux. Comme la déglaciation de la vallée de la Matane a été tardive (Coll, 1994; Marchand et al. 2014), on retrouve des sédiments argileux seulement dans la portion aval de la vallée où ils jouent le rôle d'aquitard pour les sédiments granulaires. Ces séquences typiques servent d'indicateurs régionaux des contextes pouvant être rencontrés dans un secteur. Elles peuvent fournir des informations d'intérêt pour l'exploration / l'exploitation et la gestion des ressources lorsque combinées à d'autres données telles que la géologie du Quaternaire et les épaisseurs des sédiments. Cependant elles ne peuvent pas remplacer les études hydrogéologiques locales.

5 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

5.1 Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques sont les caractéristiques permettant de quantifier les écoulements souterrains d'un aquifère. Les principales propriétés sont :

- 1- la conductivité hydraulique (K ; m/s) représente la capacité d'un milieu géologique à permettre l'écoulement de l'eau dans les pores des dépôts meubles ou dans les fractures d'un aquifère rocheux;
- 2- la transmissivité (T ; m²/s) est le produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur saturée de l'aquifère ($T=K \times b$, où b est l'épaisseur saturée de l'aquifère (m));
- 3- la capacité spécifique (CS , Q/s; m²/s) est le rapport entre le débit d'un puits (Q ; m³/s) et l'abaissement du niveau d'eau (m) dans le puits par rapport au niveau mesuré sans pompage (niveau statique). Si la transmissivité est inconnue, la capacité spécifique peut être employée pour son estimation (Theis, 1963).

Les approvisionnements municipaux, qu'ils proviennent d'un aquifère rocheux ou granulaire, doivent être caractérisés lors de la mise en place des ouvrages de captage. Le **Tableau 5.1** synthétise les contextes hydrogéologiques des réseaux d'approvisionnement en eau souterraine des municipalités du territoire et les propriétés hydrauliques des aquifères captés.

Tableau 5.1. Synthèse des valeurs de conductivité (K) et de transmissivité (T) des puits des municipalités ayant un réseau d’approvisionnement en eau souterraine sur le territoire du PACES-NEBSL.

MRC	Municipalités	Population totale	Totale d’eau consommée (m ³ /an)	Type d’aquifère	Indice de confinement	Transmissivité (m ² /s)	Conductivité hydraulique (m/s)
Rimouski-Neigette	Rimouski	48 155	8 218 127	Granulaire	Confiné	$3,11 \times 10^{-2}$	$1,59 \times 10^{-2}$
	Saint-Narcisse	1 100	90 829	Fracturé	Libre	$4,5 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-5}$
Les Basques	Saint-Clément	532	75 760	Fracturé	Libre	Ø	Ø
	Sainte-Françoise	415	22 641	Fracturé	Libre	Ø	Ø
	Saint-Jean-de-Dieu	1 606	202 027	Fracturé	Confiné	$4,16 \times 10^{-4}$	$1,38 \times 10^{-4}$
	Saint-Mathieu-de-Rioux	691	77 887	Granulaire	Libre	$2,57 \times 10^{-2}$	$3,21 \times 10^{-3}$
	Saint-Simon	446	61 507	Fracturé	Confiné	2×10^{-2}	$2,6 \times 10^{-4}$
Matane	Baie-des-Sables	620	125 087	Fracturé	Confiné	$2,31 \times 10^{-3}$	$7,71 \times 10^{-5}$
	Matane	14 600	9 418 118	Granulaire	Confiné	$5,6 \times 10^{-3}$	$3,75 \times 10^{-4}$
	Saint-René-de-Matane	1 022	63 120	Granulaire	Libre	$4,16 \times 10^{-3}$	$3,78 \times 10^{-4}$
La Mitis	Price	1 742	255 779	Granulaire	Confiné	$5,4 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$
	Sainte-Angèle-de-Méridi	1 068	232 163	Granulaire	Libre	$9,41 \times 10^{-3}$	$7,78 \times 10^{-4}$
	Sainte-Luce	3 000	571 519	Granulaire	Libre	$7,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
	Saint-Octave-de-Métis	516	115 954	Granulaire	Confiné	$1,6 \times 10^{-3}$	$4,25 \times 10^{-5}$

5.1.1 Essais de pompage des puits de l'aquifère rocheux du PACES-NSBL

Des essais de pompage ont été effectués dans sept puits installés dans l'aquifère rocheux. Les essais ont été faits par paliers variant de 40 à 120 minutes à des débits situant entre 4 et 36 L/min, en fonction de la productivité du roc. L'interprétation de la remontée révèle que la productivité hydraulique de ces formations rocheuses est de l'ordre de ~ 8-10 L/min. Les résultats de transmissivité (T) et de conductivité hydraulique (K) ont été calculés en remontée à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 5.2**.

Tableau 5.2. Résultats de transmissivité (T) et de conductivité hydraulique (K) des sept essais réalisés dans le cadre du PACES-NEBSL dans les formations rocheuses.

Puits	Formation géologique	Prof. roc	Prof. tot.	Confinement	T (m ² /s)	K (m/s)
Sainte-Luce	Schiste	5,18	45,7	Confiné	1,30×10 ⁻⁴	2,85×10 ⁻⁶
Mont-Comi (particulier)	Schiste	1	25	Libre	1,28×10 ⁻⁴	9,53×10 ⁻⁶
Notre-Dame-des-Neiges	Schiste	1	45,72	Libre	2,79×10 ⁻⁵	5,59×10 ⁻⁷
Padoue	Schiste		45,7	Libre	4,46×10 ⁻⁵	8,92×10 ⁻⁷
Saint-Éloi	Schiste	15,89	45,8	Confiné	6,09×10 ⁻⁴	2,03×10 ⁻⁵
Saint-Eugène-de-Ladrière	Schiste/grès	1	30,5	Libre	5,84×10 ⁻⁵	1,17×10 ⁻⁶
Saint-Narcisse (MDDELCC)	Schiste/grès	2,1	19	Libre	4,26×10 ⁻⁵	2,70×10 ⁻⁶

5.1.2 Essais à charge variable

Le **Tableau 5.3** présente les plages de conductivité hydraulique de tous les piézomètres aménagés dans les dépôts meubles dans le cadre du projet PACES-NEBSL incluant les deux piézomètres appartenant au Réseau de suivi des eaux souterraines du MDDELCC. Les valeurs ont été calculées à partir de la remontée de la charge selon la méthode Hvorslev (1951). Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues par ces essais sont cohérentes avec celles présentées par Freeze et Cherry (1979) pour ces types de matériaux.

Tableau 5.3.Plages de conductivités hydrauliques calculées à partir des essais à charge variable

Piézomètres	Confinement	Formation géologique	K (m/s)
Neige 01	Libre	Sable gravier	$1,08 \times 10^{-4}$
Neige 02	Confiné	Sable gravier	$9,32 \times 10^{-5}$
Neige 05	Confiné	Sable	$4,03 \times 10^{-7}$
Fab 03	Confiné	Sable gravier	$5,22 \times 10^{-7}$
Fab04	Libre	Sable gravier	$1,08 \times 10^{-4}$
Math 01	Libre	Sable gravier	$9,66 \times 10^{-7}$
Math 02	Confiné	Sable moyen	$1,57 \times 10^{-4}$
Matane 09	Semi-confiné	Sable gravier	$4,81 \times 10^{-6}$
Matane 10	Libre	Gravier	$5,39 \times 10^{-5}$
Matane 11	Libre	Gravier	$1,11 \times 10^{-5}$
Matane 12	Libre	Sable gravier	$3,28 \times 10^{-6}$
Mitis 06	Semi-Confiné	Sable	$2,46 \times 10^{-4}$
Mitis 08	Confiné	Gravier	$1,33 \times 10^{-7}$
02000002	Libre	Sable littoral	$1,10 \times 10^{-4}$
02167001	Confiné	Gravier moyen	$2,88 \times 10^{-3}$

5.1.3 Perméamètre Guelph

Le **Tableau 5.4** présente les valeurs moyennes de conductivité hydraulique du milieu non saturé (K_{fs}) pour l'ensemble des types de dépôts de surface que l'on rencontre sur le territoire, tandis que la **Figure 5.1** présente la distribution spatiale des valeurs de conductivité hydraulique médiane des unités quaternaires. Il y a très peu de variabilité dans les valeurs calculées, la grande moyenne correspond à $2,59 \times 10^{-5}$ m/s. Cette faible variabilité pourrait être expliquée par le fait que les relevés ont été effectués principalement sur des terres agricoles et que ces dépôts ont été remaniés au-delà de la profondeur excavée (environ 70 cm) pour faire les relevés.

Tableau 5.4. Conductivités hydrauliques médianes et moyennes des unités quaternaires

Type de dépôts	Nombre d'observation	Médiane K_{fs} (m/s)	Moyenne K_{fs} (m/s)
Résiduels	9	$3,29 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$
Till mince	7	$1,28 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$
Till épais	7	$8,07 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-5}$
Alluviaux	4	$5,20 \times 10^{-6}$	$1,82 \times 10^{-5}$
Fluvioglaciaires	19	$1,20 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$
Delta glaciaire	1	$3,56 \times 10^{-6}$	$3,56 \times 10^{-6}$
Marins profonds	9	$1,08 \times 10^{-5}$	$3,51 \times 10^{-5}$
Deltaïques	4	$1,24 \times 10^{-5}$	$1,38 \times 10^{-5}$
Littoraux anciens	18	$2,12 \times 10^{-5}$	$5,06 \times 10^{-5}$
Littoraux actuels	1	$6,06 \times 10^{-6}$	$6,06 \times 10^{-6}$
Intertidaux	2	$6,78 \times 10^{-6}$	$4,53 \times 10^{-6}$
Organiques	4	$1,74 \times 10^{-6}$	$7,20 \times 10^{-7}$
Colluvions	4	$2,90 \times 10^{-5}$	$3,15 \times 10^{-5}$

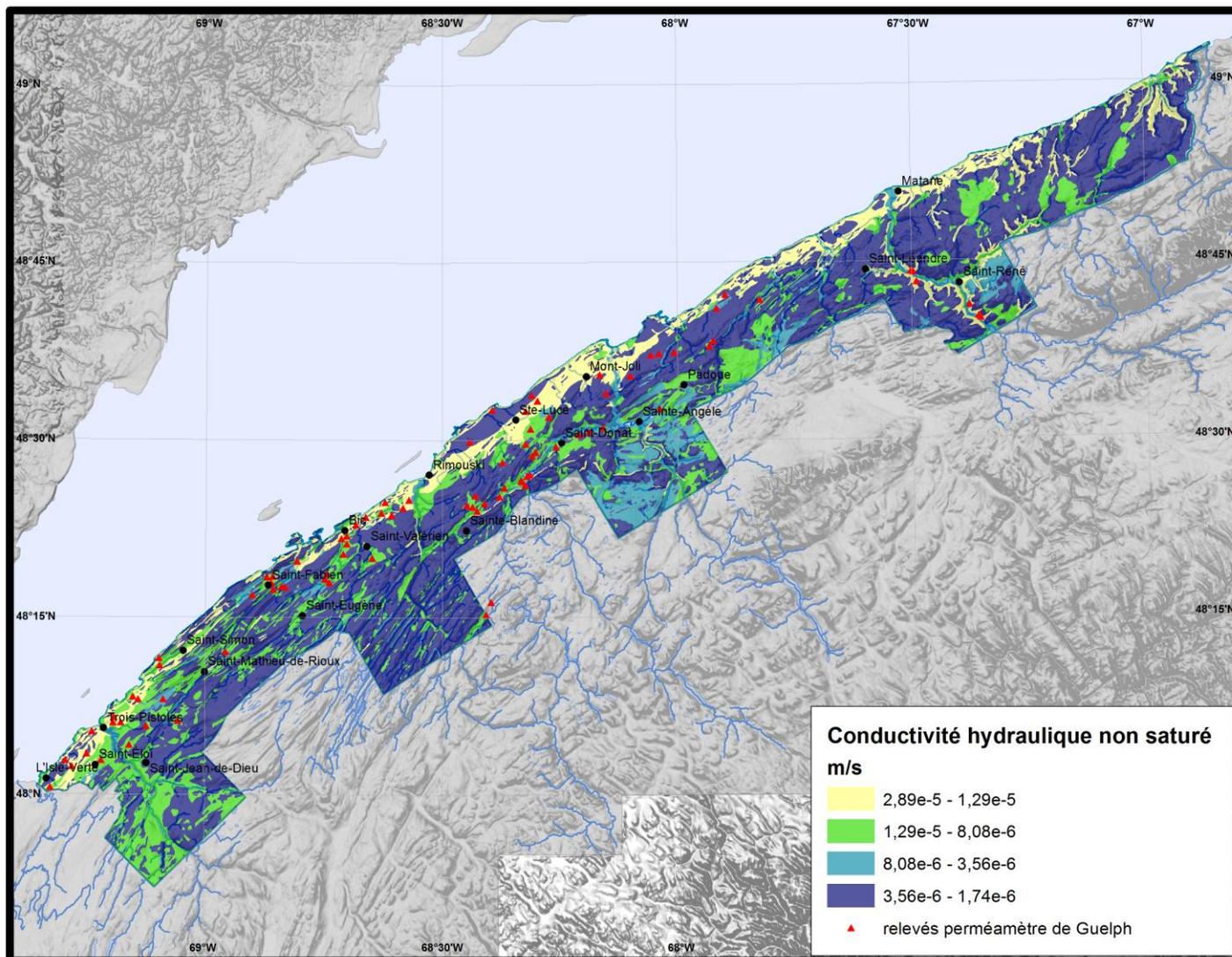


Figure 5.1. Distribution spatiale des valeurs médianes de conductivité hydraulique du milieu non saturé des formation superficielles obtenues par les essais au perméamètre de Guelph.

5.1.4 Estimation de la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux à partir de la capacité spécifique

À partir des données de niveaux statiques, de niveaux dynamiques et de débits provenant de la base de données du Système d'information hydrogéologique (SIH), il est possible d'estimer la transmissivité et la conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux. Seuls les forages de plus de 20 m dans le roc et dont la durée du pompage était supérieure à une heure ont été conservés pour l'estimation de la transmissivité à partir de cette base de données. Considérant ces deux conditions, le nombre de forages du SIH permettant d'estimer les paramètres hydrauliques diminue à 2079 sur 4043 au total (51%). La transmissivité (T) a été calculée selon l'équation de Theis (1963) :

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

T= transmissivité (m²/s)

Q= débit (m³/s)

h₀= niveau statique (m)

h=temps (s)

S= emmagasinement (sans dimension)

Comme T apparaît dans la portion arithmétique et logarithmique de l'équation, la valeur de transmissivité ($2,6 \times 10^{-4}$ m²/s) basée sur les essais de pompage réalisés dans le PACES a donc été utilisée dans la portion logarithmique de l'équation. La valeur d'emmagasinement est déterminé selon la condition de confinement de l'aquifère (en condition libre, $S = 1 \times 10^{-2}$; en condition semi-captive, $S = 5 \times 10^{-3}$; en condition captive, $S = 5 \times 10^{-5}$). Ces valeurs ont été établies à partir des valeurs d'emmagasinement du roc recensées dans les rapports hydrogéologiques du territoire.

La valeur de conductivité hydraulique (K) est ensuite calculée à partir de la relation :

$$K=T/b$$

où *b* correspond à l'épaisseur saturée de l'aquifère.

L'épaisseur saturée est un paramètre difficile à estimer avec précision pour un aquifère rocheux contrairement à un aquifère granulaire, mais elle peut tout de même être évaluée en considérant l'intervalle ouvert au roc sous le niveau d'eau statique. La **Figure 5.2** présente la distribution des valeurs de conductivité hydraulique des forages du SIH estimées à partir de la capacité spécifique. On peut y observer une certaine variabilité (majoritairement entre $\times 10^{-4}$ et $\times 10^{-6}$ m/s) dans la distribution et la moyenne des valeurs de conductivité est de $7,21 \times 10^{-5}$ m/s. Les conductivités hydrauliques obtenues à partir des essais de pompage dans les puits de l'aquifère rocheux du PACES-NEBSL (**Figure 5.2**), de même que les valeurs théoriques que l'on peut

retrouver dans la littérature (Freeze et Cherry, 1979) sont toutefois beaucoup moins élevées que les estimations de conductivité hydraulique à partir de la capacité spécifique des données du SIH. Ces différences sont probablement attribuables à la faible fiabilité des valeurs que l'on retrouve dans la base de données du SIH qui ont été utilisé dans le calcul de la capacité spécifique.

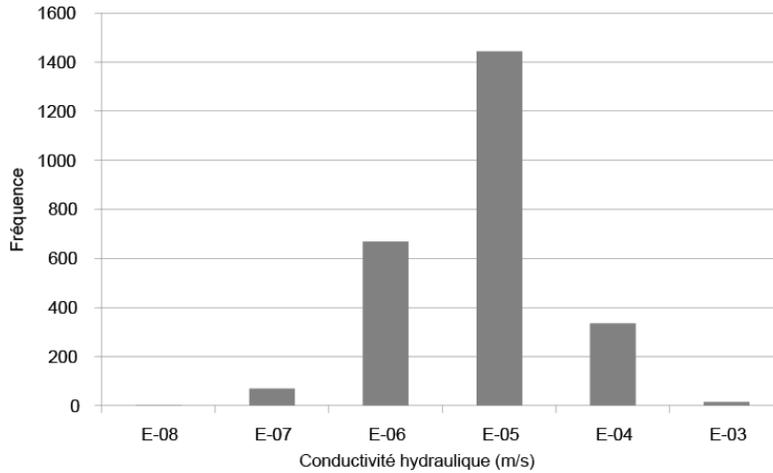


Figure 5.2. Histogramme de fréquences des valeurs de conductivité hydraulique (K) calculées pour les puits du SIH à partir de la capacité spécifique (C_s)

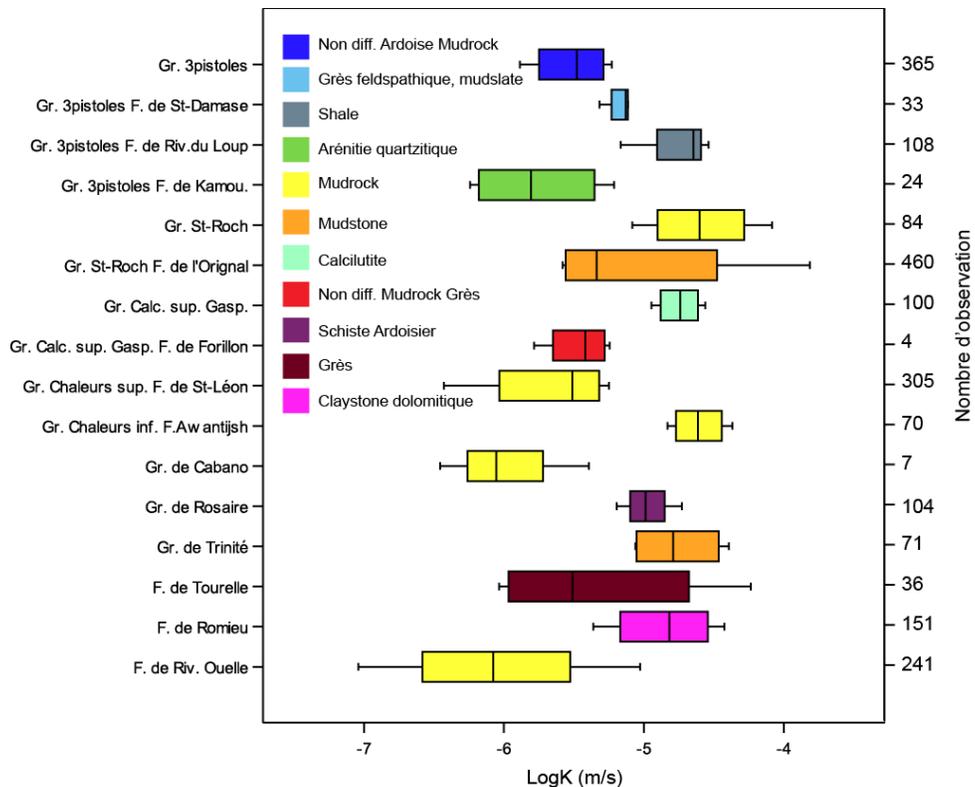


Figure 5.3. Diagramme de boîtes à moustaches (box plot) du logarithme de la conductivité hydraulique ($\log_{10}(K)$) provenant des forages du SIH pour les différentes unités géologiques du Bas-Saint-Laurent. Gr = groupe, F = formation.

La **Figure 5.3** présente la distribution des valeurs de conductivité hydraulique (transformées en Log10) regroupées par unité géologique (formations et groupes). Peu de tendances ressortent dans la comparaison intergroupes ou formations. Malgré les différents types de lithologie, ces groupes et formations de roches tendres ont toutes des conductivités hydrauliques estimées similaires et ne sont significativement pas différents entre eux, mis à part le groupe de Trois-Pistoles avec le groupe des Calcaires Supérieurs de Gaspésie, et ce dernier avec la formation de Rivière Ouelle (Tukey $p < 0,02$ et $p < 0,01$ respectivement). La **Figure 5.4** représente la carte des valeurs médianes de conductivités hydrauliques des groupes et formations rocheuses du territoire du PACES-NEBSL. Les valeurs médianes de conductivité hydraulique des groupes et formations intègrent autant les conductivités hydrauliques calculées avec la capacité spécifique calculée des données du SIH, que des résultats d'essais de pompage effectués dans le projet et de la compilation des rapports hydrogéologiques. Bien que la **Figure 5.4** présente quatre plages de valeurs conductivités hydrauliques, celles-ci demeurent similaires tel qu'observable sur la **Figure 5.3**. On observe toutefois que les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les formations issues de l'orogénèse acadienne en raison de leur lithologie de calcaire, de grès et conglomérat.

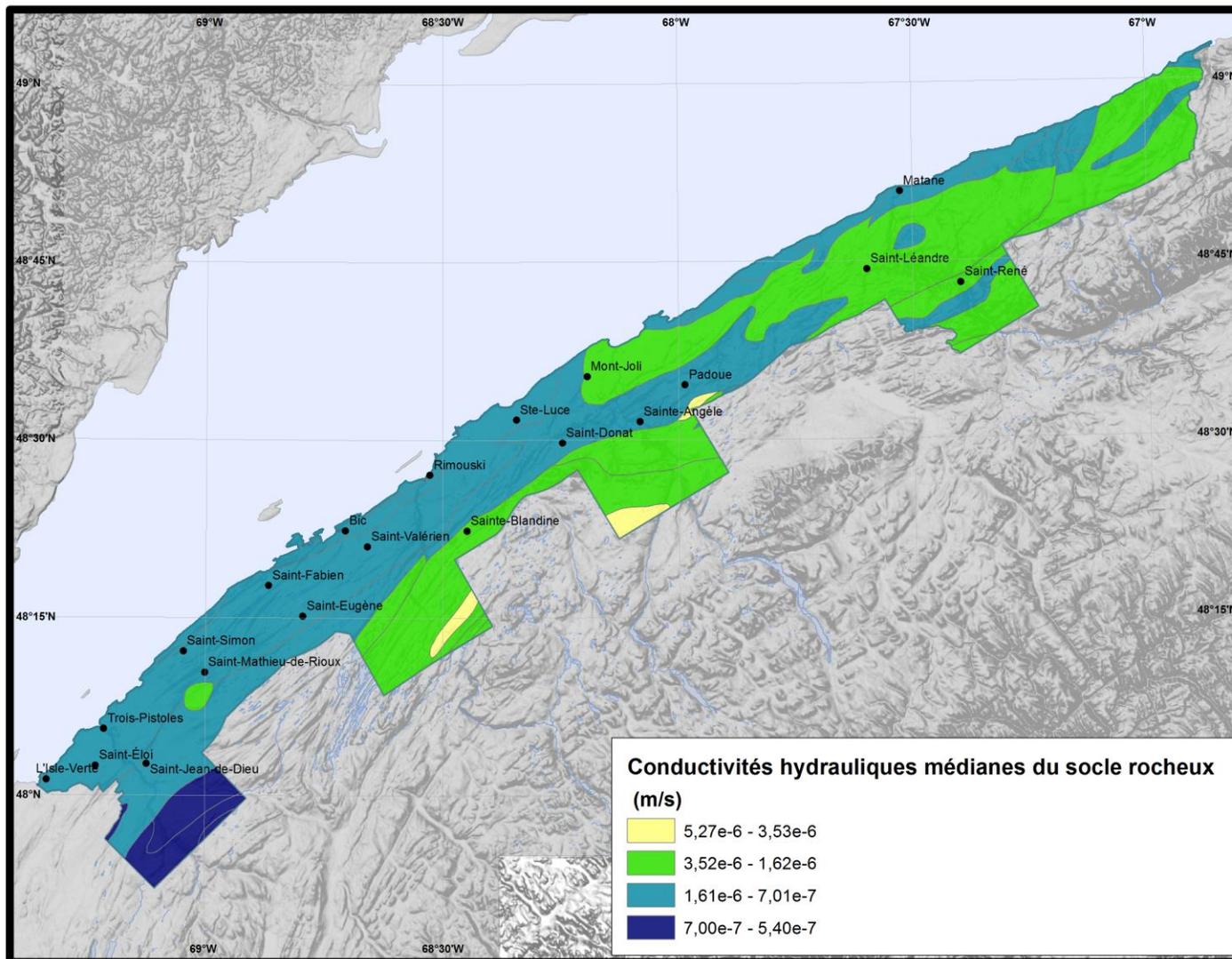


Figure 5.4 : Carte des valeurs médianes de conductivité hydraulique des divers groupes et formations rocheuses du territoire du PACES-NEBSL

La variabilité de K intra et inter unités géologiques serait beaucoup plus attribuable à la profondeur des forages. La **Figure 5.5** représente le nuage de dispersion de la conductivité hydraulique qui diminue en profondeur. Bien que l'intensité de la relation soit relativement faible ($r=0,38$), la relation est tout de même significative ($p>0,05$). La diminution de la conductivité hydraulique indique que le réseau de fractures devient de moins en moins important en profondeur, toutes lithologies confondues.

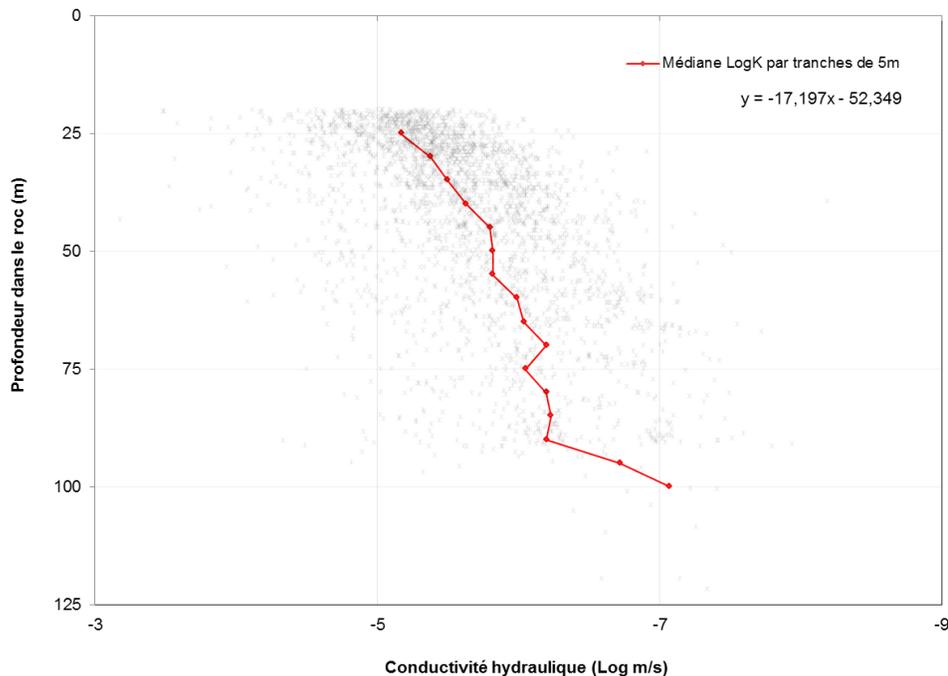


Figure 5.5. Conductivité hydraulique en fonction de la profondeur des forages. Le graphique montre la diminution de la conductivité hydraulique en fonction de l'augmentation de la profondeur du forage. Cette relation signifie une diminution du niveau de fracturation du socle en profondeur, toute lithologie confondue.

5.2 Piézométrie, écoulements et suivi des niveaux

Description du livrable

La carte 20 présente la piézométrie régionale de l'aquifère rocheux. La piézométrie représente la hauteur de la nappe (aussi appelé charge hydraulique) par rapport au niveau moyen de la mer. Tout comme pour un écoulement de surface, l'écoulement souterrain se produit du point le plus haut vers le point le plus bas. La carte piézométrique est donc une représentation planimétrique de la distribution des charges hydrauliques et donne une vue d'ensemble de la dynamique de l'écoulement de l'eau souterraine de l'aquifère régional. Compte tenu du faible nombre de données de niveaux d'eau disponibles dans les aquifères granulaires de la zone d'étude, la piézométrie régionale des formations granulaire n'a donc pas été produite. Les niveaux provenant

des aquifères granulaires ainsi que rocheux ont été pris en compte dans l'interpolation puisqu'il a été assumé que les deux types d'aquifères sont en lien hydraulique.

Méthodologie

Différentes sources d'information ont été utilisées pour le développement de la carte piézométrique, notamment la base de données du SIH, la compilation des rapports hydrogéologiques du territoire, le réseau de suivi du MDDELCC et enfin les niveaux d'eau prélevés lors des campagnes d'échantillonnage et de forages. Les principales rivières ont aussi été converties en points à un intervalle de 500 m et l'altitude de la surface vis-à-vis le point était attribué à chacun. Aucune distinction n'a été faite quant aux dates de prise de mesure alors que les données s'échelonnent de 1978 à 2014. Les charges hydrauliques ont été préalablement soustraites des altitudes de surface du MNE et ensuite interpolées par cokrigage ordinaire avec un modèle exponentielle omnidirectionnel. Plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées, dont une nécessitant l'interpolation directe des niveaux pour ensuite extraire la surface statistique du MNE et ainsi obtenir la surface piézométrique. Cependant, les résidus à l'étape de validation croisée de cette méthode étaient beaucoup trop élevés contrairement à l'interpolation directe des niveaux préalablement soustraits de l'altitude du MNE.

Analyse du livrable

Les valeurs des niveaux piézométriques s'échelonnent de -15 m à proximité de l'estuaire maritime à 423 m aux sommets piézométriques sur les Hautes-Terres. Les niveaux les plus bas observés se trouvent dans les secteurs du Bic, de Trois-Pistoles, de l'Isle Verte et de Baie-des-Sables. La carte piézométrique montre que les écoulements souterrains suivent la topographie de surface. L'écoulement se fait donc de manière générale du sud du territoire vers l'estuaire, mis à part dans les vallées orientées Ouest-Est (Neigette, Sud-Ouest) où les écoulements suivent cette direction. Les isopièzes (courbes d'égal niveau d'eau) montrent les lignes de partage de l'eau souterraine. Ils définissent les limites des sous-bassins hydrogéologiques et permettent ainsi de délimiter les zones d'alimentation en eau souterraine du réseau hydrographique en contact avec l'aquifère rocheux. La piézométrie montre que les rivières drainent l'aquifère régional. Les gradients hydrauliques sont faibles dans les fonds de vallées et sur la plaine côtière, ce qui signifie que les écoulements sont quasi horizontaux. Au contraire, dans les crêtes appalachiennes, dans les zones de transition des Hautes-Terres vers la plaine côtière et sur les escarpements rocheux, les gradients hydrauliques sont élevés, ce qui favorise les résurgences d'eau souterraine dans les zones de transitions topographiques.

Suivi des niveaux piézométriques

Dans le cadre du projet, quatre stations de suivi des variations du niveau de l'eau souterraine ont été installées dans les différents contextes hydrogéologiques. Les résultats sont présentés sous forme graphique à l'Annexe 3. Seuls les hydrogrammes de Saint-Éloi, de Notre-Dame-des-

Neiges, de la vallée de la Neigette et de la vallée de la Matane sont présentés à titre d'exemples (respectivement les **Figure 5.6**, **Figure 5.7** et **Figure 5.8**). Elles montrent que les différents aquifères ne réagissent pas de la même manière pour un même évènement de précipitation. La **Figure 5.6** présente les hydrogrammes de deux puits contrastés de l'aquifère rocheux. Les niveaux d'eau (profondeur nappe) sont présentés par rapport au niveau de la surface du sol. La partie supérieure de la figure montre les courbes de la moyenne journalière des températures de l'air et des précipitations liquides totales journalières. Les lignes verticales rouges mettent en évidence les rehaussements de la nappe associés à une période de dégel, alors que les lignes verticales noires indiquent les rehaussements attribués aux épisodes de précipitation liquide. Ces rehaussements sont considérés comme la recharge de l'aquifère.

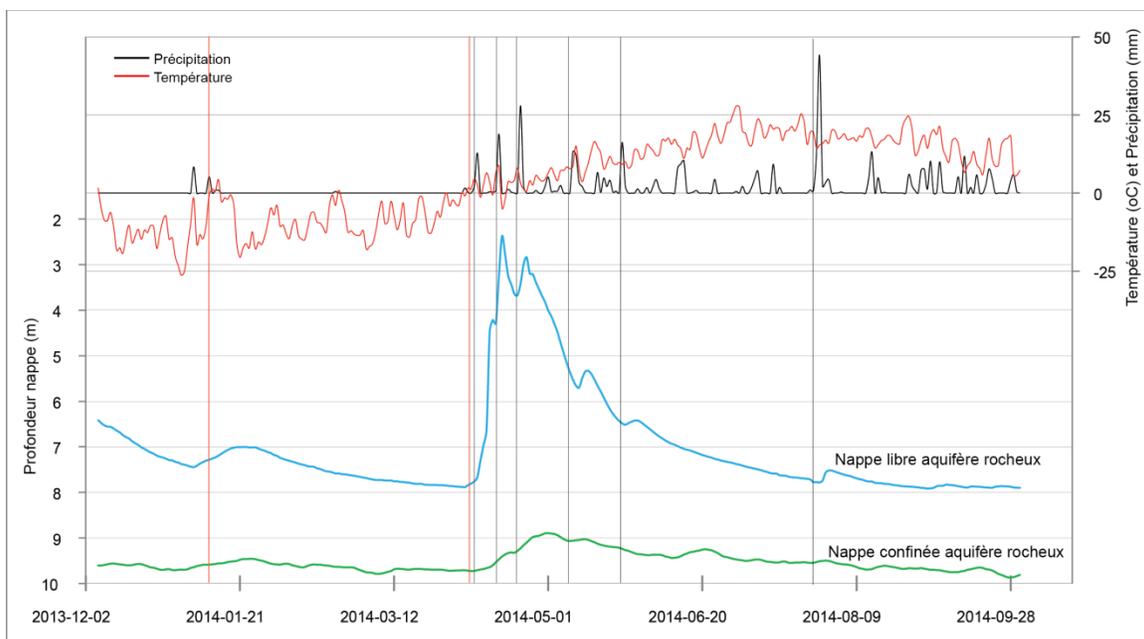


Figure 5.6. Hydrogrammes des puits de l'aquifère rocheux de Saint-Éloi (chronique verte) et de Notre-Dame-des-Neiges (chronique bleue) pour la période de Décembre 2013 à Octobre 2014.

Alors qu'ils sont issus de la même formation géologique (schiste) ayant des conductivités hydrauliques similaires ($1,84$ et $3,89 \times 10^{-6}$ m/s), les hydrogrammes de la **Figure 5.6** montrent des comportements très différents des aquifères rocheux selon leur degré de confinement. La nappe libre de l'aquifère rocheux de Notre-Dame-des-Neiges est très dynamique comparativement à la nappe confinée de l'aquifère rocheux de Saint-Éloi. Une variation printanière du niveau d'eau de plus de 5 m a été enregistrée dans le puits de Notre-Dame-des-Neiges alors qu'une variation de seulement 1 m a été enregistrée à Saint-Éloi. Les fluctuations du niveau à Notre-Dame-des-Neiges à presque chacune des précipitations indiquent que ce puits est très réactif à la recharge provenant de la surface. La réactivité de l'aquifère rocheux en condition de nappe libre est

caractérisée par une faible porosité primaire qui limite la capacité de l'aquifère à emmagasiner l'eau, ce qui provoque une hausse marquée du niveau d'eau. Comme l'aquifère a un faible emmagasinement, la récession du niveau d'eau est donc très rapide. À l'inverse, à Saint-Éloi, le confinement semble provoquer une plus faible amplitude des variations de niveau d'eau en raison de l'absence d'un lien hydraulique avec la surface. La recharge de l'aquifère se produit avec un délai car la recharge s'effectue en amont hydraulique (environ 2 km) là où l'aquifère rocheux est en condition de nappe libre et la conductivité hydraulique dans cette zone est favorable ($2,8 \times 10^{-6}$ m/s).

Dans les piézomètres de nappe libre de la vallée de la Neigette (**Figure 5.7**), chaque période de précipitation s'associe à une recharge directe par percolation verticale. Le rehaussement de la nappe s'amorce quelques heures seulement après le début des précipitations. Contrairement à l'aquifère rocheux de la **Figure 5.6**, les amplitudes des fluctuations d'une nappe libre dans le granulaire sont moins importantes car la grande porosité de la formation aquifère permet d'emmagasiner une plus grande quantité d'eau. Ce plus grand emmagasinement entraîne aussi des récessions moins marquées, puisque la formation se décharge plus lentement. Une amplitude plus faible ne signifie donc pas une faible recharge. L'hydrogramme du piézomètre installé dans une nappe confinée montre des fluctuations moins marquées en réponse aux précipitations, ce qui confirme l'absence de liens hydrauliques directs avec la surface. On observe un décalage entre les deux chroniques lors du premier épisode de recharge printanière de 2014. Tout comme pour les aquifères rocheux confinés, la recharge d'un aquifère granulaire confiné se fera par la contribution de l'écoulement provenant de l'amont hydraulique où cette même formation géologique sera en condition de nappe libre, expliquant ainsi un retard dans la recharge contrairement à la nappe libre.

La série temporelle de niveaux d'eau de la nappe confinée montre également que la nappe peut devenir en condition artésienne au fil du temps puisque la **Figure 5.7** présente un niveau statique supérieur à la surface du sol durant le mois de mai 2014. Contrairement à la nappe libre, le niveau de la nappe confinée descend très peu en absence d'évènement de recharge. La stabilité du niveau met l'accent sur le fait qu'une nappe libre aura tendance à se décharger vers les cours d'eau, alors qu'un aquifère confiné, peut être très isolé et indépendant du drainage de surface. Enfin, l'analyse de l'hydrogramme de la nappe confinée montre une oscillation du niveau d'eau plus marquée que celui de la nappe granulaire libre, étant donné la fluctuation de la pression atmosphérique.

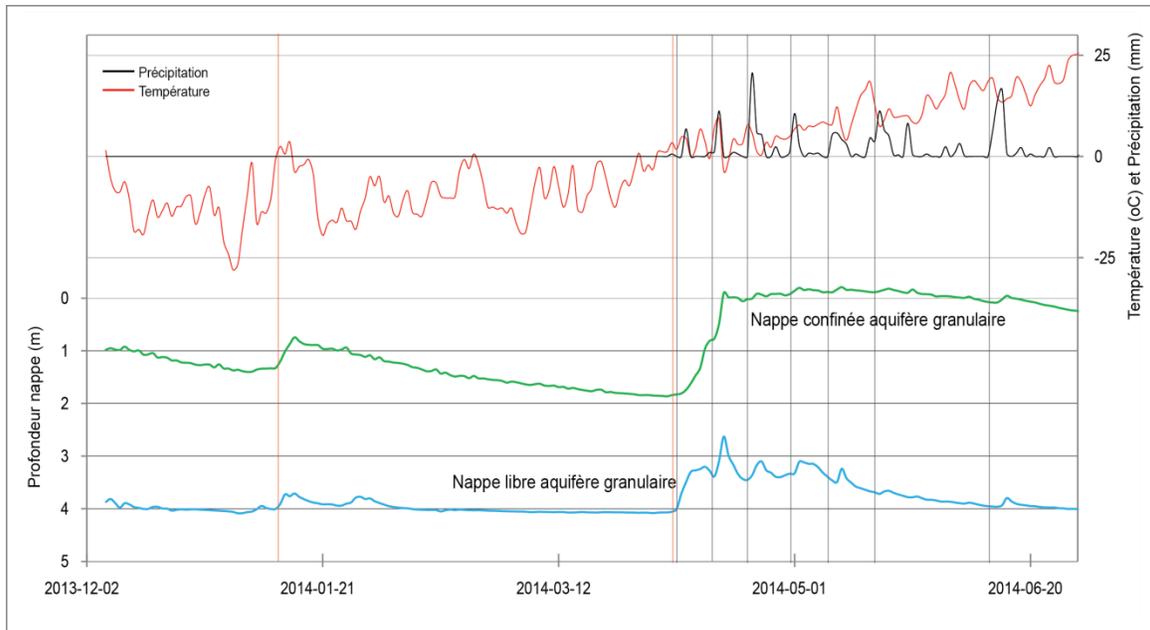


Figure 5.7. Hydrogrammes des piézomètres Neige 01 (chronique bleue) et Neige 02 (chronique verte) situés dans la vallée de la Neigette dans les secteurs des fermes Guimond et Huet.

La **Figure 5.8**, montre la connectivité entre l'aquifère alluvial de Matane et sa rivière. Les séries piézométriques utilisées proviennent des deux stations du réseau de suivi sur les eaux souterraines du MDDELCC situées à Matane (02167001) et à Saint-René-de-Matane (0216001). Lors d'une crue, peu importe sa magnitude, les niveaux piézométriques dans la plaine montent presque simultanément avec le niveau la rivière. Le matériel granulaire grossier et perméable ($\sim 8 \times 10^{-4}$ m/s) de l'aquifère alluvial favorise la connectivité dynamique entre celui-ci et la rivière. Les hydrogrammes des piézomètres montrent une réponse décalée à la station de Matane puisque l'aquifère granulaire est confiné par plus de 20 m de silt argileux (c.f. coupe Matane **Figure 4.14**) contrairement à la station de Saint-René-de-Matane où l'aquifère est en condition de nappe libre.

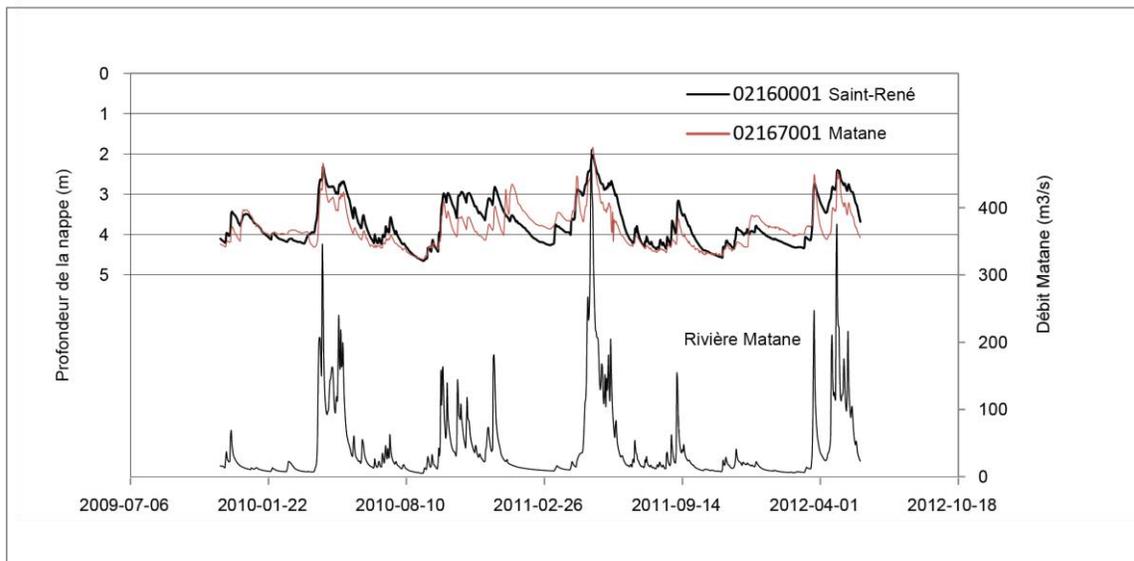


Figure 5.8. Hydrogrammes des puits 02167001 (nappe confinée) et 0216001 (nappe libre) du réseau de suivi du MDDELCC et débits de la rivière Matane à la station 021601 du CEHQ pour la période de Novembre 2009 à Juin 2012.

Un site expérimental a été mis en place à Saint-René-de-Matane (plus précisément au hameau Dancause) où un réseau de 17 piézomètres a été mis en place en 2011 pour faire le suivi des niveaux de nappe en lien avec les débits de la rivière Matane. L'étude de la connectivité entre l'aquifère alluvial et la rivière Matane a fait récemment l'objet de deux publications (Cloutier et al. 2014; Buffin-Bélanger et al. accepté) (Annexe 4). Des analyses par corrélations-croisées révèlent, lors d'événements de crue, que l'écoulement de la rivière exerce une pression sur les berges provoquant la propagation d'une «onde phréatique» à travers l'entièreté de la plaine. La **Figure 5.9** illustre la relation entre le décalage de la réponse piézométrique et la distance perpendiculaire de chacun des piézomètres pour 57 événements de crue. La figure révèle qu'il existe une forte relation entre le décalage et la distance perpendiculaire au chenal, que la vitesse de propagation de l'onde est de 9,9 m/h, et que cette vitesse demeure relativement constante à travers la plaine.

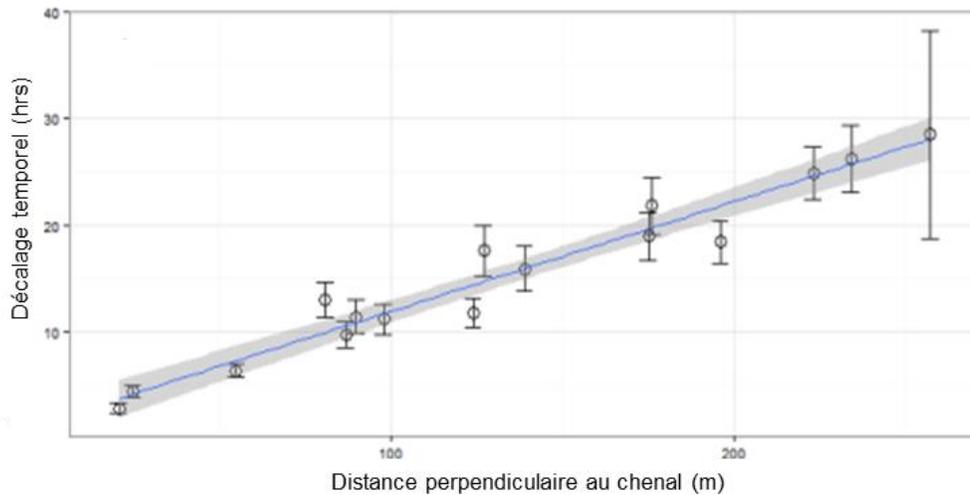


Figure 5.9 : Décalage moyen pour les 57 événements de crue au maximum de corrélation entre le niveau de la rivière et le niveau piézométrique en relation avec la distance perpendiculaire au chenal. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95% (figure modifiée de Buffin-Bélanger et al. accepté).

La recharge des aquifères alluviaux ne se fait pas seulement par des apports verticaux provenant des précipitations et de la fonte des neiges, mais s'effectue également par la connectivité hydraulique entre une rivière et son aquifère alluvial. Les fluctuations des niveaux piézométriques en fonction de la fluctuation des niveaux de la rivière Matane (**Figure 5.8**) sont interprétées comme étant des événements de recharge. La propagation de cette onde provoque de l'emménagement puisque la charge hydraulique augmente lors de la montée de la crue et demeure élevée suite à son passage (**Figure 5.10**). L'aquifère se déchargera plus rapidement à proximité de la rivière lors de la récession de la crue, mais plus éloigné dans la plaine, les charges demeurent élevée bien après le passage de la crue. La grande porosité de la formation aquifère permet d'emménager une plus grande quantité d'eau que dans un aquifère rocheux. Ce plus grand emménagement entraîne donc des récessions moins marquées.

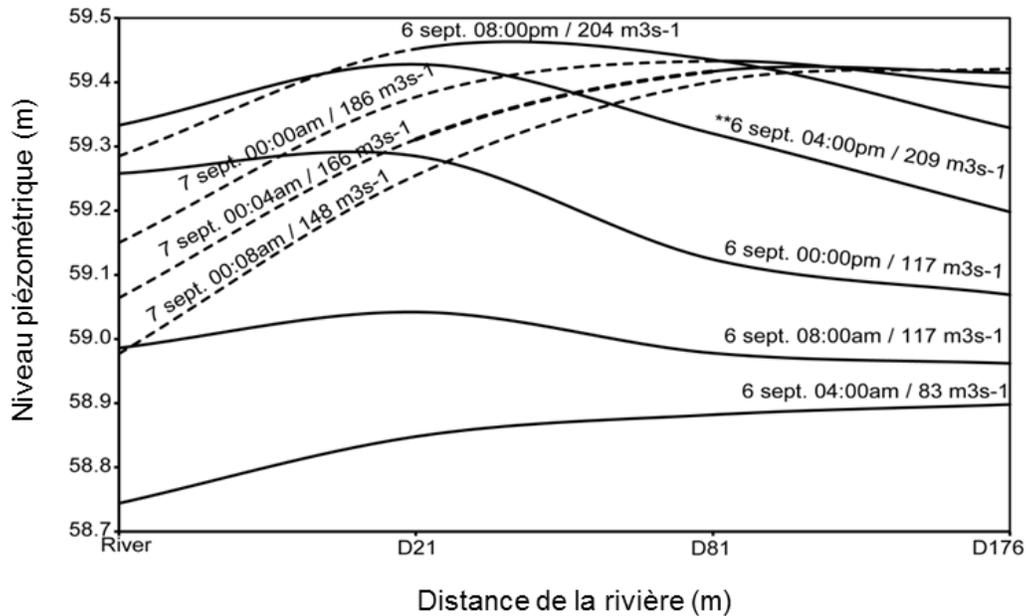


Figure 5.10 : Propagation d'une «onde phréatique» dans l'aquifère alluvial de Matane lors d'une crue survenue du 05 au 12 septembre 2011. Les lignes pleines représentent la montée du niveau de la rivière et de la piézométrie et les lignes pointillées la récession des niveaux. ** représente le débit maximal de la crue (modifiée de Cloutier et al. 2014).

5.3 Recharge et résurgences

Descriptif du livrable

La recharge est l'une des composantes des plus importantes d'une étude hydrogéologique puisqu'elle sert à évaluer les débits pouvant être soutirés d'un aquifère de façon durable. Ces derniers dépendent grandement du renouvellement annuel de l'eau souterraine par la recharge. Cependant, l'estimation de la recharge des aquifères est un paramètre hydrogéologique complexe à évaluer étant donné que les nombreux facteurs qui influencent la recharge sont eux aussi complexes à estimer.

Bien qu'il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la recharge, comme la séparation d'hydrogramme ou l'analyse des fluctuations des niveaux piézométriques dans un puits, ces méthodes ne permettent toutefois pas d'établir sa distribution spatiale lors de la réalisation d'une étude à l'échelle régionale.

Le livrable des zones de recharge préférentielles représentent la recharge potentielle spatialisée de l'aquifère rocheux.

Méthodologie

La recharge potentielle de l'aquifère rocheux a été calculée en réalisant un bilan hydrique sur des mailles de 250 m x 250 m (61 616 cellules). La **Figure 5.11** représente les étapes méthodologiques de l'approche utilisée. Les données climatiques utilisées pour le calcul sont les apports verticaux qui proviennent du CEHQ (Poirier et al. 2012). Les apports verticaux journaliers correspondent aux quantités d'eau provenant de la fonte des neiges et de la pluie pour l'historique 1900-2010. Ces données ont été fournies à partir d'une grille de points de 0,1° lat. x 0,1° long. (87 pour la zone PACES-NEBSL), puis reportées sur des mailles de 250m x 250m. Les températures minimales et maximales ont aussi été fournies par le CEHQ. La moyenne des moyennes annuelles de 1980 à 2010 a été utilisée pour le calcul de la recharge. La première étape du bilan hydrique consiste à calculer le ruissellement de surface selon la méthode des numéros de courbes (*Runoff Curve Numbers*), adaptée pour le sud du Québec (Monfet, 1979). Comme il n'était pas possible d'estimer la variable *condition hydrologique* dans cette approche, une moyenne a été appliquée entre les deux conditions pour obtenir un seul numéro de courbe par classe de sol. Les détails de l'occupation du territoire et des classes de sols se retrouvent dans Monfet (1979), et ceux utilisés dans le cadre du PACES-NEBSL sont présentés dans le **Tableau 5.5**. Les numéros ont été calculés pour chacun des polygones de la couche du Système d'information écoforestière (SIEF) et les valeurs ont ensuite été extraites sur des mailles de 250 m x 250 m.

Tableau 5.5. Numéros de courbe pour différentes combinaisons de types et d'occupation du sol (modifié de Monfet, 1979).

Occupation du territoire	Pente (%)	Classe de Sol / Numéro de courbe			
		A	B	C	D
Culture intensive	< 3	61	72	79	81
	3 - 8	64	75	83	87
	>8	69	79	86	90
Culture extensive	< 3	32	50	72	79
	3 - 8	44	65	76	82
	>8	58	74	82	87
Forêt	< 3	23	57	67	76
	3 - 8	33	59	72	79
	>8	44	65	77	82
Urbain		66	78	85	88

La deuxième étape correspond au calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) journalière, selon la méthode d'Oudain et al. (2005). Cette dernière nécessite l'emploi de l'équation 2 ainsi que le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) journalière à partir de l'ETP selon l'équation 3 tirée de Dingman (2002, p.312).

$$ETP = 0,029718(T_M - T_m) \exp 0,019 \left[\frac{9}{5} (T_M - T_m) + 64 \right] \quad (2)$$

$$ETR = W / [1 + (W/ETP)^2]^{1/2} \quad (3)$$

La troisième étape consiste dans un premier temps à soustraire le ruissellement des apports verticaux et, dans un deuxième temps, à soustraire l'ETR du volume d'eau non ruisselé, ce qui donne la recharge potentielle. Enfin, la recharge « réelle » de l'aquifère rocheux est estimée en fonction de l'indice de confinement, soit 100% de la recharge potentielle pour les zones de nappe libre, 50 % dans les zones semi-captives (entre 1 et 3 m d'argile ou entre 3 et 5 m de till) et 0% dans les zones de nappe captive. L'aquifère rocheux est considéré captif lorsque une couche de plus de 3 m d'argile ou plus de 5 m de till est présente dans la stratigraphie des dépôts meubles.

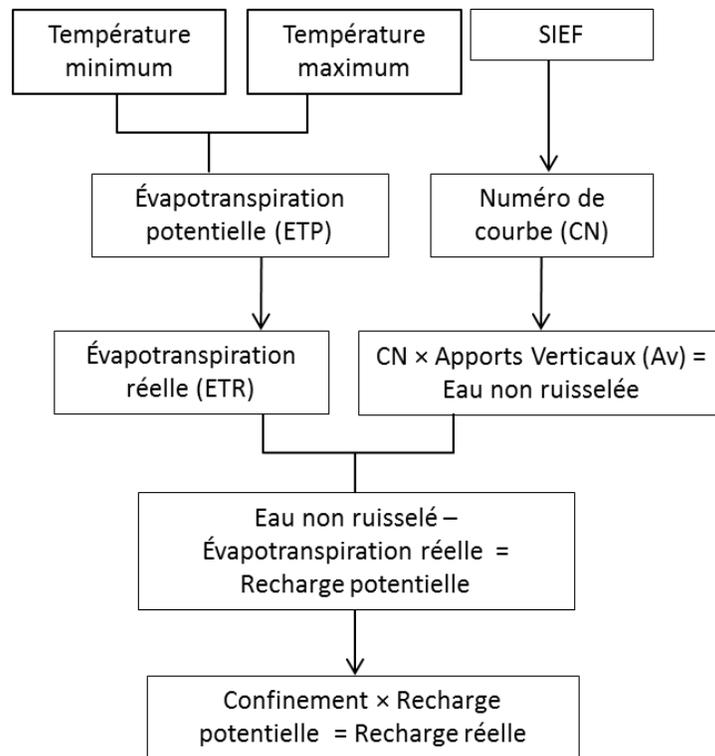


Figure 5.11. Organigramme méthodologique du calcul de la recharge par bilan hydrique spatialisé utilisée dans le projet.

Analyse du livrable

La carte 28 présente la recharge de l'aquifère rocheux par la méthode du bilan hydrique spatialisée. Les zones de recharge supérieure à 200 mm/an sont considérées comme étant les zones de recharge préférentielle de cet aquifère régional. Ces zones préférentielles sont localisées principalement dans les Hautes-Terres où l'aquifère rocheux est libre. C'est dans cette zone du territoire d'étude que la couverture de dépôts meubles est la plus faible (principalement le

manteau résiduel sur le roc). De plus, il se produit un effet orographique pour les précipitations neigeuses et pluvieuses. Les zones de till épais (carte 13) sur les Hautes-Terres montrent une recharge plus faible (~ 100 mm) en raison de la faible perméabilité de cette unité géologique. Du côté de la Plaine Côtière, mis à part les crêtes appalachiennes et dans les fonds de vallées alluviales, des valeurs très faibles (voire nulles) sont estimées en raison de la présence de fortes épaisseurs de matériaux peu perméables (argile ou till) recouvrant le roc.

La **Figure 5.12** présente la recharge spatialisée sans prendre en compte le niveau de confinement, afin de renseigner sur la recharge des aquifères superficiels. Seules les valeurs de recharge pour les contextes hydrostratigraphiques commençant par une unité granulaire (section 4.7), donc excluant les zones de roc libre (contexte 1/4), sont représentées sur cette figure. En ne considérant que la recharge des aquifères superficiels, les valeurs estimées de recharge reflètent l'influence des différentes composantes du bilan hydrique spatialisé, soit les paramètres de détermination des numéros de courbe (**Tableau 5.5**) et l'effet de l'évapotranspiration. Par exemple, dans le fond de la vallée de la rivière Mitis (secteur Sainte-Angèle-de-Mérici), la recharge de l'aquifère de surface, constitué de dépôts alluviaux, est estimée de 80 à 130 mm par année. Ces faibles valeurs sont principalement attribuables au fait que la zone est recouverte de pâturages, auxquels est associée une évapotranspiration estimée à 300 mm par année.

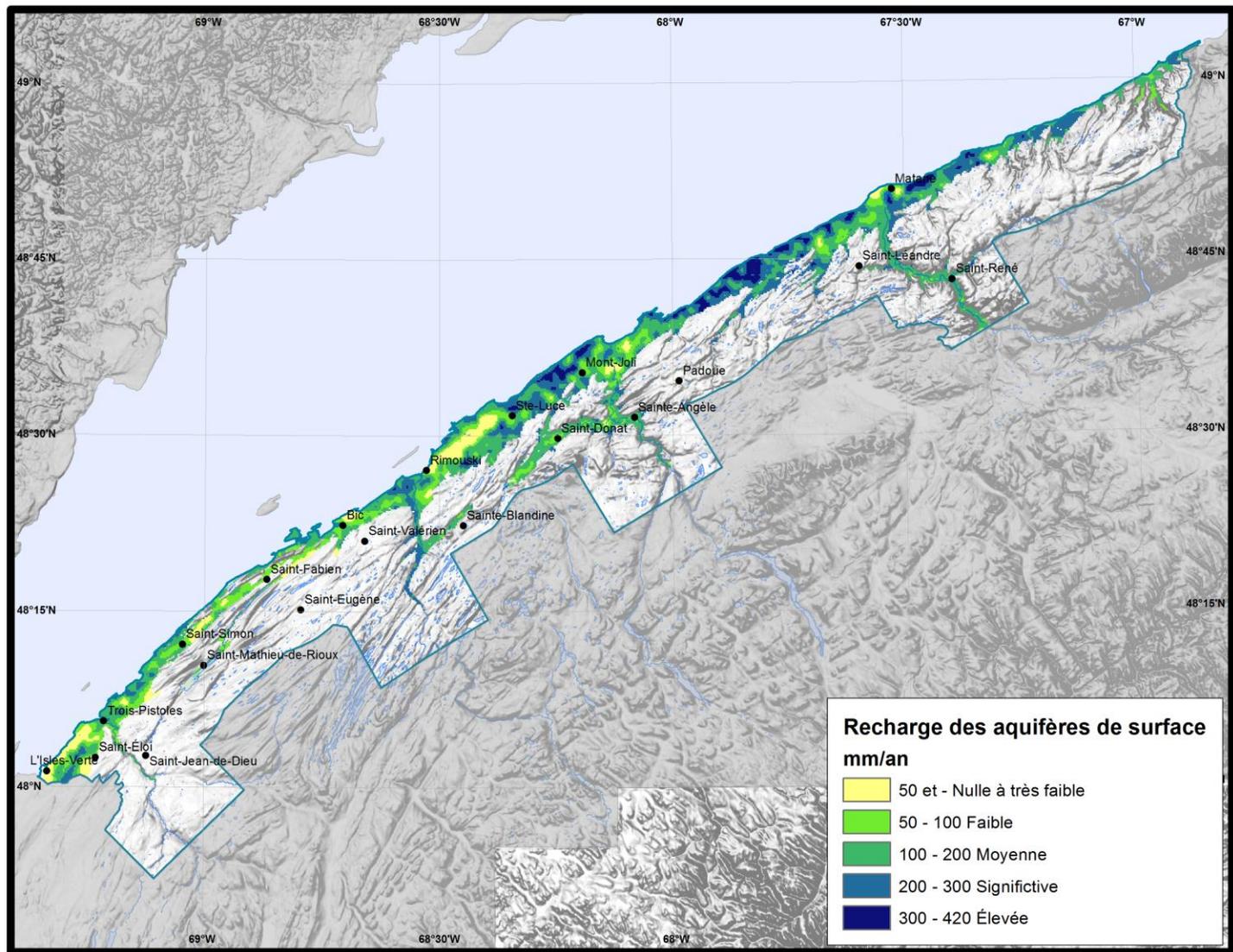


Figure 5.12. Recharge spatialisée des formations granulaires de surface.

Sur la carte 28 les zones de résurgence des eaux souterraines correspondent principalement aux bris de pente des gradients hydrauliques de la piézométrie. Lors des campagnes d'échantillonnage d'eau des étés 2013-2014, des résurgences et du suintement à la surface des dépôts meubles ont été constatés à plusieurs endroits au pied des crêtes rocheuses dans les secteurs de Saint-Simon, de Saint-Mathieu-de-Rioux, de Sainte-Angèle-de-Mérici, à Les Méchins et dans les vallées des rivières Neigette et Matane. Ces suintements alimentent des puits de surface à partir desquels une grande portion de la population du territoire s'approvisionne. Les tronçons de rivières coulant directement sur le roc sont aussi considérés comme des zones de résurgences de l'aquifère rocheux. La carte de la piézométrie régionale montre que les rivières drainent les aquifères. Cependant, des analyses avec des traceurs environnementaux de type ^{222}Rn , ^{13}C ou ^{18}O , couplées à la prise de la température directement dans les cours d'eau permettraient de spatialiser le lien hydraulique entre les deux domaines lorsque le cours d'eau coule sur les dépôts meubles.

5.4 Vulnérabilité des aquifères

Description du livrable

La réglementation québécoise [article 13 du Règlement sur la qualité de l'eau potable (Q-2, r.40), l'article 53 du Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (Q-2, r. 35.2) de la Loi sur la qualité de l'environnement] recommande l'utilisation de la méthode DRASTIC pour définir la vulnérabilité d'un aquifère face à une potentielle contamination provenant de la surface du sol. C'est également la méthode retenue dans le cadre des projets PACES. Cette méthode permet de calculer une vulnérabilité intrinsèque, donc une sensibilité des systèmes hydrogéologiques, sans prendre en compte les aléas naturels et anthropiques (Vrba and Zaporozec, 1994). Lorsque les aléas naturels et anthropiques ainsi que la nature et le comportement des contaminants sont pris en compte, on parle alors de vulnérabilité spécifique. L'évaluation de ce type de vulnérabilité est plus complexe puisqu'elle demande l'intégration d'une plus grande quantité de paramètres.

La représentation de l'indice DRASTIC de manière cartographique se veut un outil d'aide à la décision, facile d'utilisation et permettant de rapidement cibler les zones sensibles à la contamination. Il est cependant important de mentionner que les cartes produites dans le cadre des projets PACES sont à l'échelle régionale et que des études hydrogéologiques complémentaires doivent être effectuées à l'échelle locale pour l'obtention d'un indice DRASTIC dans des zones plus ciblées. De plus, il est aussi important de tenir compte des activités de surface, anthropiques et naturelles, lors de la prise de décisions concernant l'aménagement du territoire et la gestion des eaux souterraines.

La méthode DRASTIC fut développée par l'*Environmental Protection Agency* (EPA) avec la collaboration de la *National Water Well Association* dans les années 1980, aux États-Unis. Aller et al. (1987) décrit en détails la méthodologie à suivre pour la production de l'indice DRASTIC. Le protocole Rivard et al. (2012) reprend les grandes lignes de ce document. C'est cette approche

qui a été utilisée pour la création d'une carte de l'indice DRASTIC pour l'aquifère régional du territoire.

Méthodologie

L'approche de classification multi critères pour le calcul du DRASTIC nécessite la connaissance de sept paramètres hydrogéologiques : la profondeur de la nappe dans le cas de nappe libre ou dans le cas de nappe captive, la profondeur du toit de l'aquifère (D), la recharge annuelle (R), la nature du milieu aquifère (A), le type de sol (S), la pente du terrain (T), l'impact de la zone vadose (zone non-saturée) (I) et la conductivité hydraulique (C) (**Figure 5.13**). À chacun de ces paramètres est associé un poids prédéfini, variant de 1 à 5, ainsi qu'une cote numérique, variant de 1 à 10. La plus grande cote correspond aux conditions de l'aquifère ayant la plus grande vulnérabilité à la contamination. Les valeurs de l'indice vont de 23 à 226.

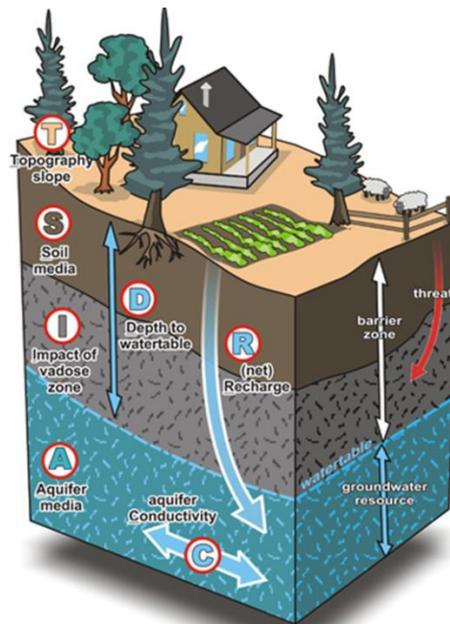


Figure 5.13. Représentation des sept paramètres du DRASTIC (tirée de Rivard et al. 2012)

Les données nécessaires aux calculs des sept paramètres proviennent toutes d'informations amassées pour la création d'autres livrables. La profondeur de l'aquifère (D) fut calculée à partir des niveaux piézométriques mesurés durant les étés 2013 et 2014, des données provenant des rapports hydrogéologiques fournis par les municipalités et le MDDELCC ainsi qu'à partir de la banque de données du SIH (livrable 20). La recharge (R) correspond aux données du livrable 28 concernant la recharge potentielle de l'aquifère rocheux. La nature de l'aquifère et des types de sols furent déterminés à partir de la carte géologique du socle rocheux du livrable 12 et de la carte pédologique du livrable 11. Les séquences des contextes hydrostratigraphiques du livrable 18 ont

servi à définir l'impact de la zone vadose. Finalement, les données de conductivité pour le roc correspondent aux mesures faites sur le terrain en 2013 ainsi qu'à l'information obtenue via les rapports hydrogéologiques (livrable 21).

Une carte de distribution spatiale (carte 22) a ensuite été générée pour chacun des sept paramètres dans un format matriciel (raster) avec un maillage de 250 m x 250 m. Ce maillage est universel pour l'ensemble des projets PACES, car il permet une représentation régionale tout en étant suffisamment précis pour qu'il n'y ait pas trop de perte d'information. Chaque cellule de 250 m x 250 m a pour valeur une des cotes numériques variant entre 1 et 10 tel que mentionné précédemment. Les sept couches ont ensuite été additionnées (**Figure 5.14**) selon l'équation 4, laquelle permet le calcul de l'indice DRASTIC par la somme des produits des poids pondérés (X_p) multiplié par la cote correspondante (X_c) :

$$\begin{aligned} \text{Indice DRASTIC} &= D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c \\ &= 5 * D_c + 4 * R_c + 3 * A_c + 2 * S_c + 1 * T_c + 5 * I_c + 3 * C_c \end{aligned} \quad (4)$$

Équation tirée du protocole Rivard et al. (2012)

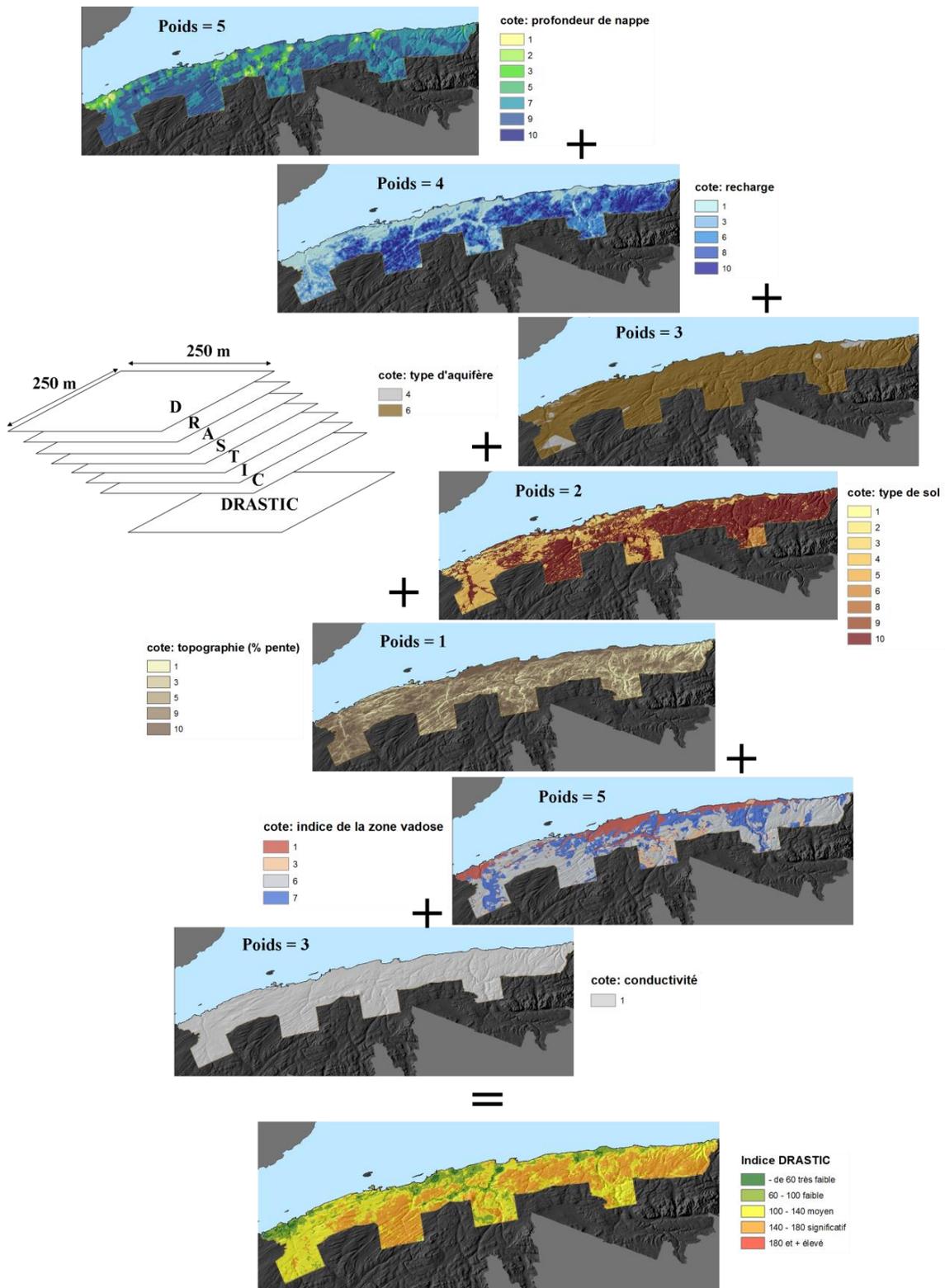


Figure 5.14. Méthodologie de calcul de la méthode DRASTIC : les sept paramètres sous forme matricielle ainsi que leur addition permettant d'arriver à la création de l'indice DRASTIC.

Analyse du livrable

Plusieurs indices DRASTIC ont été calculés dans le cadre du PACES-NEBSL. Un premier indice, calculé pour l'aquifère rocheux, concerne l'ensemble du territoire. La carte 22 représente le résultat du calcul de l'indice de sensibilité à la contamination de surface de l'aquifère régional qui varie de 38 à 171. La légende est adaptée de la nouvelle classification faite par le MDDELCC dans le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* qui est entrée en vigueur en 2014. Ainsi le vert foncé, associé à un indice inférieur à 60, représente une sensibilité à la contamination de surface très faible, le vert pâle représente une faible vulnérabilité (60-100), le jaune indique une vulnérabilité moyenne (100-140) et la couleur orange est associée à une vulnérabilité significative (140-180). La classe correspondant à une vulnérabilité élevée, selon la classification du MDDELCC (180 et plus), n'est pas présente sur le territoire du nord-est du Bas-Saint-Laurent, la valeur la plus élevée étant 171. Seulement 2% du territoire affiche un indice DRASTIC très faible. La majeure partie du territoire a un indice de vulnérabilité variant entre moyen (45%) et significatif (41%).

La profondeur du toit de l'aquifère, la recharge et l'indice de la zone vadose sont les paramètres qui influencent le plus le résultat du DRASTIC. Ainsi, on retrouve un indice DRASTIC faible (moins de 100) dans toutes les zones où les dépôts argileux sont présents. Ces zones où l'indice est très faible ou faible se situent principalement dans les vallées des rivières Neigette, Mitis et sur la majeure partie de la plaine côtière. On retrouve également un indice faible dans la vallée de Matane en raison, d'une part, de la présence de till jouant le rôle d'aquitard du socle rocheux et, d'autre part, des sédiments silto-argileux dans le secteur aval de la vallée. Les Hautes-Terres présentent un indice DRASTIC variant entre moyen et significatif. La faible épaisseur de dépôt, conjuguée aux taux de recharge annuelle élevée et au niveau de nappe très près de la surface, font en sorte que les Hautes-Terres constituent le contexte hydrogéologique le plus sensible de tout le territoire face à des contaminations potentielles depuis la surface.

Un second indice DRASTIC a été calculé pour l'aquifère alluvial (aquifère de surface) de la vallée de la rivière Matane. Cet aquifère est l'un des plus gros aquifères granulaire répertoriés sur le territoire du PACES-NEBSL. La **Figure 5.15** présente deux cartes de l'indice de vulnérabilité de cet aquifère granulaire. Le DRASTIC de la **Figure 5.15A** a été calculé en fonction du premier aquifère rencontré dans la vallée : l'aquifère de surface. Les résultats du calcul à la **Figure 5.15A** montrent que presque toute la vallée affiche une vulnérabilité significative à la contamination de surface avec des cotes qui se situent principalement entre 140 et 180. Aussi, quelques secteurs autour de Saint-René-de-Matane et du hameau résidentiel Dancause présentent une vulnérabilité élevée. Le matériel granulaire grossier qui constitue l'aquifère, la faible profondeur de la nappe et l'absence d'argile jouant le rôle d'aquitard expliquent les niveaux de vulnérabilité élevés que l'on retrouve sur pratiquement l'ensemble de la vallée. Un second indice DRASTIC a été calculé pour le secteur aval de la vallée où l'on retrouve des aquifères confinés sous les sédiments silto-argileux (**Figure 5.15B**). Ce secteur aval de la vallée s'étend du centre de ski du Mont-Castor à la

ville de Matane. Les résultats pour le secteur aval montrent un indice de vulnérabilité moyenne en raison du poids des critères *profondeur de l'aquifère* et *impact de la zone vadose* dans le calcul DRASTIC.

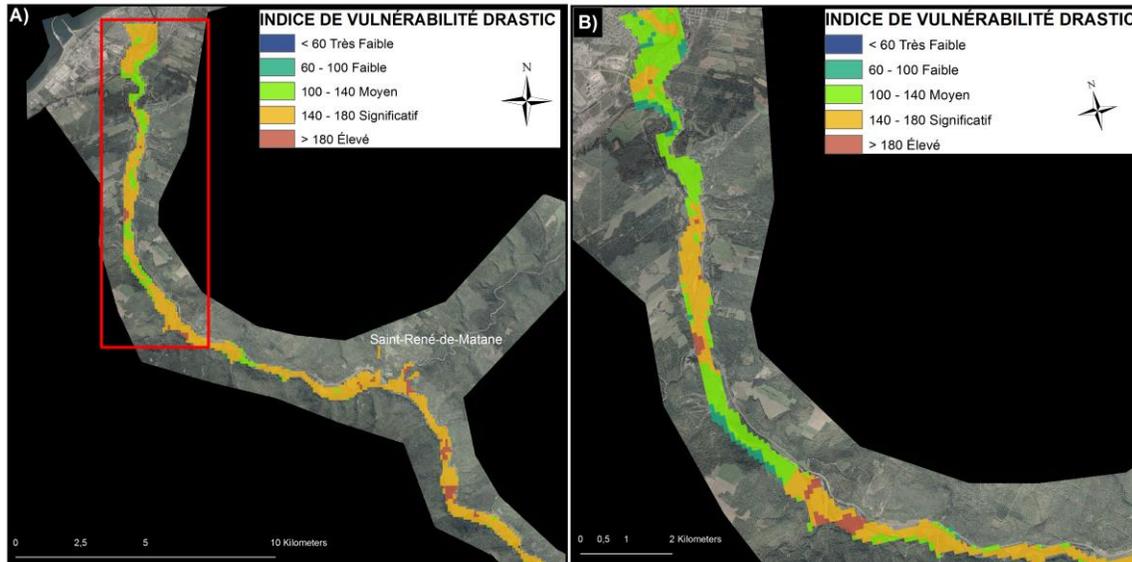


Figure 5.15. Indice de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère granulaire de la vallée de Matane. A) Indice calculé pour le premier aquifère rencontré; B) Indice DRASTIC calculé pour les aquifères granulaires confinés dans la portion aval de la vallée. La figure B correspond à l'encadré rouge de la figure A.

Enfin, afin de livrer un portrait plus complet de la vulnérabilité des aquifères granulaires du territoire, et ce même s'ils sont peu nombreux et de faible envergure, des indices ont été calculés localement pour 10 piézomètres installés dans le cadre du PACES-NEBSL. La localisation des piézomètres est à la **Figure 3.6** (section 3.2). Les valeurs ayant servi au calcul ainsi que les résultats sont présentés dans le **Tableau 5.6**. Sur les 10 piézomètres, cinq présentent des indices de vulnérabilité faible (60 à 100), trois des indices moyens (100 à 140) et deux autres des indices de vulnérabilité significatifs (140 à 180). Les cinq piézomètres situés en zone de faible vulnérabilité, Fab03, Mitis06, Mitis08, Simon01 et Neige05, sont tous en milieu confiné, c'est-à-dire qu'ils ont une recharge nulle tandis que la hauteur de la nappe varie entre 9 et 24 mètres de profondeur. Ces trois paramètres expliquent en grande partie la faible valeur d'indice DRASTIC qui leur est attribué. À l'inverse les deux piézomètres qui sont dans des zones où la vulnérabilité est la plus élevée, soit Neige01 et Fab04, sont tous situés dans des nappes libres de faible profondeur (1,2 à 4 m).

Tableau 5.6. Indice DRASTIC des piézomètres mis en place par le PACES-NEBSL dans les formations granulaires.

Poids	5		4		3		2		1		5		3		INDICE DRASTIC
Paramètres	D		R		A		S		T		I		C		
Piézomètres	valeur	Cote	valeur	Cote											
Mitis 08	16,15	3	0	1	G_A	5	Loam	5	0	10	Confiné	1	$1,33 \times 10^{-7}$	1	62
Fab03	9,14	5	0	1	G_A	5	A	1	0	10	Confiné	1	$5,22 \times 10^{-7}$	1	64
Simon01	12,79	5	0	1	G_A	5	A	1	0	10	Confiné	1	$2,94 \times 10^{-6}$	1	64
Neige05	23,77	2	0	1	S_G_Silt	5	Ø	10	0	10	Confiné	1	$4,03 \times 10^{-7}$	1	67
Mitis 06	24,37	2	0	1	S_G_Silt	5	Loam	5	5,6	9	Confiné	3	$2,46 \times 10^{-4}$	4	75
Math02	3,09	9	61,9	3	S_Silt	4	Org	2	0	10	Silt_A	2	$1,57 \times 10^{-4}$	4	105
Math01	1,26	10	0	1	S_G_Silt	5	Ø	10	0	10	Silt_S	3	$9,66 \times 10^{-7}$	1	117
Neige02	3,35	9	0	3	S_G	8	Ø	10	0	10	Confiné	1	$9,32 \times 10^{-5}$	1	119
Neige01	1,96	9	23,6	1	S_G	8	Ø	10	18,8	1	S_G	8	$1,08 \times 10^{-4}$	2	140
Fab04	4,09	9	21,6	1	S_G	8	Ø	10	4,0	9	S_G	8	$1,08 \times 10^{-4}$	2	148

Ø : mince ou absent ; S : sable; G : gravier; A : argile; Org : organique;

5.5 Géochimie de l'eau souterraine

Lors de son parcours depuis les zones de recharge aux zones de décharge, l'eau souterraine est impliquée dans de nombreux processus hydrogéochimiques qui contribuent à modifier sa composition chimique. Ces modifications dépendent notamment des réactions entre l'eau et le milieu dans lequel elle circule, du temps de résidence de l'eau dans le sol et dans le milieu souterrain, de la contamination diffuse ou directe, ainsi que des mélanges entre des eaux de différentes origines. Cette section permet de décrire l'eau souterraine de la région sous l'angle de la géochimie, premièrement en déterminant et localisant les différents faciès géochimiques de l'eau souterraine et groupes d'eau distinctifs, deuxièmement en identifiant les processus qui influencent les caractéristiques géochimiques de l'eau et troisièmement en établissant des liens entre les groupes et types d'eau et les différents contextes hydrogéochimiques présents sur le territoire. Pour cela, nous avons utilisé une approche basée sur les statistiques multivariées avec la détermination, à l'aveugle de clusters ou groupes d'échantillons en se basant sur la matrice de paramètres géochimiques analysés. Considérant qu'une bonne partie de la population s'approvisionnent à partir d'aquifères granulaires (34% des échantillons prélevés), il a été décidé de présenter le portrait géochimique non seulement des eaux souterraines provenant de l'aquifère rocheux, mais aussi des aquifères granulaires du nord-est du Bas-Saint-Laurent.

Types d'eau

Les faciès géochimiques ont été définis à l'aide des concentrations (mEq/l) des principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) et anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) de chacun des échantillons d'eau. Les ions qui représentent plus de 50% de la solution d'un échantillon sont ceux qui déterminent le type de faciès. En tout, sept faciès ont été identifiés. Ils sont représentés sur la **Figure 5.16** à l'aide d'un diagramme de Piper. Les quatre principaux faciès sont les types bicarbonaté-calcique (Ca-HCO_3), bicarbonaté-sodique (Na-HCO_3), puis les eaux de type chloruré-sodique (Na-Cl) et carbonaté sodique (Ca-Cl).

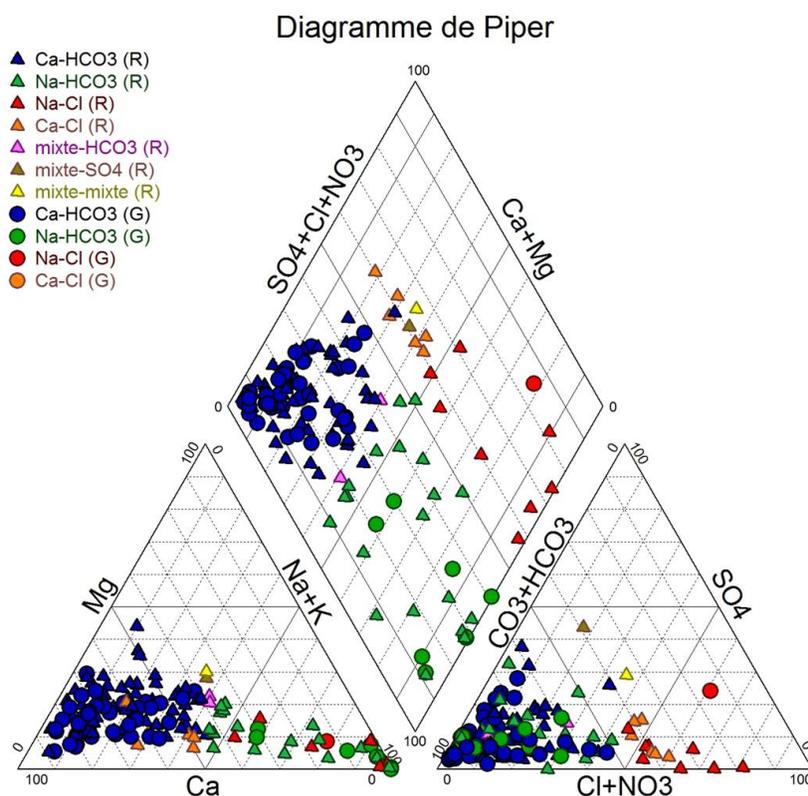


Figure 5.16. Diagramme de piper pour les 144 échantillons (roc et granulaire) analysés dans le cadre du programme PACES-NEBSL.

Les eaux de type Ca-HCO₃ sont associées à des eaux de recharge pauvre en éléments dissous et peu minéralisées. Sur le territoire elles représentent la majorité de l'eau consommée dans la région, soit 59% des échantillons prélevés dans des puits au roc et 66% des échantillons totaux (roc et granulaire combinés). Le second type d'eau le plus couramment rencontré est le type Na-HCO₃, que l'on retrouve dans 21% des puits échantillonnés dans l'aquifère rocheux et 19% du total des puits. Ce faciès, fait référence à des eaux plus évoluées ayant subi des échanges cationiques entre le Ca²⁺ contenu dans l'eau de recharge et le Na⁺ présent dans le substrat rocheux. Les eaux de type Na-HCO₃ ont donc un temps de résidence plus long dans l'aquifère que le type Ca-HCO₃. Le troisième faciès, les eaux de type Na-Cl, demeure assez marginale dans les puits des résidents de la région. Seulement 9% des puits échantillonnés dans le roc et 8% du total des puits échantillonnés ont ce profil. Les eaux de type Na-Cl représentent des eaux plus évoluées et minéralisées et qui sont fréquemment associées à des zones de nappe captive. Dans d'autres régions du Québec, comme dans les Basses-Terres-du-Saint-Laurent par exemple, ce type d'eau est associé à de l'eau ancienne provenant de l'invasion par la mer de Champlain lors de la dernière déglaciation et demeurée captive sous d'épaisses couches d'argiles (Cloutier et al, 2006, 2008; Carrier et al, 2013). Dans le Bas-Saint-Laurent, ce lien entre le confinement et les types d'eau n'a pas pu être établi. Finalement, environ 5% des puits échantillonnées ont un type d'eau Ca-Cl, qui fait référence à des eaux d'évolution « intermédiaires » dont les anions HCO₃⁻

ont évolués vers le Cl. C'est un type d'eau légèrement minéralisée dont le temps de résidence dans l'aquifère est plus grand que celui des eaux de type Ca-HCO₃.

La **Figure 5.17** montre la répartition des différents types d'eau sur le territoire. 70% des échantillons de type Na-HCO₃ se situent sous la limite marine atteinte lors de la dernière déglaciation, suggérant un lien entre les dépôts argileux laissés par la mer de Goldthwait et les eaux plus minéralisées que l'on retrouve dans cette portion du territoire. Il se produirait des échanges cationiques entre l'eau souterraine chargée en Ca²⁺ et les dépôts riches en Na⁺. En ce qui concerne la distribution des faciès géochimiques sur le territoire, à l'échelle locale, il n'apparaît pas de patron spatial particulier, même qu'en plusieurs endroits, on fait face à une grande hétérogénéité; par exemple dans le secteur de Pointe-aux-Anglais on retrouve quatre types d'eau différents à proximité l'un de l'autre provenant de puits de profondeurs similaires et du même contexte géologique. Ces puits ont été échantillonnés à plusieurs reprises pour éliminer l'hypothèse d'un artéfact analytique. À l'échelle régionale, par contre, nous pouvons constater que :

- 1- Le type d'eau le plus abondant (Ca-HCO₃) se retrouve sur la totalité du territoire, autant dans les zones de roc que les zones de milieux granulaires, qu'ils soient confinés, semi-confinés ou libres. Ce type d'eau est majoritaire dans les zones de recharge du territoire;
- 2- Le type d'eau chloruré-sodique est uniquement présent sur la frange côtière dans l'ouest du territoire et principalement en zones de nappe captive et semi-captive.

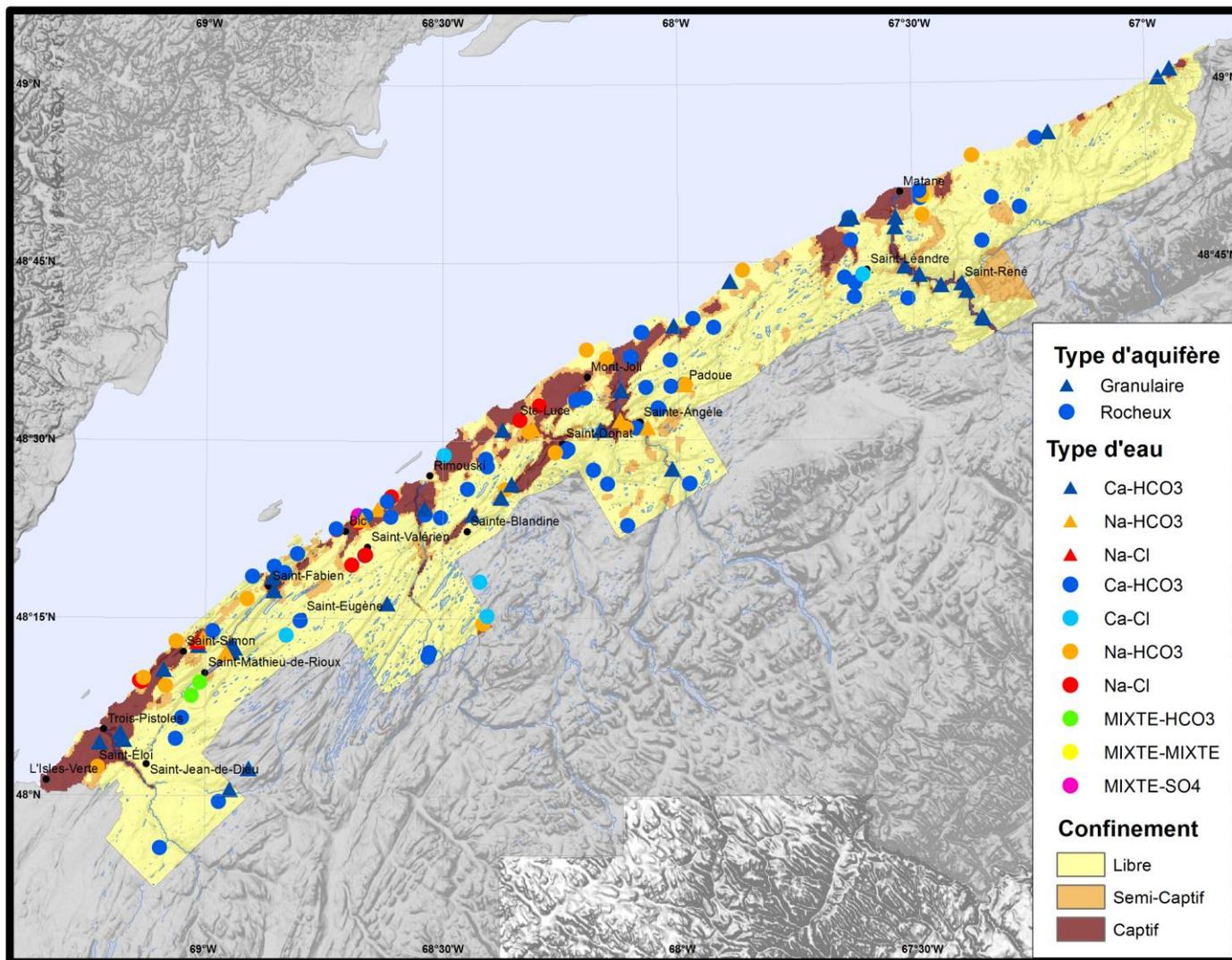


Figure 5.17. Spatialisation des sept types d'eau sur le territoire en lien avec le confinement du roc.

Processus hydrogéochimiques et groupes d'eau

Seule, la définition des faciès géochimiques ne nous a pas permis pas d'identifier clairement les processus hydrogéochimiques qui contrôlent les caractéristiques géochimiques de l'eau souterraine. Afin de mieux comprendre les patrons spatiaux des groupes d'eau et la relation entre ces groupes et les paramètres hydrogéologiques intrinsèques aux systèmes, nous avons développé une approche statistique multivariée dont les résultats ont été spatialisés.

Des groupes d'eau ont été définis à l'aide d'analyses de groupements (HCA) et d'analyses en composantes principales (PCA). Les 146 échantillons utilisés pour les analyses multivariées devaient avoir une électronegativité (bilan ionique) de $\pm 10\%$. Les dix paramètres choisis sont le HCO_3^- , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , Mn^{2+} , K^+ , Si^{2+} , Na^+ , Sr^{2+} , SO_4^{2-} . Contrairement aux autres paramètres, le bicarbonate (HCO_3^-) n'a pas été mesuré en laboratoire, mais estimé à partir de l'alcalinité totale et du pH. Dans le cas où des échantillons avaient une ou des valeurs sous la limite de détection (LD), celles-ci étaient remplacées par une valeur correspondant à 55% de la LD du ou des paramètres dont il était question (Sandford et al, 1993). La distribution de la normalité de chaque paramètre a ensuite été vérifiée. Plusieurs paramètres étant hautement asymétrique (Ba^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , Mn^{2+} , K^+ , Na^+ , Sr^{2+} , SO_4^{2-}), une transformation logarithmique fut effectuée pour chacun d'eux. Finalement les paramètres ont été standardisés afin de pouvoir les comparer entre eux. La procédure de préparation des échantillons est résumée dans la **Figure 5.18**. Les analyses statistiques ont toutes été produites par le logiciel SPSS et sous RStudio avec les packages *ggbiplot* et *devtools*.

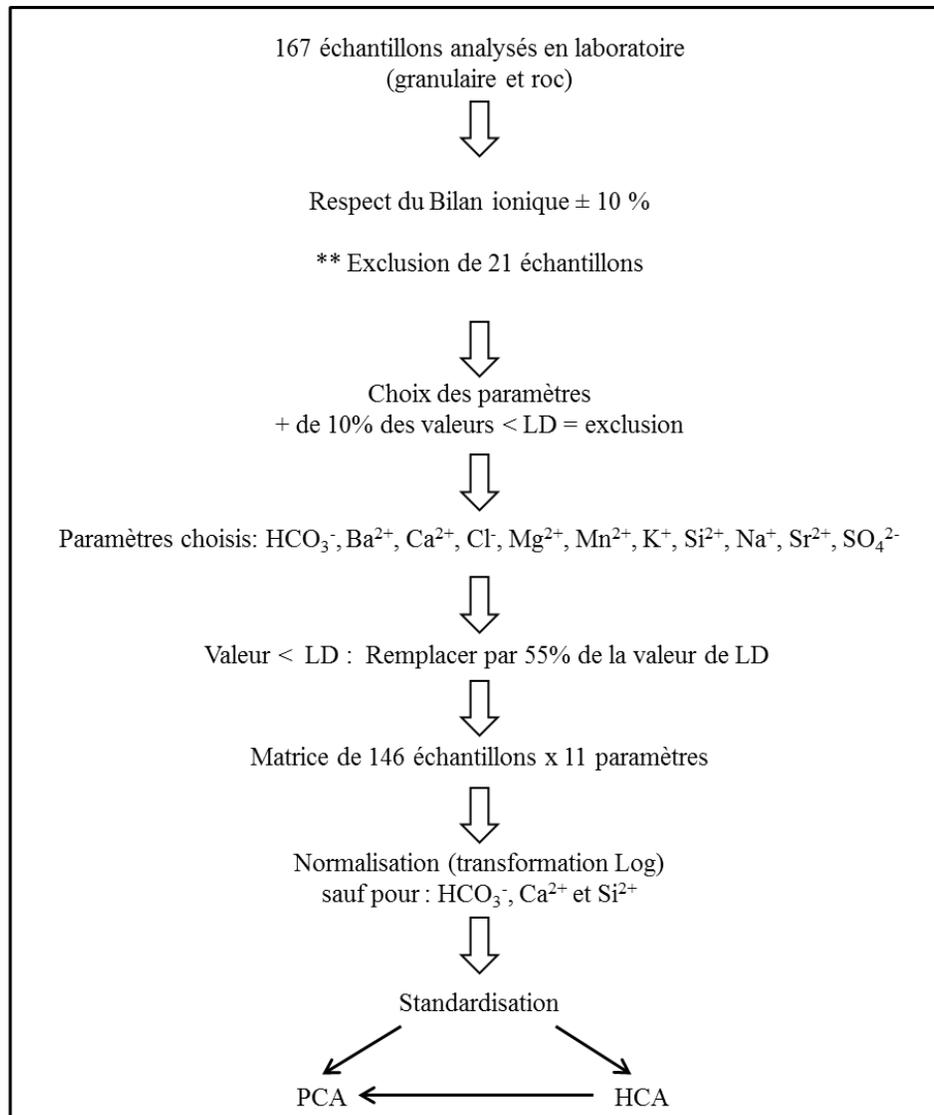


Figure 5.18. Démarche méthodologique aux fins d'analyses statistiques multivariées utilisant les résultats d'analyse géochimique (adapté de Cloutier et al, 2006).

Les analyses de groupements (HCA, aussi appelé *clustering*) ont permis de distinguer quatre groupes géochimiquement différents ($p > 0.5$). Ces quatre groupes expliquent près de 75% de variances des données (**Figure 5.19A**). Pour chacun des groupes, nous pouvons calculer la valeur médiane des paramètres. Le **Tableau 5.7** présente ces valeurs pour les 11 paramètres utilisés dans l'analyse HCA. Les valeurs médianes de pH, de matière dissoute totale (MDT) et des profondeurs médianes mesurées sur le terrain lors des campagnes d'échantillonnage ont aussi été ajoutées.

Tableau 5.7. Valeurs médianes des paramètres physico-chimiques des les quatres groupes identifiés par la HCA. Pour chacun des quatre groupes : valeurs médianes pour les concentrations des 11 paramètres utilisé lors de l'analyse de groupement hiérarchique, ainsi que de trois paramètres physiques mesurés *in situ* lors de l'échantillonnage. Les valeurs en gris sont les valeurs les plus élevées; les valeurs soulignées en caractère gras sont lesvaleurs les plus faibles.

Paramètres	G1	G2	G3	G4
Nombre d'échantillons	44	41	16	43
HCO3	280,5	158,5	310,9	<u>134,1</u>
Ba_mg_l	0,1	0,12	<u>0,06</u>	<u>0,06</u>
Ca_mg_l	79,0	44	<u>2,9</u>	37
Cl_mg_l	32,5	17	50,5	<u>3,5</u>
Mg_mg_l	12,5	7,8	<u>2,2</u>	4,8
Mn_mg_l	<u>0,002</u>	0,069	0,008	0,008
K_mg_l	2,4	2,1	4,7	<u>0,99</u>
Si_mg_l	3,5	4,2	<u>3</u>	3,2
Na_mg_l	43,0	16	175	<u>5,9</u>
Sr_mg_l	0,5	0,28	<u>0,09</u>	0,17
SO4_mg_l	23,5	21	26	<u>8</u>
pH	7,4	7,25	9	<u>7,22</u>
MDT_mg_l	503,0	274,0	607,1	<u>198,6</u>
profondeur_m	25,0	18,5	45,7	<u>18,3</u>
Nombre d'échantillons	44	41	16	43

Pour chacun des groupes déterminés par la HCA, les cations et anions majeurs ont ensuite été utilisés pour déterminer le type d'eau. Ces types d'eau sont représentés dans la **Figure 5.19B** à l'aide de diagrammes de Stiff. Ces derniers sont associés à la position des groupes sur le diagramme hiérarchique. Trois des quatre groupes sont de type bicarbonaté-calcique (G1, G2 et G4). Mais, même s'ils ont le même type d'eau, les concentrations des éléments majeurs sont différentes (**Tableau 5.7**). Le groupe G1 se distingue de G2 et G4 par ces fortes concentrations en Ca, Mg et Sr. Le groupe G2 présente les plus forts contenus en Ba, Mn et Si. Le groupe G4 se distingue par ses faibles concentrations en Ba, Cl, Na, SO4 et K.

L'analyse en composantes principales (**Figure 5.19C**) nous permet de mieux comprendre le poids de chaque paramètre dans le regroupement des échantillons obtenus par la HCA. Les deux premières composantes de l'analyse expliquent 50% de la variance de nos échantillons. La composante 1 (30% de la variance) est principalement contrôlée par les contenus en Ca, Mg et Sr et est donc attribuable à la *dureté* des échantillons. La composante 2 (20% de la variance) est contrôlée par les contenus en Na, Cl et K et est donc liée à la *salinité* des échantillons. Les groupes G1, G2 et G4 sont déterminés par la composante *dureté* alors que le groupe G3, comme on s'y attendait, est contrôlé par la composante *salinité*.

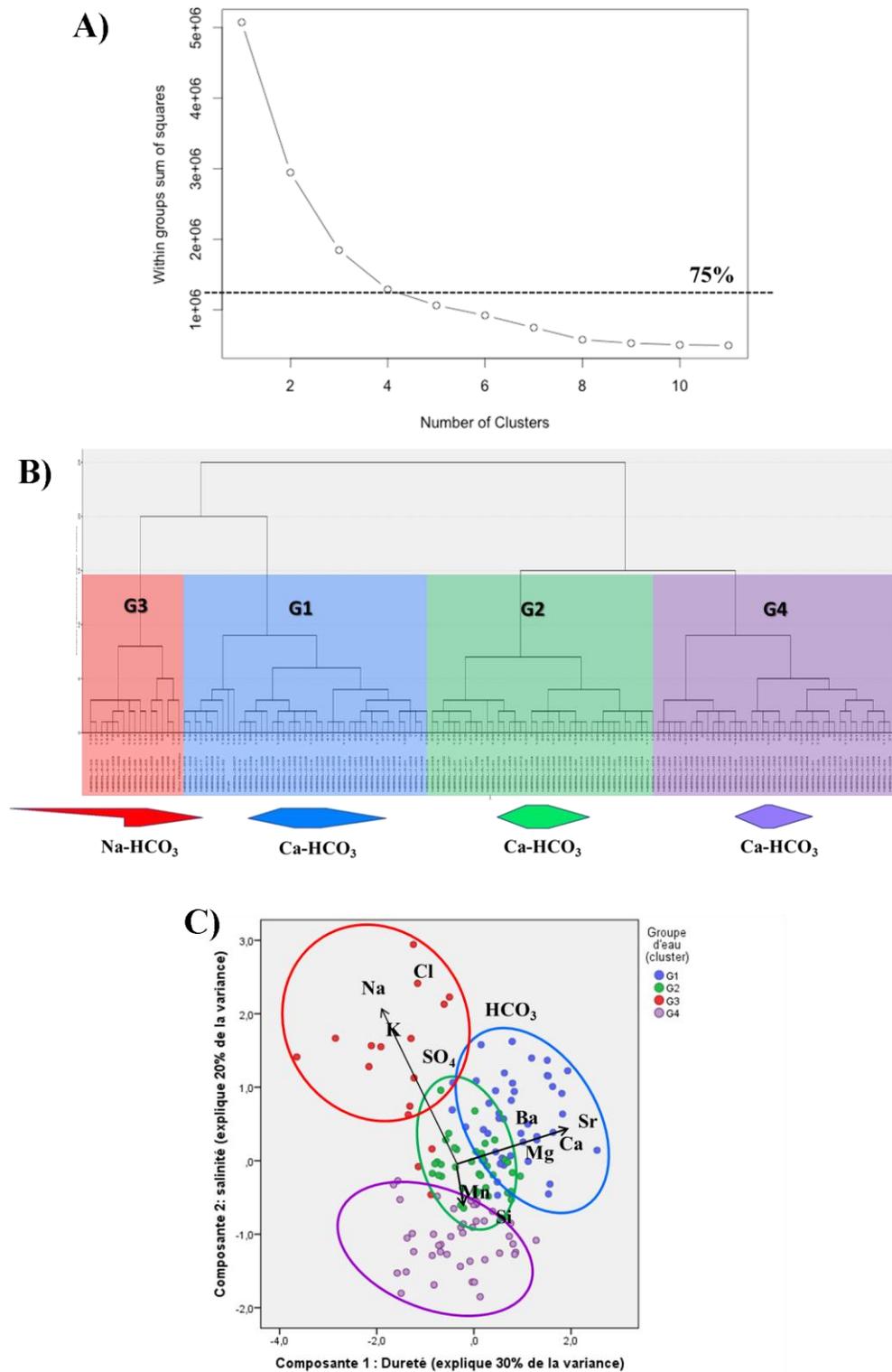


Figure 5.19. Schématisation des analyses multivariées qui ont permis de déterminer les quatre groupes d'eau. A) diagramme de partition qui détermine le nombre de groupes d'eau ; B) diagramme hiérarchique sur lequel sont représentés la position des quatre groupes d'eau ainsi que les types d'eau qui y sont associés représentés par des diagrammes de Stiff; C) représentation des groupes au sein d'un diagramme en composante principale qui permet de visualiser l'influence des paramètres (Na, Cl, K, Ca, Mg et Sr) sur la distribution des échantillons en quatre groupes.

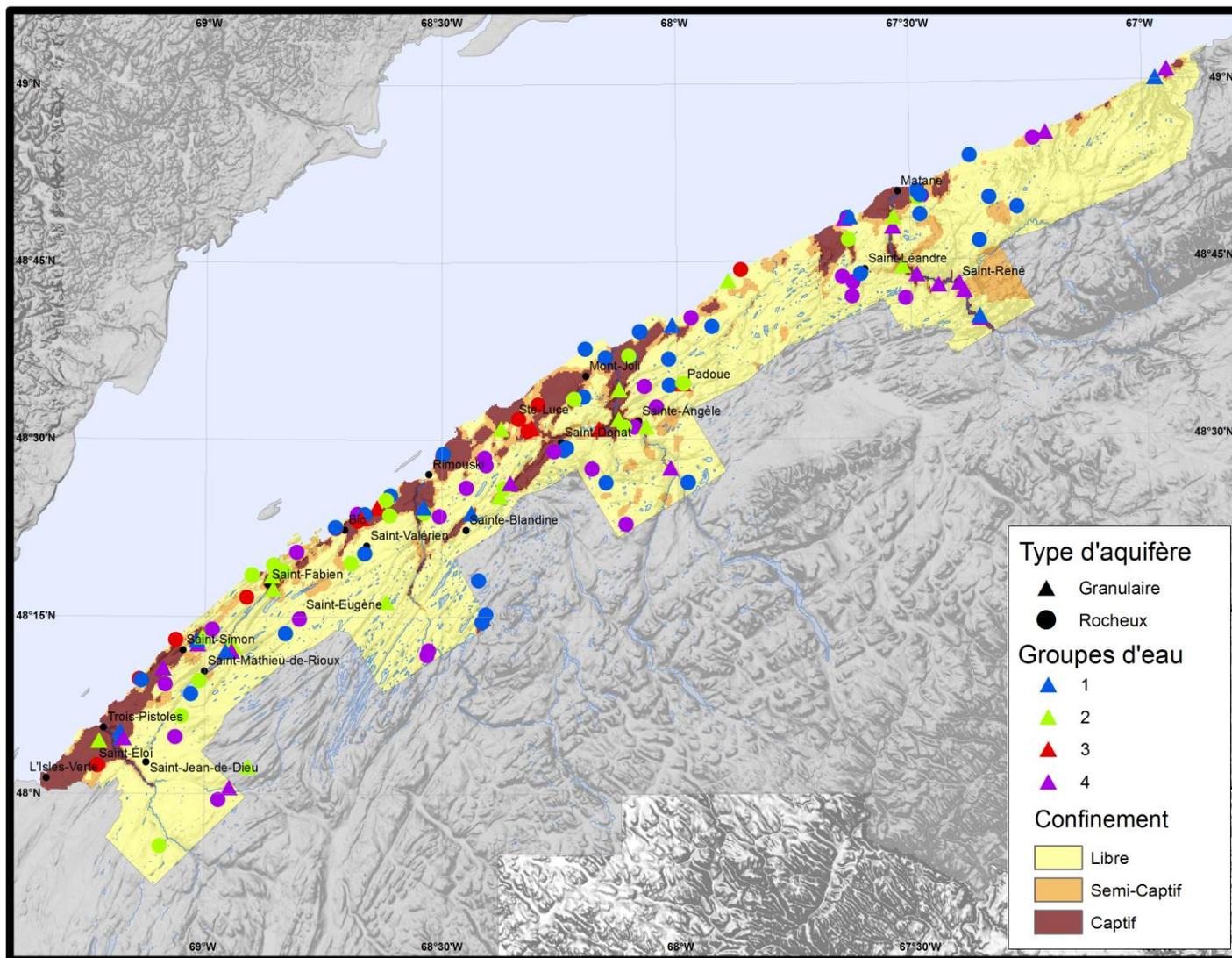


Figure 5.20. Spatialisation des quatre groupes obtenus par les analyses multivariées.

Tableau 5.8. Résumé des principales caractéristiques des quatre groupes d'eau identifiés sur le territoire du nord-est du Bas-Saint-Laurent.

Groupe d'eau	G1	G2	G3	G4
Type d'eau	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃	Ca-HCO ₃
Localisation	Partout sur le territoire.	Partout sur le territoire.	Uniquement sur la frange côtière.	Partout sur le territoire.
Géologie	Province géologique des Appalache	Province géologique des Appalache	Province géologique des Appalache	Province géologique des Appalache
Recharge	Faible à élevée.	Faible à élevée.	Faible à nulle.	Faible à élevée.
Confinement	Libre à confiné, majoritairement libre.	Libre à confiné, majoritairement libre.	Semi-confiné à confiné.	Libre à confiné, majoritairement libre.
Caractéristiques chimiques et physiques	Eau de type Ca-HCO ₃ , plus évoluée que celle de G2 et G4, avec MDT assez élevée (503 mg/l). Les concentrations médianes en Ca, Mg, Sr sont beaucoup plus élevées que dans les autres groupes. Profondeur médiane des puits : 25m.	Eau jeune de recharge de type Ca-HCO ₃ , plus minéralisée que G4, riche en Mn. Profondeur médiane des puits : 18,5m.	Eau évoluée de type Na-HCO ₃ et Na-Cl, riche en MDT (607 mg/l). Eau alcaline, pH médian de 8,9. Profondeur médiane des puits : 45m.	Eau jeune de recharge de type Ca-HCO ₃ , peu minéralisée, de pH neutre (7,22). Profondeur médiane des puits : 18,3m.
Éléments mineurs distinctifs	Sr	Mn, Si	K, SO ₄	

Les groupes ont ensuite été localisés sur le territoire à l'étude (**Figure 5.20**). Aucun patron spatial n'apparaît particulièrement, excepté pour le groupe G3 dont les échantillons se retrouvent tous dans la frange côtière. Les trois autres groupes sont dispersés sur le reste du territoire, sans relation évidente avec les degrés de confinement, la recharge ou la géologie du roc. Les principales caractéristiques chimiques et physiques, de localisation, de confinement et de recharge des quatre groupes sont reportées dans le **Tableau 5.8**.

À la lumière des informations contenues dans les **Tableau 5.7** et **Tableau 5.8**, on constate que malgré l'existence de différences géochimiques entre les quatre groupes, il demeure difficile de tirer de grandes conclusions sur les liens entre les milieux aquifères et l'eau qui y circule. En revanche, à plus petite échelle, on voit que la valeur médiane de la teneur en MDT est plus élevée dans les échantillons des groupes G1 et G3, ce qui laisse supposer une évolution géochimique le long de leur parcours souterrain. Le groupe G3 se trouve uniquement dans la frange côtière, donc à l'exutoire de l'écoulement régional. C'est aussi le seul groupe dont l'eau provient

exclusivement d'aquifère semi-captif et captif ainsi que de zones où la recharge est soit faible ou nulle. Les eaux du groupe G3 auraient donc un temps de résidence plus long dans l'aquifère ce qui est propice à la mise en place de processus d'évolution géochimique. En ce qui concerne les eaux des groupes G1, G2 et G4, elles se retrouvent partout sur le territoire, autant en zone confinée que libre ainsi que dans les zones où la recharge est élevée comme nulle. Alors que la géochimie de l'eau des groupes G2 et G4 laisse voir des eaux peu minéralisées associées aux zones de recharge élevée, les eaux de G1 semblent plus évoluées (valeur médiane de la MDT plus élevée), possiblement associées à des zones de mélange. Ces dernières proviennent d'ailleurs de puits plus profonds que les puits des groupes G2 et G4.

L'hétérogénéité locale, c'est-à-dire, le fait que l'on puisse retrouver trois types et / ou groupes d'eau différents à proximité l'un de l'autre, et ce dans un même contexte, ne permet pas d'établir des liens forts entre la présence d'un groupe ou d'un type d'eau et un contexte hydrogéochimique spécifique. Ce constat est vrai pour tous les types et groupes d'eau, sauf en ce qui concerne le groupe G3 et le type d'eau Na-Cl qui peuvent être associés à un contexte bien précis, soit la plaine côtière (**Figure 5.20**) auquel peut être associé les processus d'évolution géochimique mentionnés précédemment. Ces processus sont principalement liés aux échanges cationiques. Ces derniers sont fonction du temps de résidence de l'eau dans l'aquifère et de la distance parcourue entre les zones de recharge et de décharge. À l'échelle régionale, cependant, la géochimie de l'eau du territoire du PACES-NEBSL semble homogène; c'est-à-dire une eau en majorité de type bicarbonaté-calcique, donc assez récente qui suit un gradient hydraulique du secteur des Hautes-Terres (zone de recharge préférentielle) vers le secteur de la Plaine Côtière (zone de décharge), passant d'une eau de type Ca-HCO₃, vers une eau plus évoluée (Na-HCO₃ et Na-Cl). Trois éléments expliquent la présence majoritaire d'une eau jeune et pauvre en élément dissous : 1) la majorité des puits échantillonnés sont des puits de particuliers, dont la plupart sont de faible profondeur (moyenne de 13 m pour les puits dans le granulaire et de 35 m pour les puits au roc); 2) 77% du territoire est en condition de nappe libre et 64% des échantillons proviennent de ce contexte; et finalement 3) la distance entre les zones de recharges (les Hautes-Terres) et les zones de décharges des écoulements régionaux (le Fleuve) est plutôt restreinte (~15 km) ce qui laisse peu de distance et donc de temps pour la mise en place des processus qui contribuent à modifier la géochimie des eaux souterraines.

Isotopes stables de l'eau

$\delta^{18}O$ et δ^2H

Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène ($\delta^{18}O$ et δ^2H) sont couramment utilisés en hydrogéologie pour déterminer l'origine de l'eau ainsi que sa dynamique (AIEA, 2008). Les échantillons de pluie et de neige récoltés de mars à octobre 2014 dans quatre stations pluviométriques (voir section 3.2.3 pour les détails de l'échantillonnage) ont servi au développement d'une droite météorique locale (DML) de la région à l'étude. L'établissement de

la droite locale nécessitera la collecte de nombreux échantillons sur plusieurs années et saisons. Elle nous donne cependant une idée de la signature isotopique des pôles « pluie », « neige » et « eau souterraine » dans notre secteur d'étude. La **Figure 5.21** présente la DML construite à partir des échantillons de précipitations ainsi que les 123 échantillons d'eau souterraine et les six échantillons d'eau de surface qui ont été analysés pour les isotopes stables. La figure présente aussi à titre de comparatif, la droite météorique mondiale (DMM; Craig, 1961) et la DML de la région de Bécancour établi en 2012 (Laroque et al, 2013).

Les échantillons d'eau souterraine s'alignent parfaitement sur la DML de la région, ce qui signifie qu'il y a eu peu d'évaporation entre le moment de la précipitation et celui de l'infiltration de l'eau dans le sol. Il y a aussi peu de contraste entre les signatures isotopiques des eaux de surface et celles des eaux souterraines. Ce dernier constat soutient l'hypothèse d'eaux souterraines assez récentes dans la région. On peut aussi en déduire qu'il n'y a peu ou pas de mélange avec des eaux ayant subi de l'évaporation. Les compositions isotopiques de l'eau souterraine de la région sont cependant appauvries par rapport à la moyenne des précipitations. Ces dernières sont divisées en deux pôles : les précipitations liquides avec une signature isotopique moyenne de -7.5 ^{18}O et -53.2 ^2H et les précipitations solides avec une signature isotopique moyenne de -17.2 ^{18}O et -122.2 ^2H , beaucoup plus appauvries. La signature isotopique des eaux souterraines du BSL semble marquée par cet appauvrissement. Certains échantillons au roc ont même des valeurs de -13.9 ^{18}O et -101.9 ^2H semblables aux échantillons de neige. Les aquifères du nord-est du Bas-Saint-Laurent sont donc alimentés par l'eau de fonte et les précipitations froides du printemps qui sont, elles aussi, naturellement pauvres en ^{18}O et ^2H (Clark et Fritz, 1997). Finalement, il ne semble pas y avoir de différence entre l'eau des aquifères granulaires et celle des aquifères rocheux, ce qui laisse supposer un lien hydraulique entre les eaux des deux types d'aquifères.

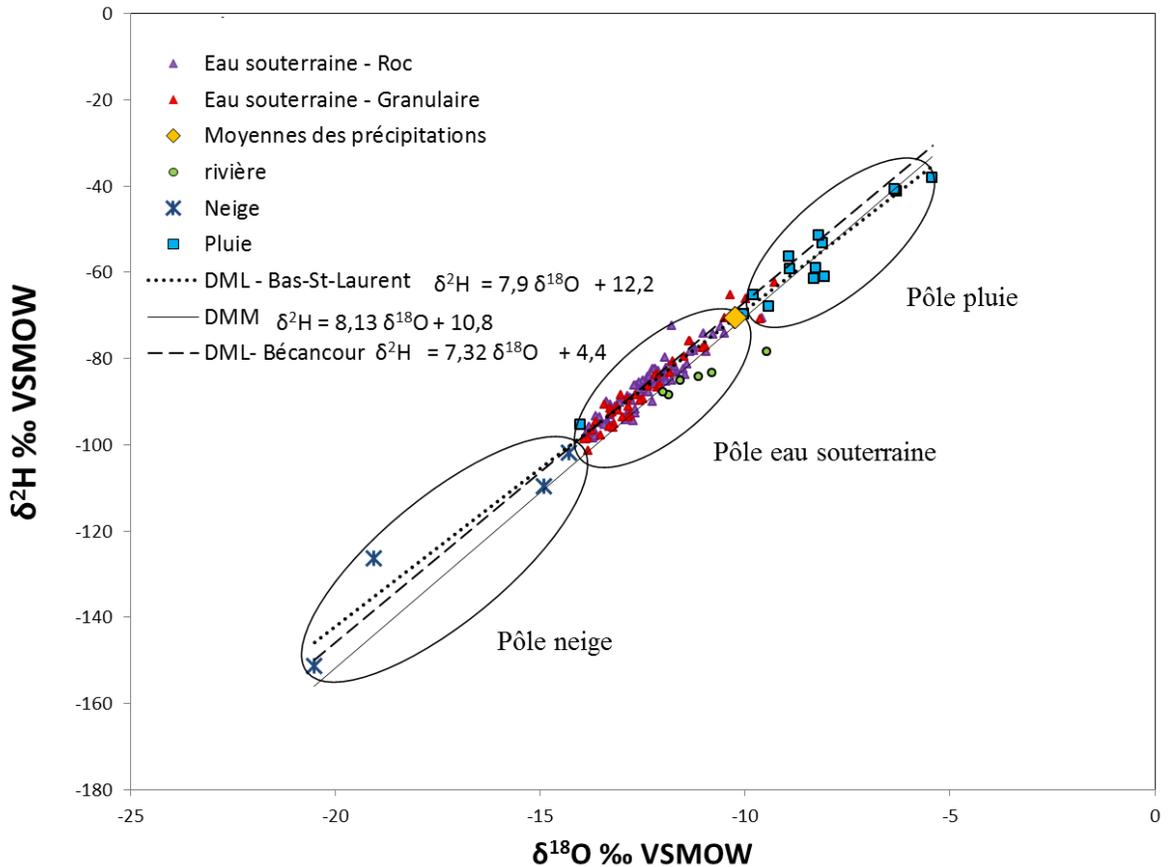


Figure 5.21. Composition isotopique de l'eau souterraine, de surface et des précipitations au Bas-Saint-Laurent comparé à la Droite météorique mondiale (DMM) et à la Droite météorique locale du projet de Bécancour (DML- Bécancour).

Le carbone inorganique dissous (CID) et sa signature isotopique ($\delta^{13}\text{C}$)

Le carbone inorganique dissous dans les eaux souterraines est un composé important dans les processus géochimiques naturels. Le CID (ou ΣCO_2) représente la somme des acides carboniques, carbonates et bicarbonates présents dans le milieu. Il provient non seulement de la combinaison du CO_2 atmosphérique avec l'eau de recharge, mais aussi de la dissolution des carbonates contenus dans la roche réservoir. Les activités anthropiques de surface et la migration verticale de gaz de la roche mère sous-jacente sont aussi des sources potentielles de carbone dans les aquifères. Dans un contexte d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles non renouvelables, des craintes existent actuellement au Québec quant à la contamination des eaux souterraines des puits résidentiels par la migration vertical des hydrocarbures, notamment le méthane (Raynault et al. 2014; Pinti et al. 2014). Il est donc important de déterminer l'origine du carbone présent de façon naturelle dans les eaux souterraines. La composition isotopique du DIC ($\delta^{13}\text{C}\text{-CID}$) peut aider à préciser la ou les sources de DIC et reflète l'interaction chimique avec le réservoir (AIEA, 2008).

Lors des campagnes d'échantillonnage d'eau, 74 échantillons ont été recueillis pour l'analyse des concentrations en CID et du $\delta^{13}\text{C}$ -CID. Les valeurs de DIC sont comprises entre 0 et 7 mg/L. Les plus fortes concentrations sont trouvées dans des eaux plus faiblement oxygénées (<60% de saturation d'oxygène) bien qu'il n'existe aucune relation linéaire entre ces deux paramètres. Les valeurs du $\delta^{13}\text{C}$ -CID varient entre 3 et -27 ‰ avec une valeur médiane de -18 ‰. 54 % des échantillons prélevés ont des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ qui varient entre -15 et -25 ‰ (**Figure 5.22**). Ces valeurs nous indiquent que la majorité du CID que l'on retrouve dans les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent serait lié à la dégradation de la matière organique contenu dans le sol. Une faible portion des échantillons (moins de 15%) ayant des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ proche de -30 ‰ pourrait être liée à la présence de carburant fossile en profondeur (d'origine thermogénique) ou encore au carbone organique du sol (Pinti et al.2014). Par contre, les données amassées dans le cadre du PACES-NEBSL ne nous permettent pas pour l'instant d'en faire la distinction. Pour cela il faudrait faire des études spécifiques sur le méthane et d'autres gaz associés (éthane, propane, hélium et radon) dans les eaux souterraines. Toutefois, il serait plus probable que l'origine du CID de ces échantillons soit attribuable au carbone du sol étant donné le contexte dans lequel se trouvent les eaux souterraines du territoire : 1) nous sommes en présence d'eaux jeunes, peu minéralisé (Ca-HCO₃); 2) les eau x souterraines du territoire sont puisés dans des puits ayant une faible profondeur (moyenne de 28 m); 3) la distance entre les zones de recharges et les zones de décharges est plutôt restreinte, ce qui laisse peu de distance et par conséquent peu de temps pour la mise en place des processus géochimique et d'échanges isotopiques nécessaire à la présence de méthane et /ou de gaz connexes dans les eaux souterraines.

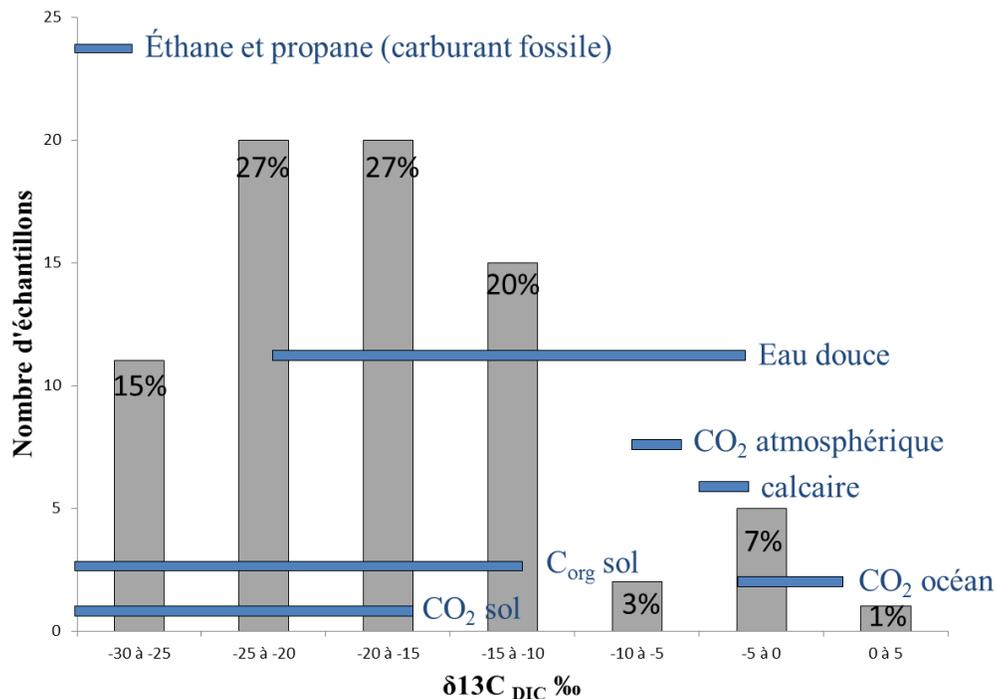


Figure 5.22. Quantité de $\delta^{13}\text{C}$ du carbone inorganique dissous dans les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent. Les origines possibles du $\delta^{13}\text{C}$ sont représentées par les barres bleues sur le graphique.

5.6 Synthèse hydrogéologique régionale

La compilation des informations stratigraphiques, géochimiques et hydrogéologiques au moyen d'une coupe conceptuelle permet de synthétiser les caractéristiques hydrogéologiques du territoire à l'étude. La **Figure 5.23** reprend la coupe géologique de Saint-Gabriel- Sainte-Luce (**Figure 4.12**) modifiée afin d'illustrer un modèle conceptuel de l'hydrogéologie régionale.

Hautes-Terres

Les Hautes-Terres représentent la majorité (73%) du territoire du PACES-NEBSL. La couverture de dépôts meubles correspond à un till discontinu de faible épaisseur ou à un manteau résiduel coiffant le roc. L'aquifère principal est un aquifère rocheux à nappe libre. Ces conditions expliquent que les Hautes-Terres sont la principale zone de recharge du territoire à l'étude. Il est tout de même possible de retrouver localement des aquifères granulaires de surface de faibles dimensions et de faible puissance saturée qui sont souvent utilisés comme sources d'approvisionnement individuelles (fontaines). Les résultats du bilan hydrique spatialisé indiquent que la recharge dans les Hautes-Terres est de significative à élevée. Les puits ont une profondeur moyenne de 35 m et les niveaux d'eau (niveaux statiques) sont près de la surface. Les écoulements sont principalement horizontaux. Ils suivent la topographie, ce qui développe des systèmes d'écoulements locaux et intermédiaires (S-O – N-E), alors que l'écoulement régional se fait en directions S-N et est symbolisé par la flèche au trait continu. L'indice de vulnérabilité de l'aquifère rocheux sur le territoire des Hautes Terres est de moyen à significatif (100 à 180). Très peu de données sont disponibles sur les débits potentiels pouvant être extraits du socle rocheux des Hautes-Terres. Six courts essais de pompage ont été réalisés dans le cadre du projet et les résultats indiquent que celui-ci fournit des débits de l'ordre de 15 à 25 L/min ($T \sim \times 10^{-4}$ à 10^{-5} m²/min) pour des puits de 30 à 47 m de profondeur dans le roc. Cette classe de débits peut répondre relativement bien aux besoins d'une maison unifamiliale (à condition que la profondeur forée dans le roc constitue un réservoir suffisamment grand), mais est beaucoup trop faible pour envisager l'alimentation d'une petite municipalité. Ces essais ont été réalisés dans des formations schisteuses. Toutefois, le schiste peut être plus productif localement puisque la municipalité de Saint-Jean-de-Dieu réussit à extraire un débit de 272 m³/jour au moyen d'un puits de moins dix mètres ouverts dans l'aquifère rocheux (Jolicoeur, 2007).

La majorité des échantillons pris dans les Hautes-Terres proviennent de puits de l'aquifère rocheux en condition de nappe libre et ont une signature géochimique à caractère bicarbonaté-calcique (Ca-HCO₃). Ce type d'eau est l'expression d'une eau peu évoluée et peu minéralisée provenant d'une recharge récente. Toutefois, quelques échantillons (4) ont fait ressortir la présence d'eau à caractère chloruré-calcique (Ca-Cl) dans la formation géologique de la Ceinture de Gaspé. Ces eaux de type intermédiaire sont la résultante d'échanges cationiques entre les ions HCO₃⁻ de l'eau de recharge et les ions Cl⁻ contenus dans les formations calcaires et gréseuses constituant cette formation géologique.

Pour ce qui est de la qualité de l'eau souterraine des Hautes-Terres, seulement trois dépassements des normes de qualité de l'eau pour la santé ont été relevés parmi les 70 échantillons prélevés dans ce contexte. En effet, le critère de potabilité pour les nitrates-nitrites a été dépassé dans les secteurs de Saint-Eugène, Saint-Jean-de-Dieu et Sainte-Françoise, allant de 2 à 7 mg/l au-dessus de la norme qui est de (10 mg/l N). Étant donné que les échantillons proviennent de puits installés dans l'aquifère rocheux à nappe libre et qu'ils sont situés en zones agricoles, l'origine de la contamination est probablement anthropique.

Plaine Côtière

On y retrouve une couverture quasi-continue de dépôts marins et littoraux généralement épais sur la Plaine Côtière comblant les sillons appalachiens et la plupart de vallées alluviales. Dans les secteurs de Notre-Dame-des-Neiges, Rimouski, Luceville, Mont-Joli et Sainte-Flavie, les sédiments marins d'eaux profondes et les sédiments littoraux forment de vastes plaines organisées en terrasses. La carte 18 (Contextes hydrostratigraphiques) montre que la séquence type de l'architecture de ces terrasses est constituée de sable et gravier (granulaire) reposant sur les sédiments argileux, qui eux reposent directement sur le roc (1/3/4). Les sédiments littoraux de surface sont perméables, mais sont généralement de faible puissance saturée. Ils sont tout de même fréquemment utilisés comme formation aquifère en y installant des puits de surface (fontaines). On retrouve aussi cette séquence typique témoignant de l'invasion de la mer postglaciaire dans les sillons appalachiens, comme par exemple dans les secteurs de Saint-Simon, de Saint-Fabien ou de Saint-Mathieu-de-Rieux. Localement, un aquifère granulaire en condition artésienne peut être retrouvé, comme par exemple, dans le sillon appalachien où se situe la municipalité de Saint-Simon.

L'invasion marine de la mer de Goldthwait sur la Plaine Côtière se reflète également par l'édification de quelques-uns des principaux deltas du territoire comme ceux de Trois-Pistoles, de Saint-Fabien, du Bic, de Luceville et de Price. Ces imposants corps sédimentaires perchés dans le paysage sont constitués majoritairement de sable et gravier. Dans certains cas, beaucoup d'efforts de recherche en eau ont été déployés dans le passé afin d'investiguer leur potentiel aquifère pour l'alimentation en eau à des fins municipales (Jolicoeur, 1994; Mission HGE, 2005). Malgré leur épaisseur pouvant dépasser plus de 30 m, le potentiel aquifère de ces complexes deltaïques s'est avéré, dans bien des cas, relativement pauvre en raison de leur faible puissance saturée. Toutefois, quelques-uns comme celui de Luceville et de Price répondent aux besoins des municipalités qui y ont aménagé des galeries de captage ou des puits conventionnels. Dans le fond des vallées alluviales, on retrouve en surface des sables et des graviers alluviaux reposant généralement sur des sédiments argileux marins. Ces argiles reposent le plus souvent directement sur le roc. Il est tout de même possible de retrouver localement des aquifères granulaires captifs, très productifs et d'épaisseurs variables (de 2 à plus de 20 mètres) sous les argiles marines dans quelques vallées de

la Plaine Côtière, comme dans la vallée du Grand lac Malobès / Rivière sud-ouest à Saint-Fabien, de Mitis, au pied de Saint-Blandine, dans le secteur de Val-Neigette, ou par endroits dans la vallée de la rivière Neigette.

Compte tenu que les sédiments argileux couvrent une grande superficie de la Plaine Côtière et qu'ils sont épais, ils jouent le rôle d'aquitard en empêchant la percolation verticale de la recharge pouvant atteindre l'aquifère rocheux. La recharge estimée par bilan hydrique spatialisée sur la Plaine Côtière est donc nulle à très faible. La présence de ces sédiments argileux fait en sorte non seulement d'empêcher la recharge verticale du socle rocheux sous la Plaine Côtière, mais a aussi pour conséquence de diminuer grandement la vulnérabilité de l'aquifère rocheux, qui oscille entre faible et très faible entre autres en raison des deux paramètres DRASTIC suivants : profondeur du toit de l'aquifère (D) et impact de la zone vadose (I).

Puisque les sédiments argileux que l'on retrouve sur la Plaine Côtière sont composés d'illite (65 à 85%) et de chlorite (15 à 35%) (Dionne, 1972a), un échange ionique impliquant les cations majeurs Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^{2+} peut se produire entre les minéraux des sédiments argileux et l'eau souterraine. Ces échanges cationiques sont susceptibles d'expliquer la transition d'une eau bicarbonatée (Ca-HCO_3) des hautes terres vers une eau plus évoluée de caractère bicarbonaté-sodique (Na-HCO_3) dans les nappes captives de la Plaine Côtière. Ce type d'eau se trouve autant dans des aquifères granulaires que dans des aquifère rocheux confinés par l'argile. Il semblerait donc que les échanges cationiques entre le Ca^{2+} , contenu dans l'eau de recharge, et le Na^+ , contenu dans l'argile et le socle rocheux, se font autant de l'argile vers les aquifères granulaires confinés sous-jacents, qu'en fonction du temps de résidence de l'eau dans les aquifères rocheux.

Les nappes libres sont caractérisées par une eau bicarbonatée-calcique, indicateur d'une recharge récente. À proximité de l'estuaire maritime, quelques échantillons provenant de l'aquifère rocheux à nappe libre indique une eau de type chlorurée-sodique (Na-Cl). La salinité de ces échantillons (min.: 0,18 ppt; max.: 4,39 ppt; méd.: 0,87 ppt) est toutefois bien en deçà de celle de l'eau de mer (35 ppt). Seulement l'échantillon ayant une valeur de salinité de 4,39 ppt peut être considéré comme de l'eau saumâtre. Ces valeurs de salinité ne sont donc pas interprétées comme une intrusion saline provenant de l'estuaire, mais représenterait plutôt l'évolution de l'eau à travers les écoulements régionaux profonds des Hautes-Terres vers l'estuaire maritime.

Bien que globalement, sur l'ensemble du territoire, on puisse discerner un gradient hydraulique amont-aval en regardant les types d'eau, localement il en va autrement. En effet, sur l'ensemble de la zone d'étude, on retrouve fréquemment un puits ayant un type d'eau associé à une recharge récente, à proximité d'un autre puits ayant un type d'eau plus évolué, et ce dans le même contexte hydrogéologique. Dans de tels cas, où des échantillons proviennent de contextes similaires, c'est-à-dire, même lithologie, profondeurs similaires, même niveau de confinement, etc., il est alors difficile d'émettre une hypothèse quant à quant à l'origine de cette hétérogénéité (ou variabilité) locale dans un milieu considéré comme étant homogène sur le plan géochimique.

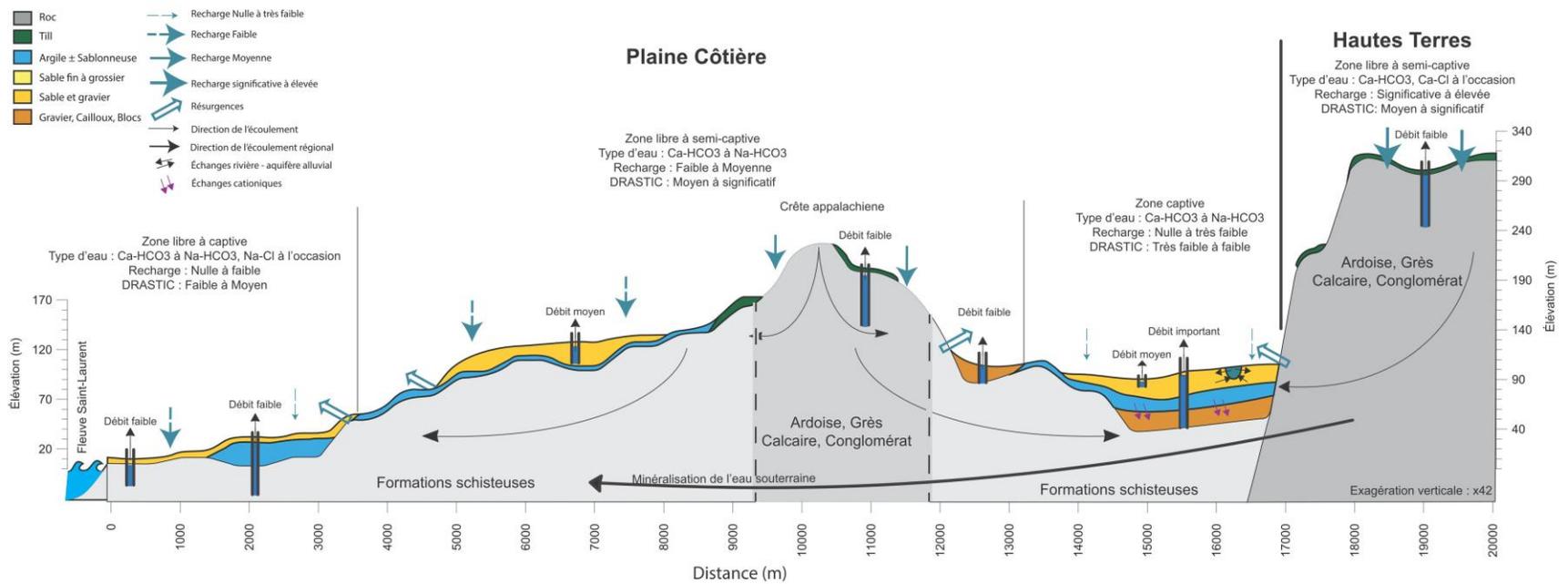


Figure 5.23. Synthèse des contextes hydrogéologiques régionaux

6 RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

6.1 Utilisation de l'eau souterraine

Le choix d'une source d'approvisionnement en eau potable pour une municipalité, qu'elle soit de surface ou souterraine, dépend de plusieurs facteurs dont l'accessibilité à la ressource ainsi que de la quantité et de la qualité de cette dernière.

L'information relative à la consommation résidentielle et celle relative aux industries, commerces et institutions (ICI) a été recueillie via un sondage. Dans un premier temps, les municipalités incluses dans le territoire du PACES-NEBSL ont été contactées afin de savoir si elles étaient équipées d'un réseau de distribution d'eau potable et si oui, pour connaître leur source d'approvisionnement en eau (souterraine ou de surface). Ces appels visaient aussi à identifier les entreprises présentes sur le territoire municipal. Ces dernières ont ensuite été contactées une à une afin d'obtenir de l'information sur leur consommation d'eau. Certaines municipalités n'ont cependant pas pu être rejointes ou ne pouvait nous donner accès à ce type d'information, nous avons utilisé et compilé des données provenant du MDDELCC et de Statistiques Canada . En ce qui concerne la consommation d'eau en lien avec le milieu agricole, les données proviennent du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Le protocole de Ballard et al. (2012) a ensuite été utilisé pour obtenir des consommations annuelles (m^3/an) pour chacun des secteurs mentionnés précédemment et produire les livrables cartographiques associés. Tous les calculs ont été faits en fonction du pourcentage de territoire de chaque municipalité qui est inclus dans la région du PACES-NEBSL. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 6.1**.

Sur les 39 municipalités incluses dans le territoire du PACES-NEBSL, 15 sont alimentées par un réseau d'eau souterraine, 13 par un réseau d'eau de surface, 10 n'ont pas de réseau et une est alimentée par un réseau mixte. Les municipalités des Saint-Anaclet-de-Lessard, de Grand-Métis, de Sainte-Flavie et de Notre-Dame-des-Neiges sont respectivement alimentées par les réseaux de Rimouski, de Price, de Mont-Joli et de Trois-Pistoles. Ces résultats sont représentés sur la carte 26.

Dans les quatre MRC du territoire, entre 21 et 26 % de la population est alimentée par des puits privés individuels, dont la plupart sont aménagés dans l'aquifère rocheux. Les MRC de la Matanie et de Rimouski-Neigette consomment le plus d'eau (surface et souterraine combinée) avec respectivement 44 et 37% de la consommation totale du territoire. Par contre, en ce qui concerne la consommation d'eau souterraine exclusivement, les MRC de Rimouski-Neigette et des Basques sont les plus grandes consommatrices avec 95 et 66% de leur eau qui provient d'aquifères de la région (**Tableau 6.1**).

Tableau 6.1. Bilan de l'utilisation de l'eau souterraine et de surface pour toutes les municipalités du territoire du PACES-NEBSL. Les municipalités soulignées sont celles dotées d'un réseau d'approvisionnement en eau souterraine.

MRC	Municipalité	Population totale	Consommation totale (m ³ /an)	Source d'approvisionnement	
				Surface (%)	Souterraine (%)
Rimouski-Neigette	<u>Rimouski</u>	48 155	8 218 127	2	98
	Saint-Anaclet-de-Lessard	3 093	332 428	4	96
	Saint-Eugène-de-Ladrière	405	35 221	-	100
	Saint-Fabien	1 906	321 637	80	20
	<u>Saint-Narcisse</u>	1 100	90 829	2	98
	Saint-Valérien	914	139 603	2	98
		55 573	9 137 846	5	95
Les Basques	Notre-Dame-des-Neiges	1 256	235 487	70	30
	<u>Saint-Clément</u>	500	75 760	-	100
	<u>Sainte-Françoise</u>	415	22 641	-	100
	Saint-Éloi	313	99 409	34	66
	<u>Saint-Jean-de-Dieu</u>	1 606	202 027	4	96
	<u>Saint-Mathieu-de-Rioux</u>	691	77 887	-	100
	<u>Saint-Simon</u>	446	61 507	-	100
	Trois-Pistoles	3 471	736 072	42	58
		8 698	1 510 789	34	66
Matane	Baie-des-Sables	620	125 087	34	66
	Grosses-Roches	416	94 504	95	5
	Les Méchins	1 200	150 027	86	14
	<u>Matane</u>	14 600	9 418 118	62	38
	Saint-Adelme	500	713 216	94	6
	Sainte-Félicité	1 131	190 725	77	23
	Sainte-Paule	230	18 553	-	100
	Saint-Léandre	416	59 129	4	96
	<u>Saint-René-de-Matane</u>	1 022	63 120	-	100
	Saint-Ulric	1 691	200 797	46	54
Saint-Jean-de-Cherbourg	200	12 775	-	100	
		22 026	11 033 275	63	37
La Mitis	Grand-Métis	250	43 058	-	100
	Les Hauteurs	561	47 696	-	100
	Métis-sur-Mer	608	229 777	93	7
	Mont-Joli	6 673	1 138 978	100	-
	Padoue	265	36 488	-	100
	<u>Price</u>	1 742	255 779	-	100
	Saint-Donat	920	161 118	32	68
	<u>Sainte-Angèle-de-Mérici</u>	1 068	232 163	-	100
	Sainte-Flavie	958	230 465	79	21
	Sainte-Jeanne-d'Arc	325	33 313	-	100
	<u>Sainte-Luce</u>	3 000	571 519	14	86
	Saint-Gabriel-de-Rimouski	1 179	104 955	55	45
	Saint-Joseph-de-Lepage	560	92 104	29	71
<u>Saint-Octave-de-Métis</u>	516	115 954	16	84	
		18 625	3 293 368	54	46

La majeure partie de l'eau souterraine consommée dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent est utilisée à des fins de consommation résidentielle (47%) et industrielle, commerciale et institutionnelle (ICI) (46%). La consommation d'eau sur le plan résidentiel étant proportionnelle à la dimension de la population, la ville de Rimouski consomme le plus d'eau dans cette catégorie. La majorité des résidents de la municipalité (83%) est alimentée à partir de deux sources d'eau souterraine situées à une quinzaine de kilomètres au sud du centre-ville de Rimouski alors que les 17% restants s'approvisionnent à partir de puits privés individuels. La ville de Matane, la seconde plus grande ville du territoire en termes de population, alimente 89 % de sa population à partir d'eau souterraine. Cette municipalité se démarque aussi pour sa consommation d'eau en lien avec le secteur des ICI, un peu plus de 8 Mm³ d'eau par année, ce qui compte pour 90% de la consommation totale allouée aux ICI pour toute la MRC de la Matanie. En effet, une grande quantité d'industries œuvrant dans les secteurs secondaires et tertiaires y sont installées (industrie de pâtes et papiers, de production d'éoliennes, de transformation du bois etc.). Notons que la plupart de ces entreprises s'alimentent en eau de surface à partir de prises d'eau dans la rivière Matane. D'ailleurs la majeure partie de l'eau consommée par les ICI (80%) sur l'ensemble du territoire provient d'eau de surface.

Pour la consommation agricole, les informations proviennent du MAPAQ et concernent le type d'élevage et le nombre de têtes pour la production animale ainsi que le type de culture et le nombre d'hectares cultivés pour la production végétale. Des volumes d'eau fournis par le MAPAQ ont ensuite été associés à chacune de ces activités. Comme il est très difficile d'obtenir de l'information quant à la provenance de l'eau (souterraine ou de surface, aqueduc ou puits) sans contacter chacune des fermes de la région, des pourcentages provenant de Statistiques Canada, compilés dans le rapport de BPR (2003) ont été utilisés pour compléter l'information sur la consommation d'eau en milieu agricole. Ces statistiques sont présentées dans le **Tableau 6.2**.

Tableau 6.2. La distribution de l'eau selon sa provenance pour le secteur agricole dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent.

Provenance de l'eau	Avec aqueduc		Sans aqueduc	
	Végétale	Animale	Végétale	Animale
Aqueduc	5,9 %	50 %	0 %	0 %
Surface	88,2 %	0 %	91,15 %	0 %
Souterraine	5,9 %	50 %	8,85 %	100 %

Pour l'ensemble du territoire, seulement 7% de l'eau souterraine consommée est destinée à des fins agricoles. Les principales cultures présentes sur le territoire sont le foin et les céréales qui n'exigent aucune irrigation. De plus, l'élevage d'animaux et la culture maraîchère, deux activités agricoles nécessitant beaucoup d'eau, sont marginales ou de faible envergure dans la région. À l'échelle des MRC, celles de Les Basques et de Mitis allouent 20 % de leurs prélèvements d'eau

souterraine respectifs aux activités agricoles, alors que dans les MRC de Rimouski-Neigette et de la Matanie, l'utilisation de l'eau souterraine à des fins agricoles ne représente que 4% de leur consommation totale. Le **Tableau 6.3** présente les différents usages de la ressource eau souterraine dans les quatre MRC du territoire.

Tableau 6.3. Consommation de l'eau souterraine dans les quatre MRC du territoire selon les trois principaux usages : Agricole, Industriel, commercial et institutionnel (ICI) et résidentiel

MRC	AGRICOLE (%)	ICI (%)	RÉSIDENTIEL (%)
RIMOUSKI-NEIGETTE	4	46	50
LES BASQUES	21	44	36
MATANIE	4	56	41
MITIS	20	27	54

6.2 Qualité de l'eau souterraine

L'interprétation de la qualité de l'eau potable découle des résultats de l'étude géochimique présentée à la section 5.5. Ces derniers ont été analysés selon le protocole sur la qualité de l'eau, commun à tous les projets PACES. Les critères utilisés pour définir la qualité de l'eau souterraine proviennent des *Recommandations sur la qualité de l'eau potable au Canada* du Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable (Santé Canada, 2014) et des normes de potabilité du *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (RQEP), en vigueur depuis 2001. Les critères de potabilité sont séparés en deux groupes, soit les objectifs esthétiques (OE) qui concernent principalement le goût, l'odeur et la couleur de l'eau et les concentrations maximales acceptables (CMA) qui sont liées aux risques encourus pour la santé humaine advenant l'ingestion d'eau contenant des contaminants d'ordre naturels ou anthropiques. Les dépassements des critères pour les OE et les CMA des 164 puits échantillonnés durant le projet sont comptabilisés dans le **Tableau 6.4**.

Tableau 6.4. Statistiques sur les dépassements des critères d'eau potables (objectifs esthétiques et concentrations maximales acceptables pour la santé) dans les aquifères fracturés et granulaires du nord-est du Bas-Saint-Laurent.

Paramètres	Critères (mg/l)	Aquifère fracturé (110 puits)		Aquifère granulaire (54 puits)		Total (164)	
		Nombre de dépassements	%	Nombre de dépassements	%	Nombre de dépassements	%
OBJECTIFS ESTHÉTIQUES							
Aluminium	0,1	1	0,9	2	3,7	3	1,8
Chlorures	250	8	7,3	1	1,9	9	5,5
Cuivre	1	0	0	0	0	0	0
Fer	0,3	12	10,9	4	7,4	16	9,8
Manganèse	0,05	26	23,6	15	27,8	41	25
Sodium	200	6	5,5	2	3,7	8	4,9
Sulfates	500	0	0	0	0	0	0
Sulfures	0,05	3	2,7	1	1,9	4	2,4
Zinc	5	0	0	0	0	0	0
pH	6,5 à 8,5	24	21,8	9	16,7	33	20,1
CONCENTRATIONS MAXIMALES ACCEPTABLES							
Antimoine	0,006	0	0	1	1,9	1	0,6
Arsenic	0,01	1	0,9	1	1,9	2	1,2
Baryum	1	0	0	0	0	0	0
Bore	5	0	0	0	0	0	0
Cadmium	0,005	0	0	0	0	0	0
Chrome	0,05	0	0	0	0	0	0
Fluorures	1,5	4	3,6	2	3,7	6	3,7
Nitrates	10	4	3,6	1	1,9	5	3,0
Plomb	0,01	0	0	0	0	0	0
Sélénium	0,01	0	0	0	0	0	0
Uranium	0,02	0	0	0	0	0	0

Objectifs esthétiques

Dans la région, les dépassements observés concernent majoritairement les critères liés aux OE. Les paramètres les plus fréquemment au-dessus de la limite recommandée sont le pH, le fer et le manganèse. Ces trois paramètres se retrouvent en excès dans les puits de l'aquifère rocheux et dans les puits installés dans le matériel granulaire (**Figure 6.1** et **Figure 6.2**).

Les concentrations de manganèse sont au-dessus de la limite recommandée dans 25% des puits de la région, ce qui correspond aux commentaires recueillis en début de projet auprès de nos partenaires et de la population. Les valeurs des dépassements s'échelonnent entre 0,052 et 3,8 mg/l, dont la majorité (38) se situe entre 0,052 et 0,099 mg/l. Les désagréments associés à l'excès de manganèse sont pour le moment principalement liés à la couleur de l'eau qui devient noirâtre et qui peut par conséquent tacher les appareils électro-ménagers et les vêtements lors de la lessive par exemple. Les valeurs élevées de manganèse ont été observées partout sur le territoire, soit dans 24% des puits aménagés dans l'aquifère rocheux et 28% des puits installés dans les dépôts granulaires.

Les valeurs de pH sont au-dessus (eau alcaline) ou en dessous (eau acide) des recommandations dans 20% des puits (**Figure 6.1**). Dans 16 puits, dont 13 situés dans l'aquifère fracturé, les valeurs de pH oscillent entre 5,7 et 6,5. Les valeurs alcalines quant à elles varient entre 8,5 et 9,7 et sont présentes dans 17 des puits échantillonnés. Un pH acide ou alcalin peut avoir une incidence sur les concentrations des autres paramètres ainsi que sur la formation de différents composés. À titre d'exemple, la présence de soufre au contact d'une eau dont le pH est acide favorise la formation de sulfure d'hydrogène gazeux caractérisé par une odeur d'œufs pourris (Santé Canada, 2014).

Les dépassements en fer, moins nombreux que dans le cas du manganèse, se retrouvent aussi sur l'ensemble du territoire. Les valeurs des dépassements s'échelonnent entre 0,34 et 8,6 mg/l, dont deux dépassent de plus de 25 fois la limite. Les dépassements apparaissent dans 10% des puits échantillonnés (16 puits). Les désagréments causés par le fer sont du même ordre que ceux du manganèse, avec une coloration de l'eau plus rougeâtre.

Dix dépassements en chlorures ont aussi été relevés dans dix puits différents dont trois dans des puits localisés sur le bord du fleuve dans le secteur du marais de Cap-Marteau. Dans six de ces dix puits, des dépassements en sodium sont aussi présents. Ces puits, qui représentent 5% des puits échantillonnés, excèdent la limite de 200 mg/l recommandée pour le sodium. Ils sont principalement situés sur la Plaine Côtière et uniquement dans l'ouest du territoire. Des concentrations excédant les recommandations pour les chlorures et le sodium peuvent entraîner des changements dans le goût de l'eau et la corrosion de la plomberie. De plus, dans le cas du sodium, une concentration élevée peut engendrer des problèmes de santé aux personnes atteintes d'hypertension.

Seulement quatre puits présentent des dépassements pour les sulfures. Ils sont situés entre les municipalités de Rimouski et de Saint-Simon. L'impact le plus fréquent d'une haute concentration en sulfures est l'odeur. Aussi, trois puits, soit deux dans le granulaire à Saint-Mathieu-de-Rioux et un dans le roc situé à Baie-des-Sables, excèdent les recommandations concernant l'aluminium. Pour le moment, la recommandation pour l'aluminium a été instaurée uniquement par principe de précaution car la présence de ce paramètre dans l'eau potable n'est détectable ni au goût, ni à l'odeur, pas même de manière visuelle. Finalement, en ce qui concerne le zinc et les sulfates, aucun dépassement n'a été observé dans les puits échantillonnés dans le cadre du présent projet.

Concentrations maximales acceptables

Pour les normes sur les concentrations maximales acceptables pour la santé humaine, 16 dépassements ont été recensés dans les 164 puits échantillonnés. Les paramètres concernés sont les fluorures, les nitrites-nitrates, l'arsenic et l'antimoine. Ce sont les deux premiers qui affichent

les dépassements les plus fréquents. La spatialisation de ces dépassements est représentée sur la **Figure 6.3**.

Six puits, dont quatre dans le roc, ont des dépassements en fluorures. Les six puits se trouvent en contexte semi-captif ou captif, ce qui laisse penser que la présence de fluorures est d'origine naturelle et intimement liée à la composition minéralogique des unités rocheuses que le forage a recoupées. Les valeurs de dépassements s'échelonnent entre 1,6 et 7 mg/l. En faible dose, les fluorures peuvent être bénéfiques pour la santé, entre autres pour la prévention de la carie dentaire, mais en trop grande quantité, il peut aussi causer des fluoroses dentaires et/ou squelettiques, ce qui est hautement indésirable (Santé Canada, 2014).

Par contre, les nitrites-nitrates se retrouvent dans six puits situés en contexte de nappe libre, ce qui laisse supposer une contamination d'origine anthropique. Les nitrites-nitrates d'origine anthropique sont fréquemment associés à l'agriculture et aux traitements des eaux usées. Une exposition prolongée à des concentrations élevées en nitrites-nitrates peut entraîner des dommages sur la santé, dont la méthémoglobinémie (Santé Canada, 2014). Sur le territoire les valeurs de dépassements relevés pour ce paramètre s'échelonnent entre 10 et 17 mg/l. Dans le Bas-Saint-Laurent, l'aire de captage de certaine municipalité se situe en zone agricole. À l'intérieur de ces aires, les pratiques agricoles sont règlementées pour limiter les risques de contamination des sources d'eau. Malgré ces règlementations, des concentrations élevées de nitrates sont sporadiquement mesurées dans des piézomètres d'observation. L'équipe du PACES-NEBSL, en collaboration avec l'entreprise Terre Eau Inc. s'est intéressée à cette problématique dans le cadre du projet de maîtrise d'Éric Filion, récipiendaire d'une Bourse de maîtrise en milieu pratique (BMP) co-financé par le CRSNG et le FQRNT (section 7.2).

Deux dépassements concernant l'arsenic ont été relevés, dont un dans un piézomètre installé dans le cadre du PACES-NEBSL. Ce piézomètre est situé à Saint-Mathieu-de-Rioux et est installé dans une nappe semi-captive granulaire et contient neuf fois la CMA d'arsenic. Dans ce piézomètre, les analyses ont aussi révélées des dépassements en baryum, antimoine, fluorures, aluminium, fer et manganèse. Après avoir discuté avec le propriétaire du terrain, l'équipe du PACES-NEBSL a su que le terrain en question a déjà servi de dépotoir privé pour la famille qui habitait la ferme il y a de nombreuses années. Il est donc probable qu'une contamination anthropique soit à l'origine de tous ces dépassements. Le deuxième puits appartient à un particulier. Il capte l'aquifère rocheux en condition de nappe libre, à 143 m de profondeur, et le type d'eau qui y est associé est chloruré-sodique, donc une eau assez évoluée et minéralisée. Le dépassement est de 1,6 fois la limite permise. De plus, aucune activité autour du puits ne laisse croire à une contamination d'origine anthropique, on peut supposer que la présence d'arsenic dans ce puits serait d'origine naturelle.

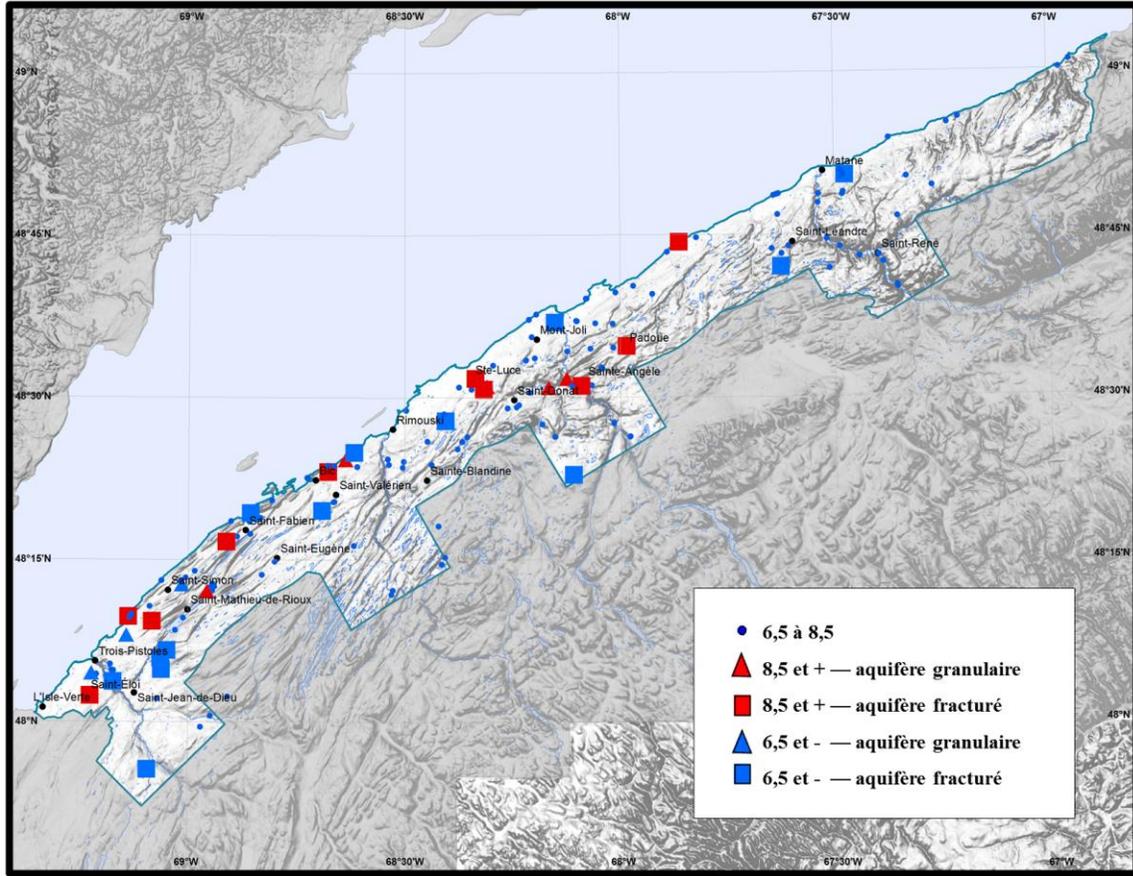


Figure 6.1. Distribution spatiale des dépassements liés au pH.

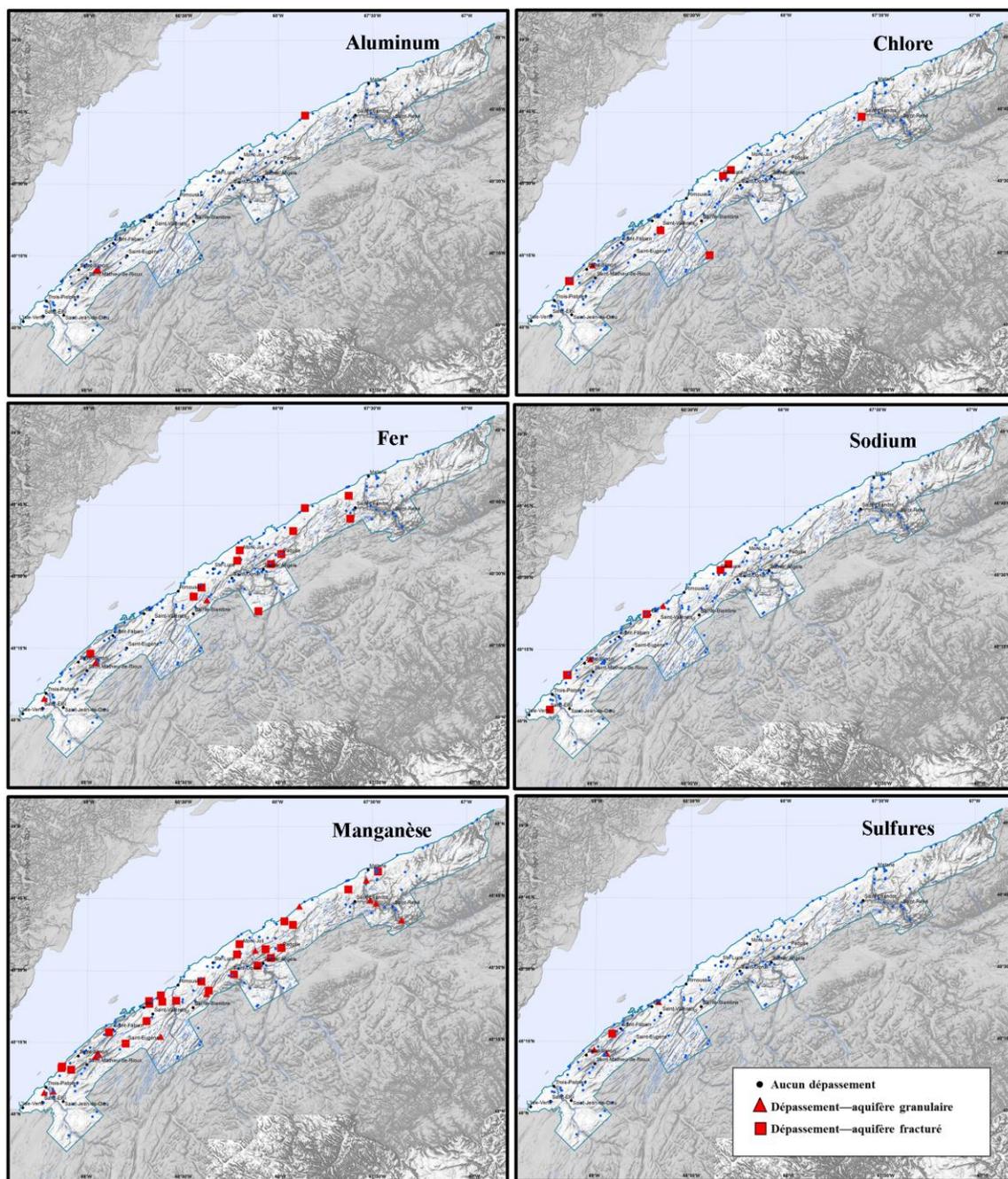


Figure 6.2. Distribution spatiale des dépassements liés aux objectifs esthétiques.

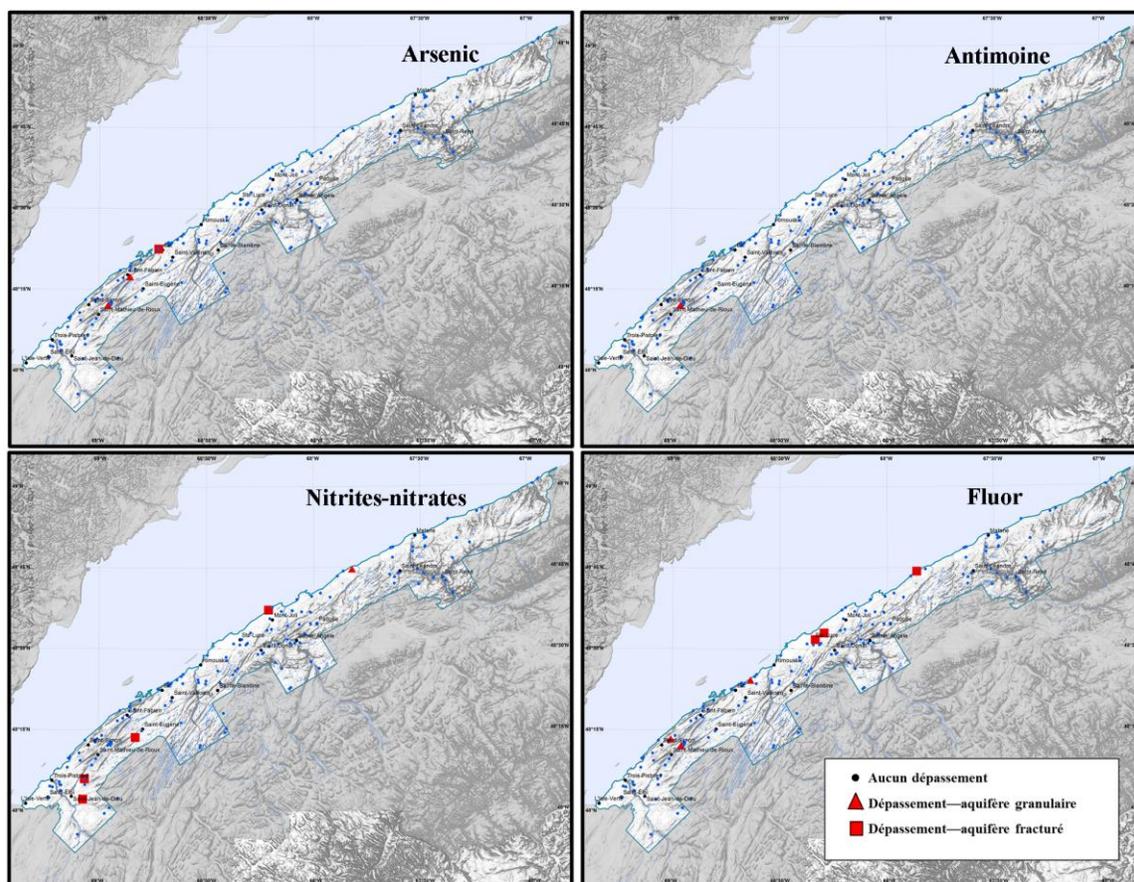


Figure 6.3. Distribution spatiale des dépassements liés aux concentrations maximales acceptables.

6.3 Activités anthropiques potentiellement polluantes

Les activités anthropiques représentent une source de contamination potentielle des aquifères. Le livrable no. 23 recense les activités pouvant potentiellement exercer une pression sur la qualité de la ressource eau souterraine du territoire à l'étude. Cette pression peut être exacerbée par la nature et la densité de ces activités anthropiques dans un espace donné.

Les données nécessaires à la production du livrable proviennent en grande partie du MAMOT qui nous a fourni la base de données des codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) (MAMOT, 2010) contenant une liste exhaustive des activités anthropiques pouvant contaminer les eaux souterraines. À cette liste s'ajoutent des informations provenant de la base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT), du répertoire des dépôts et des terrains contaminés du MDDELCC et de l'information ponctuelle inventoriée et fournie par l'OBVNEBSL et les MRC. Ces activités ont été regroupées en 16 catégories, dont les 13 présentes sur le territoire du PACES-NEBSL sont énumérées ci-après :

- Agriculture, exploitation forestière et services connexes
- Installation septique
- Assainissement et gestion des déchets
- Extraction des substances minérales de surface et activité minière non-métallique
- Fabrication de produits minéraux non-métalliques
- Fabrication réparation et maintenance du matériel de transport
- Golf
- Industrie chimique
- Industrie de la transformation et utilisation des métaux, fabrication de machinerie et d'équipement industriels
- Production et distribution d'électricité et de produits pétroliers
- Raffinage et transformation de sous-produits pétroliers
- Transport, entreposage ou utilisation de sous-produits pétroliers.

Le risque de contamination potentielle est établi selon le système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) pour chaque type d'activité énumérée dans le CUBF. Ce risque est fonction de quatre facteurs : la toxicité, la quantité et la récurrence de contaminants ainsi que la zone d'impact de l'activité. Le risque lié à l'activité se décline sur une échelle pondérée de 7 à 48 comprenant quatre classes : faible, modéré, élevé et très élevé.

Pour ce livrable, deux indices ont été calculés :

- indice concernant les sources de contamination potentielle ponctuelles.
- indice concernant les sources de contamination potentielles diffuses.

Il a été décidé de représenter de manière régionale la pression générée par les différentes activités en tenant compte de la densité de ces dernières sur le territoire et de ne pas représenter les activités potentiellement polluantes de manière individuelle. Ce choix fut fait pour des raisons de confidentialité et pour tenir compte des incertitudes qui subsistent quant à l'exactitude des données concernant ces activités.

Le premier indice présenté sur la carte 23A concerne toutes les activités anthropiques ayant un potentiel polluant ponctuel (industrie alimentaire, dépotoir, station-service, pâte et papier, ...). Les activités agricoles et les routes ont été exclues car elles ont un potentiel de contamination diffuse sur l'aquifère. Les fosses septiques ont également été exclues car elles possèdent un potentiel de contamination trop local pour être représenté à une échelle régionale. Cet indice représente la densité des activités anthropiques pondérée en fonction du risque potentiel de contamination lié à cette activité. Il est important de mentionner que cet indice doit être utilisé à titre indicatif seulement. Avant d'entreprendre des démarches pour juger ou non du potentiel contaminant d'une activité sur un secteur, il est essentiel de valider le type d'activité ainsi que la vulnérabilité de l'aquifère calculée à l'aide de l'indice DRASTIC (section 5.4).

On remarque une corrélation entre le niveau de l'indice et la densité de population. Les endroits les plus peuplés étant ceux où l'on retrouve le plus grand nombre d'activités susceptibles de contaminer l'eau souterraine (zones portuaires, industries de pâte et papier, industrie de transformation alimentaire, de gestion des déchets, etc.). Aussi, il est intéressant de noter que ces zones correspondent aux endroits où l'indice DRASTIC est le plus faible.

Le second indice a été calculé pour les sources de contaminants d'origine diffuse, donc principalement pour les activités agricoles qui sont, comme on peut le remarquer sur la carte 23B, assez répandues sur l'ensemble du territoire. La densité de fermes sur le territoire varie de 0 à 2,7 fermes par km². Les fermes sont principalement concentrées dans la partie nord du territoire en bordure du fleuve où les sols sont les plus fertiles. La plus forte concentration en fermes se trouve entre l'Isle-Verte et Baie-des-Sables. Les Hautes-Terres et l'extrême Est du territoire, qui sont des zones plus forestières, avec des sols peu épais, sont moins propices à l'agriculture.

6.4 Gestion durable de la ressource

Les eaux souterraines, de par leur caractère unique, requièrent une gestion particulière et différente de celle attribuée aux eaux de surface. Les principes de gestions des aquifères s'appuient généralement sur une bonne connaissance de la ressource sur le plan 1) de la vulnérabilité aux contaminations potentielles d'origines naturelles et anthropiques, 2) de la spatialisation et des taux de la recharge et 3) du comportement hydrodynamique de l'aquifère (Custodio et Bruggeman, 1987). Le Conseil des Académies Canadiennes (CAC), dans son rapport sur *La gestion durable des eaux souterraines au Canada* (2009) relève qu'au Canada, les connaissances en termes de quantité, qualité et vulnérabilité de la ressource sont pratiquement inexistantes. Le CAC propose alors cinq objectifs pour atteindre la gestion durable de la ressource afin d'en assurer la pérennité (CAC, 2009). Ces objectifs définis par le CAC, interdépendants les uns des autres, sont représentés sous la forme d'un pentagramme à la **Figure 6.4**.

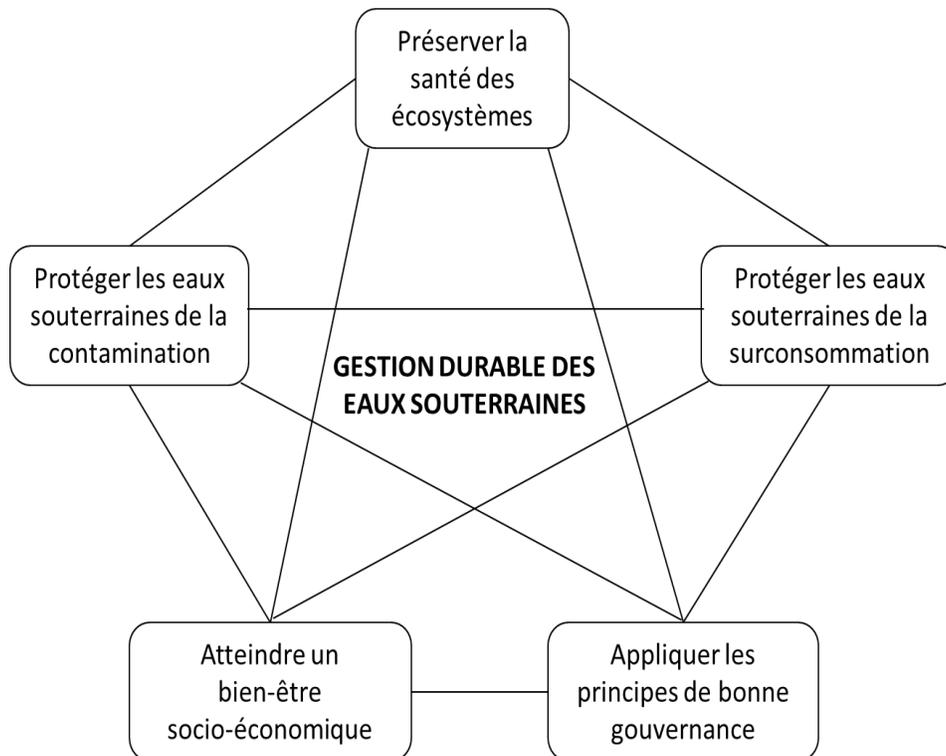


Figure 6.4. Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines (Conseil des Académies Canadiennes, 2009)

Le CAC propose aussi l'acquisition d'une série de connaissances scientifiques, nécessaires à une prise de décision éclairée pour la gestion durable de l'eau souterraine. Ces connaissances concernent la mise en place et la gestion d'une base de données, la géologie, le régime hydrogéologique et l'utilisation ou la création d'un modèle des eaux souterraines. Les objectifs et les nombreux livrables associés aux PACES répondent en grande partie aux objectifs et au besoin de connaissances défini par le CAC, par exemple la mise sur pied d'une base de données en lien avec l'hydrogéologie, la géochimie et la stratigraphie, l'acquisition de données concernant la géologie du roc et des dépôts meubles, les propriétés hydrauliques des aquifères granulaires et rocheux, la géochimie, la piézométrie, le calcul et la spatialisation de la recharge, l'utilisation des aquifères et le calcul de l'indice de vulnérabilité des aquifères. L'acquisition de ces connaissances permet d'établir un portrait de la qualité, de la quantité et de la vulnérabilité des aquifères dans le but de développer une gestion durable de la ressource.

Le CAC mentionne aussi deux autres objectifs : 1) atteindre un bien-être socio-économique, ce qui signifie que la manière d'exploiter la ressource et la quantité qui est exploitée doivent tenir compte du milieu social et économique qui l'entoure; 2) appliquer les principes de bonne gouvernance, ce qui implique que les connaissances acquises par le milieu scientifique doivent être correctement transmises (dans un principe de développement durable) aux gestionnaires et aux utilisateurs de la ressource. Ces deux derniers objectifs sont, en partie, pris en compte dans

les projets PACES. En ce sens, au Bas-Saint-Laurent, des partenariats ont été initiés entre l'équipe du PACES-NEBSL et les gestionnaires de la ressource ainsi qu'avec des organismes locaux comme l'OBVNEBSL et le comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire. Ces partenariats ont permis la mise en place de rencontres d'informations non seulement sur les objectifs et livrables du projet, mais aussi, plus spécifiquement sur le fonctionnement des aquifères et sur l'intégration des résultats PACES dans les activités de gestion du territoire. Une autre série de rencontres est prévue au printemps 2015 dans le but de transférer les connaissances acquises durant le PACES-NEBSL aux utilisateurs régionaux. Ces rencontres visent principalement les municipalités et les MRC, lesquelles ont le mandat de la gestion des eaux souterraines ainsi que la mise en application du nouveau *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection*.

Le défi qui attend le nord-est du Bas-Saint-Laurent pour atteindre une gestion durable de ses eaux souterraines est, d'une part, de faire un transfert adéquat des connaissances acquises durant le PACES-NEBSL aux gestionnaires et utilisateurs de la ressource dans les municipalités et MRC concernées et, d'autre part, d'intégrer et d'utiliser ces connaissances au sein même des organismes et des plans de gestion

7 AVANCÉE DES PROJETS DE MAITRISE

7.1 Dynamique hydrogéologique de flèches littorales : exemple du marais de Cap Marteau, Notre-Dame-Des-Neiges, estuaire du Saint-Laurent, Québec

Hélène Cocheril, étudiante à la maîtrise en géographie à l'Université du Québec à Rimouski
Direction : Gwenaëlle Chaillou, UQAR et Pascal Bernatchez, UQAR

Introduction

Ce projet de maîtrise se réalise dans le cadre du projet PACES-NEBSL qui a pour but de dresser un portrait de la ressource en eau souterraine tant au niveau de sa quantité, de sa qualité que de sa vulnérabilité. Ainsi, mon mémoire de maîtrise s'inscrit dans la connaissance et la compréhension d'un aquifère en milieu côtier et plus précisément dans un corps sédimentaires.

Les corps sédimentaires côtiers sont des aquifères aux dynamiques hydrogéologiques particulières puisqu'ils se situent à l'interface continent-océan (Grootjans et al. 1991, Grootjans et al. 1996, Ferguson et al. 2012). Ils représentent des zones de recharge d'eau souterraine ainsi que des réserves d'eau douce du fait de leurs caractéristiques morphologique et d'infiltration (Vouillamoz et al. 2012, Robins et al. 2013, Stratford et al. 2013). Dans certains endroits du globe, ils forment la seule source d'approvisionnement en eau (Vouillamoz et al. 2012). Au Canada comme au Québec, le cadre bâti s'est fortement développé sur ce type de corps sédimentaires, mais leurs caractéristiques hydrogéologiques sont méconnues (Comte et Banton, 2003, Vouillamoz et al. 2012). Jusqu'à aujourd'hui peu d'études se sont portées sur ces formations aquifères côtières en milieu nordique et aucune ne s'est intéressée à leur dynamique hydrologique annuelle. Ce projet vise donc à documenter la dynamique hydrogéologique de flèches littorales situées dans le marais maritime de Cap Marteau à Notre-Dame-des-Neiges, près de Trois-Pistoles, sur la rive Sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent au Québec.

Pour ce faire, deux objectifs ont été fixés : 1) comprendre la dynamique géomorphologique d'abord en retraçant l'évolution historique des flèches littorales puis en évaluant leur potentiel aquifère et 2) rendre compte de la dynamique hydrogéologique annuelle de ces corps sédimentaires sur différentes échelles temporelles: selon les cycles de marée et selon les saisons.

Méthodologie

Aire d'étude

Le marais du Cap Marteau est situé sur le territoire de Notre-Dame-des-Neiges, à environ 55 km à l'Ouest de Rimouski (**Figure 7.1**). Il est localisé dans l'anse des Rioux sur la rive Sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Au pied d'une falaise morte, il repose sur des argiles glacio-

marines mises en place par la mer de Goldthwait lors de la dernière déglaciation débutée vers 18 000 ans BP. Ce marais privé de 34 ha culmine à une hauteur maximum de 5,6 m d'altitude et est abrité par une flèche littorale active longue d'environ 600 m (**Figure 7.1**). Il présente aussi deux paléo-flèches. Probablement apparues successivement, ces trois flèches ont permis le développement d'une sédimentation et par là même la formation du marais. Le phénomène de sédimentation est aussi renforcé par son exposition Sud-Est qui l'abrite des vents dominants de l'Ouest.

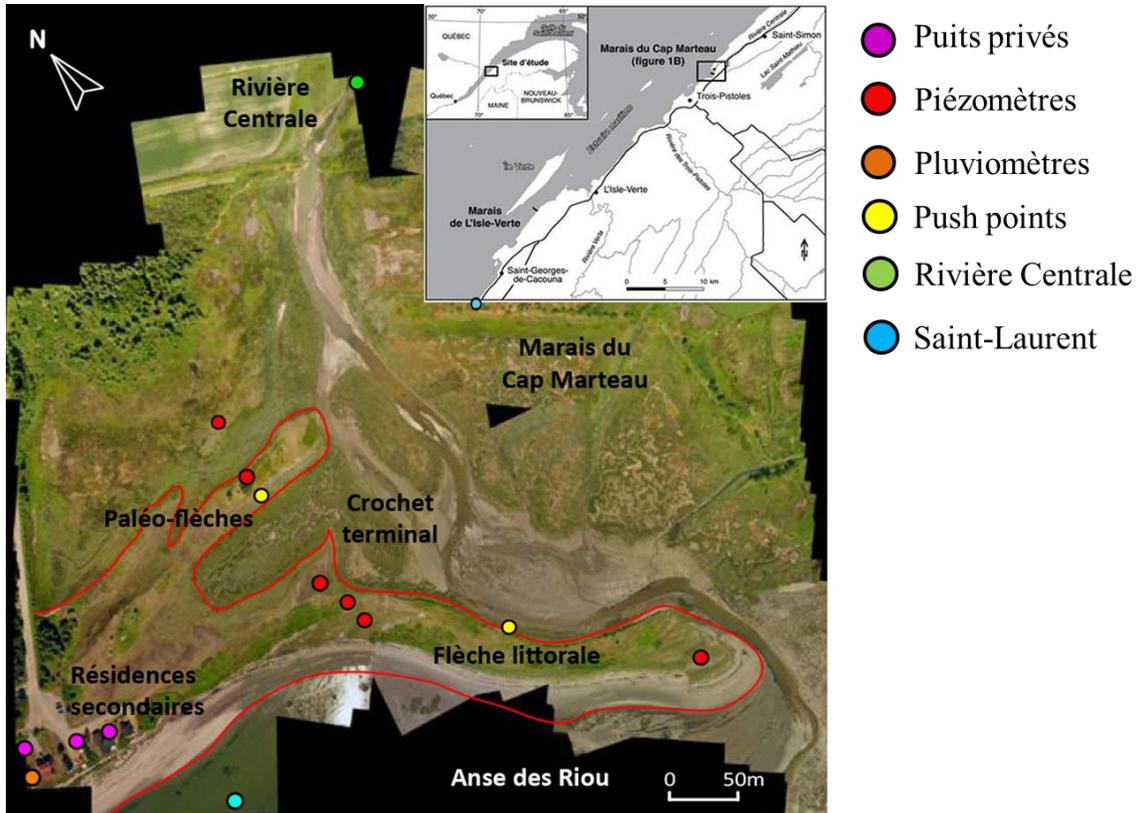


Figure 7.1. Marais du Cap Marteau, localisation et positionnement des échantillonnages d'eau pour les isotopes stables et les paramètres physico-chimiques

Analyse de la dynamique géomorphologique

Pour répondre au premier objectif fixé, un travail de cartographie est d'abord effectué à l'aide du logiciel ArcGIS. Pour retracer l'évolution historique des flèches littorales et comprendre l'histoire du marais, l'analyse de photographies aériennes de 1924, 1963, 1985, 1990, 2001, 2012 et une mosaïque du marais prises par un drone en 2013 sera faite. Pour tracer la limite du corps sédimentaire, la limite retenue est la celle des argiles glacio-marines sur lesquelles reposent les flèches et le sable qui les compose. Ce travail d'évolution historique sera complété par de la datation. Des échantillons prélevés à la base des flèches seront analysés pour des datations AMS au ^{14}C . Les datations sont effectuées à partir des racines et des coquillages contenus dans les

prélèvements. Ils permettront d'affiner et de compléter la chronologie de la formation de la flèche active et des deux paléo-flèches.

Afin de déterminer le volume d'eau retenu dans les flèches, l'imagerie Lidar de 2012 du secteur étudié est utilisée afin de délimiter la surface du corps sédimentaire. Ainsi, en connaissant la hauteur piézométrique moyenne, il est possible de calculer le volume d'eau moyen des flèches et ainsi estimer le nombre de personnes pouvant être alimenté par cette nappe d'eau douce. Enfin, un géoradar sera employé pour connaître l'étendue et la morphologie de la lentille d'eau et savoir si le corps sédimentaire en renferme une ou plusieurs lentilles d'eau douce. Il sera effectué pendant la campagne terrain de l'hiver 2015.

Analyse de la dynamique hydrogéologique

Si l'analyse géomorphologique s'est effectuée essentiellement à partir de données numériques déjà acquise par l'UQAR, cette partie requiert plusieurs campagnes de terrain. Durant la campagne de l'automne 2014, cinq piézomètres comportant des capteurs de pression de pression Hobo U20 ont été mis en place : trois dans la flèche active et un dans chacune des paléo-flèches (**Figure 7.1**). Ils sont positionnés sur un transect allant de la ligne de rivage au fond du marais et recueillent les niveaux de la lentille d'eau et la température toutes les 15 minutes. Une autre sonde mesurant la pression de l'atmosphère est aussi installée sur le terrain pour la compensation atmosphérique des niveaux piézométriques. Ces données sont prélevées tous les trois-quatre mois et analysées via les logiciels Matlab et R. Ces traitements permettent entre autre de corriger les niveaux piézométriques de l'influence des marées diurnes et mensuelles pour en ressortir le comportement annuel du niveau piézométrique dans les flèches littorales. Des échantillons d'eau souterraine et de surface ont aussi été prélevés pour connaître la signature isotopique de l'eau contenue dans les corps sédimentaires et ainsi faire une estimation du temps de recharge et de renouvellement de la nappe d'eau. Les prélèvements sont faits dans les piézomètres, dans les puits privés des résidences sur la flèche, en amont dans la rivière Centrale, dans le Saint-Laurent au niveau de l'anse des Rioux, dans un pluviomètre installé sur le marais, et dans le marais en hiver pour récupérer les précipitations solides. L'eau est pompée en continu par une pompe péristaltique et les paramètres physico-chimiques (Température, Conductivité, pH, saturation en oxygène dissous) sont suivis en continu. Lorsque ces paramètres se stabilisent, les échantillons d'eau sont collectés. Les échanges entre eau douce et eau de surface sont aussi suivis dans la zone de décharge à l'aide de petits piézomètres manuels appelés piézomètres pushpoints (**Figure 7.2**). Cet échantillonnage se fait sur des cycles de 12 heures pour suivre l'effet de mélange lié à la marée diurne et semi-diurne. Tous ces échantillons d'eau sont analysés au département du GÉOTOP de l'UQAM par un spectromètre de masse pour obtenir les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$. Ces résultats vont permettre de mieux connaître l'origine de l'eau contenue dans les flèches, mais aussi de mieux estimer les mélanges entre l'eau souterraine et les eaux de surface à l'échelle tidale et saisonnière.

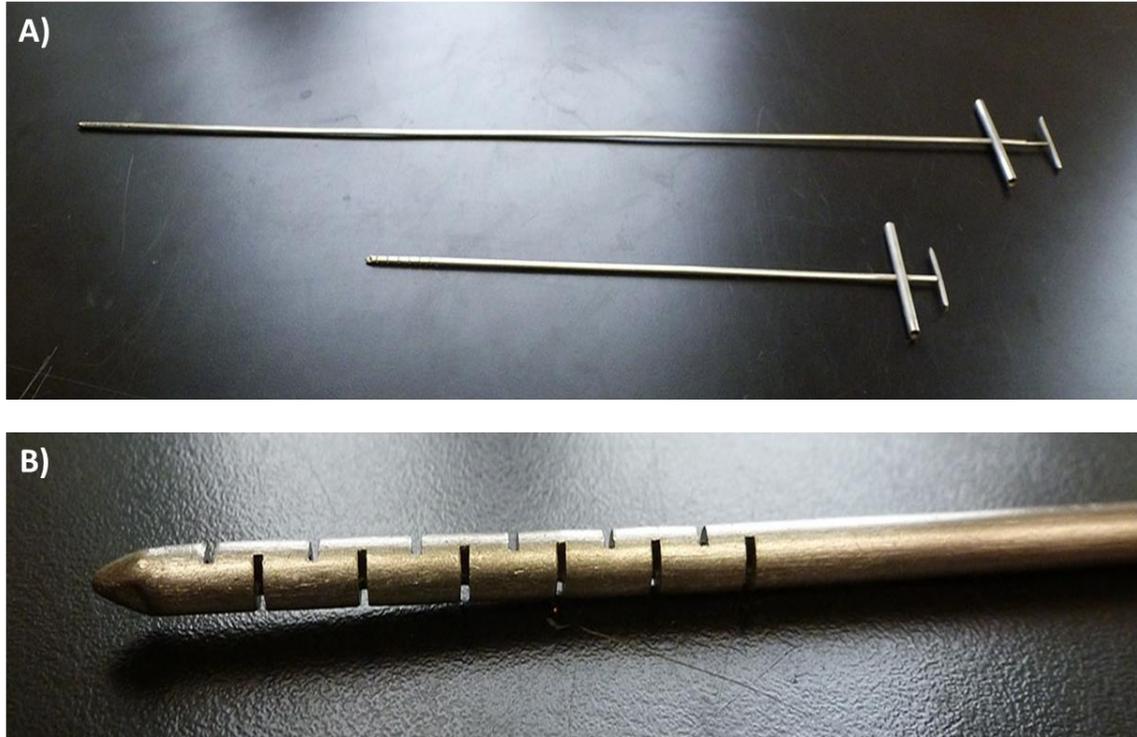


Figure 7.2 : a) Pushpoint de 50 cm en haut et de 30 cm en bas; b) Zoom sur l'extrémité crépiné du pushpoint.

Résultats préliminaires

L'évolution historique des flèches littorales du marais de Cap Marteau montre un milieu aux très fortes dynamiques (**Figure 7.3**). La flèche active s'est allongée de 150m entre les années 1924 et 2013, soit une vitesse moyenne d'accroissement d'environ 1,68m / an. Elle s'est surtout allongée sur l'extrémité libre de la flèche. Si le coté plage a été lui aussi très actif durant cette période du fait de la dérive littorale et des courants, l'intérieur du marais a été plus stable. En effet, les paléo-flèches n'ont que très peu évolué à l'exception de la paléo-flèche centrale qui a été érodée par la rivière Centrale entre 1924 et 1963.

Les premiers relevés des données piézométriques (**Figure 7.4**) montrent globalement un profil semblable. Cependant, il semble apparaître que CM2 soit influencé par la rivière tant que celle-ci ne gèle pas.

Évolution historique des flèches littorales du marais de Cap Marteau

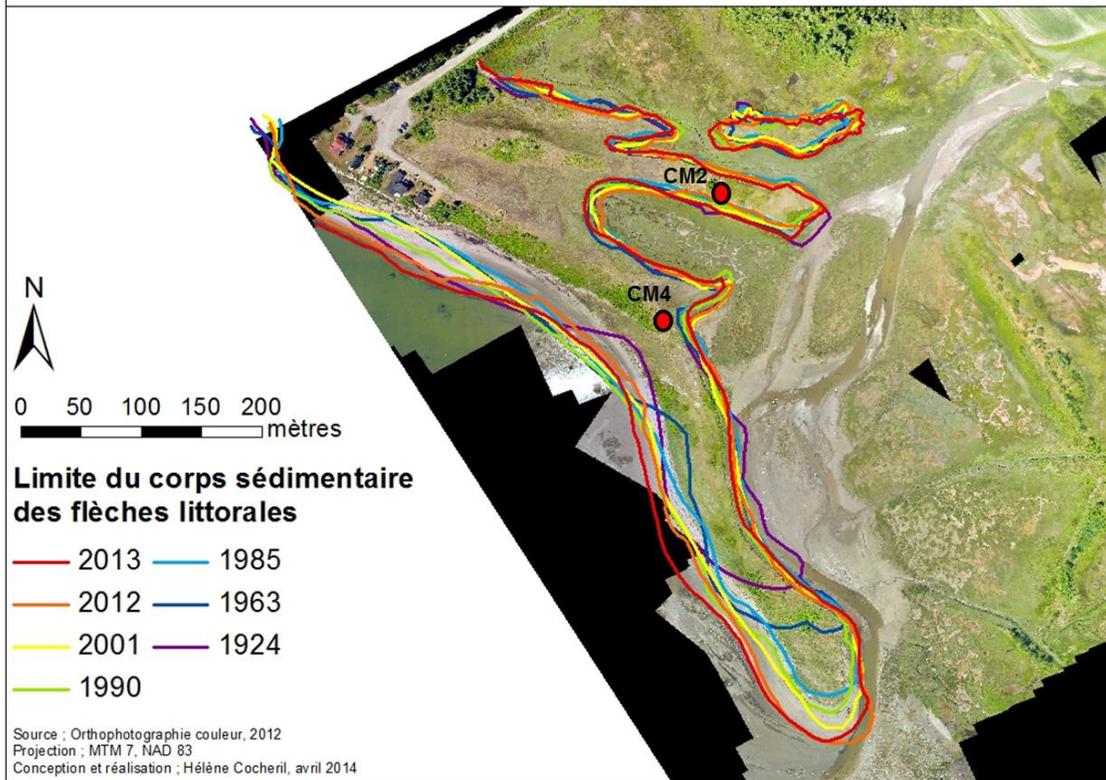


Figure 7.3 : Carte de l'évolution des flèches du marais de Cap Marteau entre 1924 et 2013. Les points rouges représentent le positionnement des piézomètres dont les données ont été extraites cet hiver

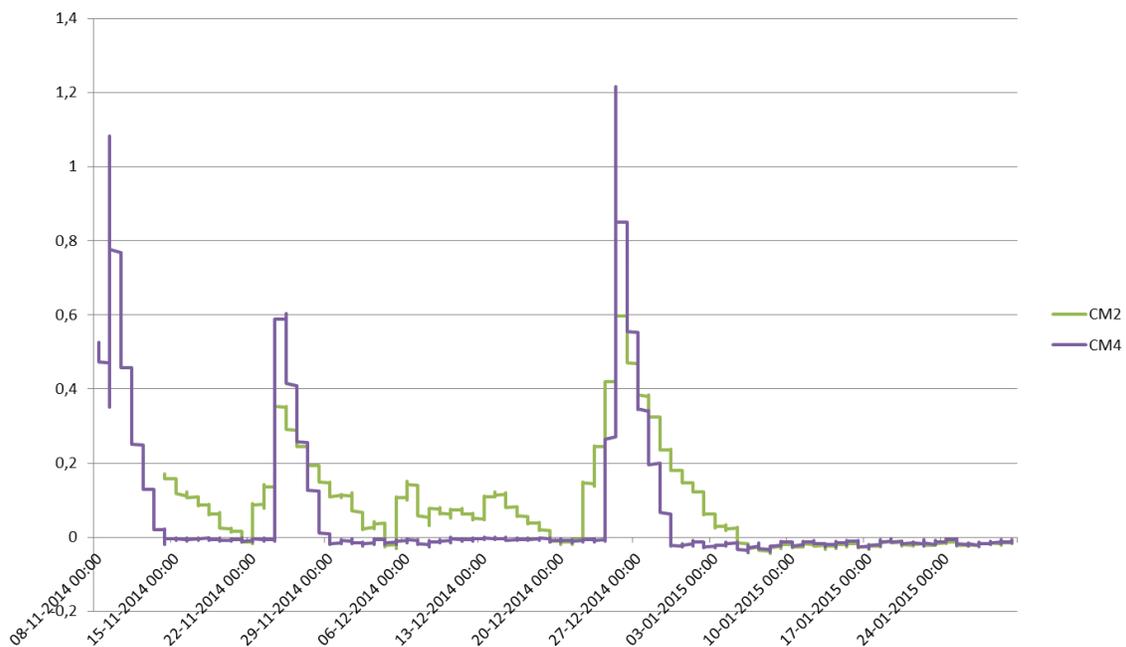


Figure 7.4: Relevé HOBOTM® pour les piézomètres CM2 et CM4 entre novembre 2014 et janvier 2015

Conclusion

L'évolution géomorphologique du marais de Cap Marteau montre qu'il est en permanence soumis aux dynamiques côtières, mais aussi fluviales en sa partie intérieure. Ces dynamiques ont des répercussions autant sur la morphologie des flèches que sur celle de la lentille d'eau et ainsi, sur le volume d'eau douce que peut contenir ces corps sédimentaires. Sur un laps de temps plus court, au niveau hydrogéologique, ces mêmes dynamiques ressortent : l'influence des marées sur l'ensemble du marais et l'influence de la rivière pour les paléo-flèches qui s'annule pendant la période hivernale. Ainsi, reste à confirmer si la connectivité de l'eau entre l'eau souterraine et l'eau de surface est interrompue durant la période hivernale par le développement du pied de glace et si la propagation de l'onde de marée se fait de manière identique en été et en hiver.

7.2 Cycle de l'azote : contribuer à une meilleure compréhension de la connectivité entre les eaux souterraines et les activités de surfaces en milieu agricole

Éric Filion, étudiant à la maîtrise en géographie à l'Université du Québec à Rimouski

Direction : Gwenaëlle Chaillou, UQAR et Richard Saint-Louis, UQAR

Lien du projet de maîtrise avec le PACES-NEBSL

Ce projet de maîtrise entre dans le volet « hydrogéologie et vulnérabilité des eaux souterraines » du PACES-NEBSL et s'intéresse à la préservation et au maintien de la qualité des nappes phréatiques. Il se déroule en partenariat avec la Compagnie Terre Eau Inc., une compagnie en agro-environnement et agro-conseil, dans le cadre d'un programme BMP co-financé par le CRSNG et le FRQNT.

Introduction

L'azote est un nutriment essentiel à la production et à la croissance végétale et il est utilisé mondialement comme fertilisant dans le domaine de l'agriculture pour améliorer la productivité. Cependant, quand l'application de fertilisant excède la demande et la capacité du sol à dénitrifier, l'excès d'azote migre vers l'aquifère, généralement sous forme de nitrate (NO_3^-), une espèce azotée fortement mobile et avec une faible capacité d'absorption. Des concentrations trop élevées dans l'eau potable peuvent être la cause de méthémoglobinémie chez le nourrisson et de cancer gastrique chez l'adulte (Institut de la santé publique du Québec, 2003). C'est pourquoi les normes au Québec limitent la concentration de nitrate (et nitrite) à 10 mg N- NO_3+NO_2 /L. Les activités agricoles sont probablement les plus importantes sources anthropiques de contamination de nitrate dans les eaux souterraines en Amérique du Nord (Primeau et Grimard, 1989) et leurs fortes présences dans l'eau seraient directement liées aux activités humaines (Institut de la santé publique du Québec, 2003). Plusieurs études indiquent l'existence d'un lien étroit entre l'agriculture intensive et les quantités importantes de nitrates dans l'eau souterraine (Primeau et Grimard, 1989 ; Bergstrom et Jarvis, 1991 ; Andrews et al. 1997 ; Lasserre et al. 1999; Sidd, 2003).

Au Québec, la contamination des aquifères par les nitrates constitue une problématique majeure pour l'environnement et pour la santé humaine, puisque près de 23 % de la population, dont une large majorité de la population rurale, s'approvisionne à partir des nappes phréatiques (MENV 2004).

Quantifier, caractériser et identifier ces sources de contamination devient donc essentiel afin de minimiser la charge en azote. Cependant, les interactions entre les pratiques locales de surface, la dynamique de l'azote dans le sol, la recharge de l'aquifère, les conditions hydro climatiques, les

caractéristiques pédologiques et géologiques intrinsèques au sol et à l'aquifère sous-jacent sont complexes et rendent difficiles une quantification précise du lessivage des nitrates vers les eaux souterraines.

Plusieurs réglementations sont établies par le gouvernement québécois afin de préserver la qualité des nappes d'eaux souterraines. Entré en vigueur le 14 août 2014, le nouveau règlement sur le prélèvement des eaux et leurs protections (RPEP) comporte une série de mesures visant à renforcer la qualité des eaux québécoises. Remplaçant l'ancien règlement sur le captage des eaux souterraines (RCES), le RPEP vise une protection accrue des nappes phréatiques faces aux activités agricoles. En effet, pour chaque responsable de puits de catégorie de type 1 (alimentant 500 personnes et plus), un rapport d'analyse quinquennal sur la vulnérabilité de la source d'eau est désormais exigé. Ce document doit contenir plusieurs renseignements, dont une évaluation des menaces que représentent les activités anthropiques sur la nappe d'eau phréatique.

En fonction de la vulnérabilité de la nappe d'eau souterraine établie par l'indice DRASTIC, plusieurs restrictions et interdictions agricoles peuvent s'appliquer sur les aires de protection bactériologique et virologique de la zone de captation d'eau. Outre l'indice DRASTIC, les concentrations en nitrates observées dans les ouvrages de captation régissent également plusieurs dispositions agricoles. Lorsque le seuil de 10mg/L est enregistré à deux reprises ou plus sur une période de deux ans, l'épandage de déjections animales, de compost de ferme et de matières résiduelles fertilisantes est interdit dans l'aire bactériologique et virologique du puits. Puisque les fertilisants sont essentiels aux rendements des cultures, de telles mesures peuvent avoir des impacts économiques majeurs.

Située dans une zone agricole, l'aire de captation en eau potable de la municipalité de Sainte-Luce est relativement vulnérable (Mission HGE, 2007). Depuis 2008, les concentrations en nitrate mesurées dans les ouvrages de captage ont montré des valeurs inquiétantes, frôlant parfois le seuil de 10 mg/L. L'origine et la dynamique de ces importantes concentrations ne sont pas déterminées, mais pourraient résulter des pratiques agricoles.

Les charges en nitrates peuvent être diminuées en adoptant de saines pratiques agricoles (MAPAQ 2005). En 2002, le ministère de l'Environnement du Québec a adopté *le Règlement sur les exploitations agricoles*, obligeant désormais les agriculteurs à établir un plan agroenvironnemental de Fertilisation (PAEF). Ce règlement favorise l'application de pratiques agroenvironnementales, jumelant productivité agricole et protection de l'environnement. Plusieurs amendements, dont la chaux (pour augmenter le pH) et la matière organique (pour capter l'azote), peuvent être appliqués aux sols afin de réduire le lessivage des nitrates.

De par ces propriétés basiques, la chaux est utilisée dans les champs afin de rehausser le pH du sol. En raison des pluies acides, un déséquilibre de la fourniture minérale du sol peut être observé et créer un impact négatif sur la croissance de la plante (Frank et Stuanes, 2003). Les

amendements en carbonates sont généralement utilisés pour contrecarrer cette acidification. Un amendement en carbonate serait donc bénéfique sur les valeurs nutritives du sol, tel qu'observé dans Mijangus et al. (2010).

La matière organique a un impact important sur la dynamique du sol puisqu'elle joue un rôle essentiel sur l'apport nutritif aux plantes et sur la fertilité des sols puisqu'elle possède des effets indirects sur l'activité microbienne et sur la disponibilité des nutriments (Kelley et Stevenson, 1995). De plus, près du tiers du fertilisant azoté serait immobilisé par la matière organique du sol, sous une forme non assimilable par les plantes et non lessivable (Kelley et Stevenson, 1995). Le maintien d'un taux de matière organique élevé diminuerait donc le risque de lessivage de l'azote vers la nappe sous-jacente.

Essentielle pour la croissance des plantes, l'azote minéral fluctue naturellement en réponse aux saisons et aux conditions hydrologiques d'une région (Wong et Nortcliff, 1995; Kelley et al. 2013). C'est pourquoi les amendements en fertilisants azotés doivent prendre en considération plusieurs facteurs (taux de minéralisation de la matière organique, processus de nitrification/dénitrification, caractéristiques édaphiques du sol, etc). L'ensemble de ces paramètres permet de déterminer adéquatement la quantité de fertilisants azotés nécessaire pour la croissance optimale de la plante. Une mauvaise compréhension du terrain d'étude peut entraîner des utilisations inappropriées des fertilisants azotés, augmentant le risque de perte vers l'environnement. (Wong et Nortcliff, 1995)

Objectifs du projet

L'objectif général du projet est de documenter la connectivité entre les activités agricoles de surface et les teneurs en azote de l'eau souterraine dans le cas de la zone de captation agricole de la municipalité de Sainte-Luce. Plus spécifiquement, le projet vise à 1) documenter le bilan de l'azote dans les sols en établissant des bilans azotés saisonniers et 2) expérimenter des techniques d'amendement (chaux et matière organique) au sol qui aideraient à la fixation des nitrates et donc limiteraient le lessivage des nitrates vers la nappe sous-jacente.

Terrain d'étude

Contexte hydrogéologique et géomorphologique de la région

La municipalité de Sainte-Luce se situe dans la MRC Mitis (**Figure 7.5**). Comme 60 % de la population du Bas-Saint-Laurent, la municipalité de Sainte-Luce s'approvisionne à partir de l'eau souterraine. L'aire de captation se situe sur un delta fluvioglaciaire et la **Figure 7.6** présente une interprétation géomorphologique d'un relevé Lidar de la zone d'étude et la localisation du site d'étude sur l'ensemble de l'air d'alimentation des galeries de captage de la municipalité de Sainte-Luce.

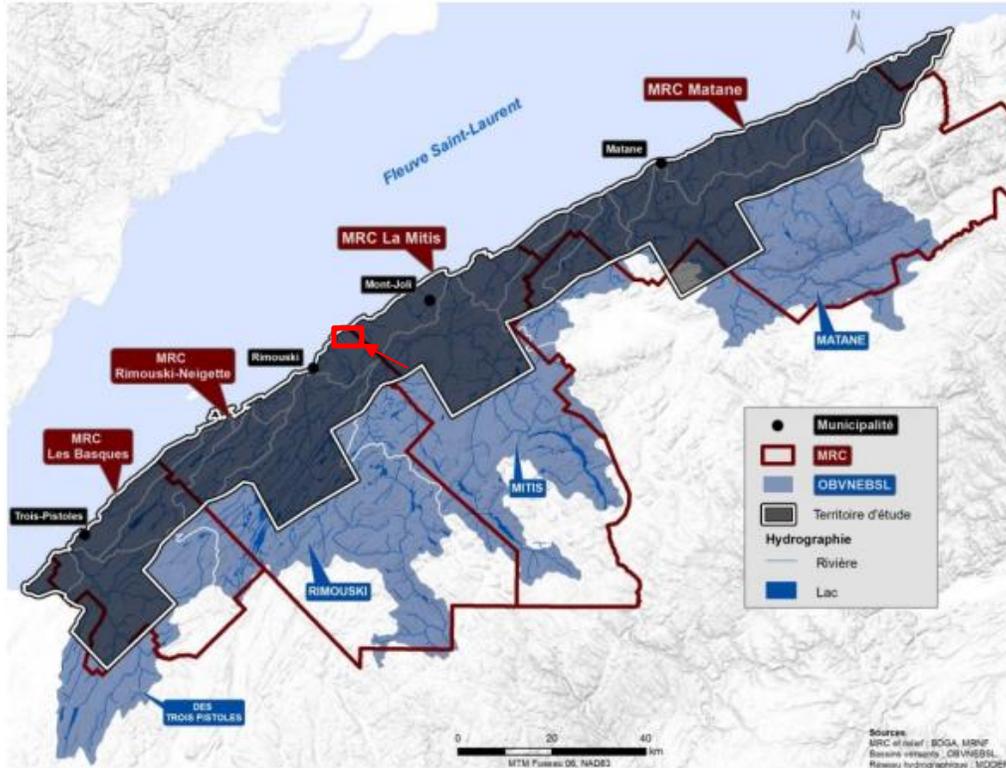


Figure 7.5 : Localisation de la municipalité de Sainte-Luce

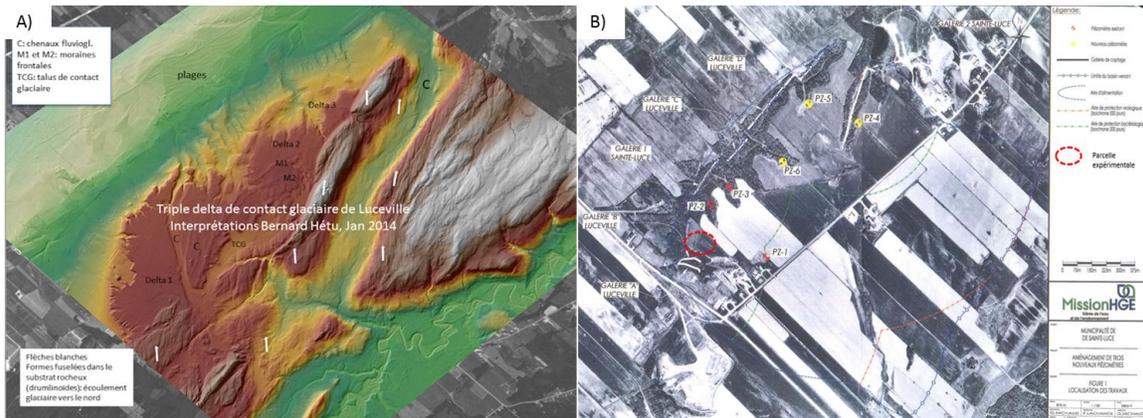


Figure 7.6 : A) Interprétation géomorphologique de la région de Sainte-Luce (interprétation faite par Bernard Hétu, janvier 2015). B) Localisation du site d'étude dans l'aire d'alimentation des galeries de captage de Sainte-Luce (tirée et modifiée de Mission HGE, 2007).

Composé de sable et gravier, cet important delta fluvio-glaciaire a une épaisseur de plus de 20 mètres de dépôts. La nappe d'eau est située à une profondeur de ~17 mètres sous la surface.

L'absence d'argile marine recouvrant l'imposant corps sédimentaire fait en sorte que cet environnement constitue un aquifère granulaire en condition de nappe libre. L'indice DRASTIC de l'aquifère granulaire se situe entre 118 et 138 (tout dépendamment de la position des ouvrages de captation) (Mission HGE, 2007), ce qui indique que la nappe d'eau a une vulnérabilité moyenne. Une coupe stratigraphique du secteur Sainte-Luce et Luceville tirée de Dion et Miranda (1978) et modifiée est illustrée à la **Figure 7.7**.

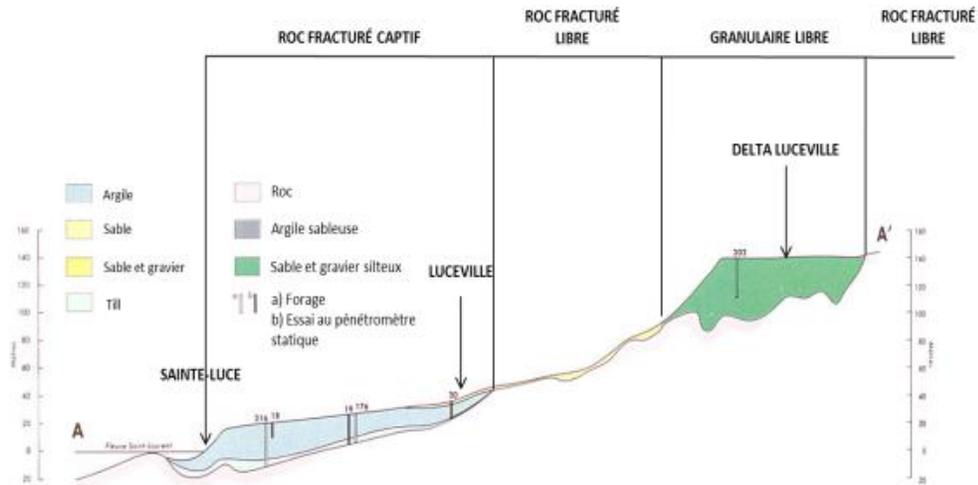


Figure 7.7 : Contexte hydrogéologique de la région de Sainte-Luce et Luceville (modifié de Dion et Miranda, 1978)

Système de captation de l'eau souterraine à Sainte-Luce et concentrations en nitrates enregistrées

Le système de captation d'eau de la municipalité de Sainte-Luce fonctionne principalement de façon gravitaire. Plusieurs drains sont installés à la base d'un talus sableux, où l'eau percole naturellement par gravité. L'ensemble de l'eau captée par ces drains est ensuite acheminé dans des réservoirs et le surplus est évacué par le trop-plein aménagé dans chacun des réservoirs. L'eau potable est ensuite dirigée vers les citoyens de Sainte-Luce via le système d'aqueduc municipal. Des piézomètres d'observations sont également installés en amont des ouvrages de captation. Mission HGE (2007) estime un débit journalier de 2 111 m³/jour pour l'ensemble des galeries. Depuis 2008, les concentrations en nitrate observées dans les ouvrages de captation et dans les piézomètres d'observation ont montré des valeurs inquiétantes, comme le témoigne les **Figure 7.8** et **Figure 7.9**

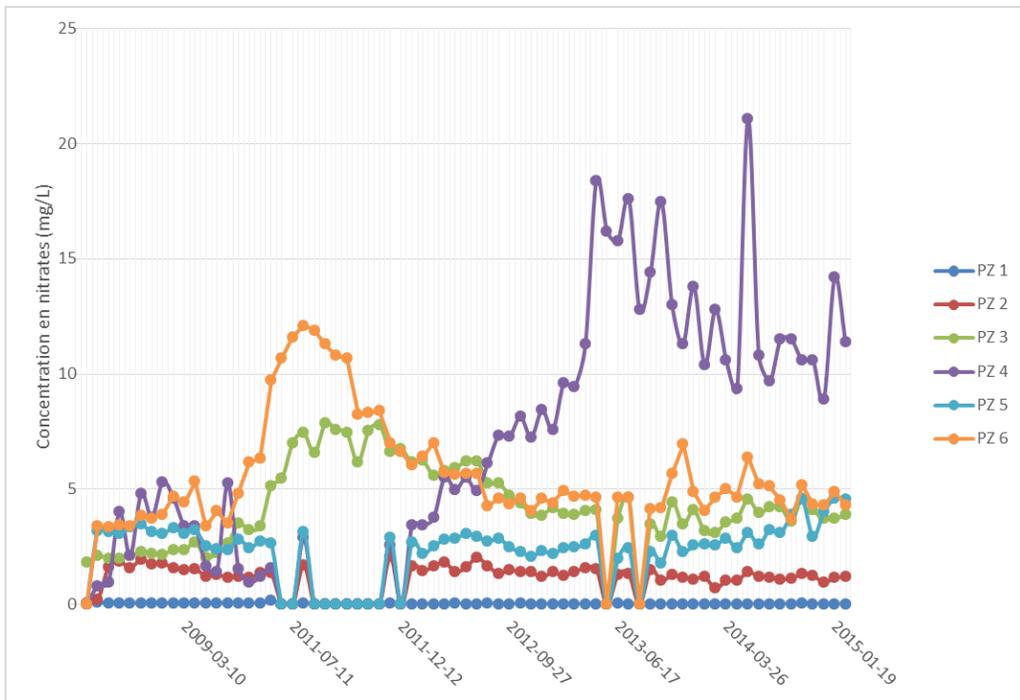


Figure 7.8 : Concentrations en nitrates enregistrées dans les piézomètres d'observation dans l'air de captation de l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-Luce

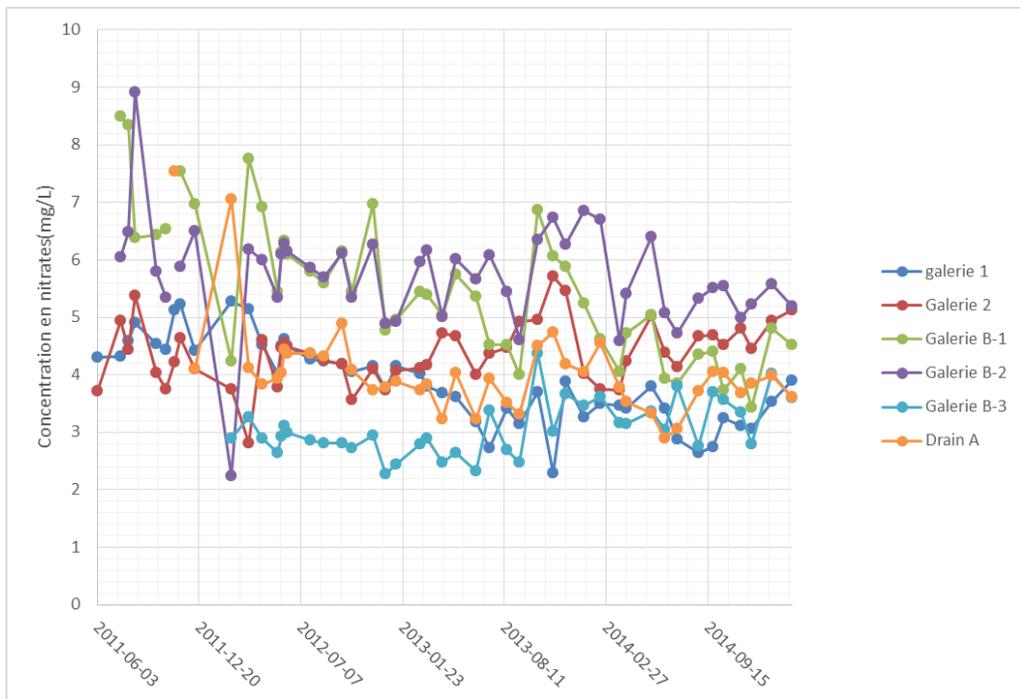


Figure 7.9 : Concentrations en nitrates enregistrées dans les ouvrages de captation de l'eau souterraine de la municipalité de Sainte-Luce

Méthodologie

Afin de répondre aux objectifs du projet, des expériences *in situ* se dérouleront sur une parcelle expérimentale à Sainte-Luce.

La parcelle expérimentale est située sur le 3^e rang Est à Sainte-Luce. C'est une parcelle d'une superficie approximative de 7 000 m² qui est en friche depuis plus de 4 ans. Douze mini-parcelles de 10 m × 10 m ont été aménagés et différents traitements de chaux et de matière organique y ont été appliqués à l'automne 2014. La chaux utilisée lors des expériences provient de la COOP de chaux du Bas-Saint-Laurent. Elle est composée principalement de CaCO₃ et de MgCO₃. La matière organique utilisée est du bran de scie de feuillu provenant de la scierie Saint-Fabien avec un rapport C/N pouvant théoriquement agir comme un « capteur » de NO₃ dans le sol jusqu'à l'utilisation par les plantes. L'engrais minéral y sera ajouté dès le mois de mai 2015. L'engrais correspond à du nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) et la quantité à appliquer est encore à déterminer. Des échantillons de sol et d'eau gravitaire seront collectés dans chacune des mini-parcelles au cours de la saison. La **Figure 7.10** présente schématiquement l'aménagement des « mini-parcelles » expérimentales. Trois répliques de chaque traitement ont été mis en place afin de pouvoir traiter statistiquement les résultats.



Figure 7.10 : Schéma des 12 mini-parcelles avec les traitements (chaux : 3 tonnes/ hectares, matière organique : 8 tonnes/hectare)

Analyse de sol

Les échantillons de sol seront collectés à l'aide d'une tarière de 0 à 15 cm puis de 15 à 30 cm de profondeur, pour chacune des mini parcelles expérimentales. La période d'échantillonnage s'étalera sur une période d'un an. Les premiers échantillons ont été récoltés le 30 octobre 2014,

avant l'épandage de la chaux et de la matière organique. D'autres échantillons seront pris au printemps 2015 jusqu'en automne 2015, à une fréquence d'échantillonnage de 6 semaines. Aucun échantillon ne sera prélevé durant la période hivernale. Les échantillons seront ensuite analysés au laboratoire pour estimer les bilans en azote. Spécifiquement, nous souhaitons analyser:

- Azote organique
- Azote minéral (nitrites, nitrates, ammonium)
- pH
- CEC (capacité d'échange cationique)
- Granulométrie
- Taux de matière organique
- Rapport C/N
- Le dénombrement microbien (nombres de cellules microbiennes)

Les résultats obtenus permettront de dresser un bilan azoté du sol et de déterminer les variations temporelles des différents processus du sol (assimilation vs minéralisation de la matière organique, nitrification vs dénitrification, ammonification, etc.) (*Objectif 1*)

Analyse d'eau gravitaire

Dans la littérature, l'eau à la sortie des réseaux de drainage des terres agricoles est souvent utilisée comme étant l'eau susceptible de rejoindre les nappes souterraines. Cependant, puisque les sédiments dans l'aire de captation de l'eau souterraine à Sainte-Luce affichent une forte perméabilité naturelle, aucun réseau de drainage n'y est installé. Afin d'obtenir des échantillons de l'eau susceptible de rejoindre l'aquifère sous-jacent, un autre système de captage d'eau doit être développé. Pour récupérer cette eau gravitaire, des tuyaux de drains enrobés seront installés à un angle de 60 degrés dans le sol sur chacune des min-parcelles expérimentales (**Figure 7.11**). Ces collecteurs d'eau seront installés à 15cm et à 30cm de la surface du sol. Lors des épisodes de pluies, l'eau d'infiltration sera interceptée par les tuyaux de drains enrobés et descendra par gravité vers l'extrémité du tuyau, où un réservoir sera installé. L'eau gravitaire sera pompée vers la surface grâce à une pompe. Les échantillons seront filtrés puis congelés à -80°C jusqu'à leur analyse. Les différentes formes organiques (DON) et inorganiques (NH_4 , NO_3 , NO_2) seront analysées. Ces analyses permettront de suivre le devenir des NO_3^- dans les différents traitements et de déterminer si le chaulage et l'amendement en matière organique ont un impact significatif sur le lessivage des nitrates vers la nappe phréatique. (*Objectif 2*)

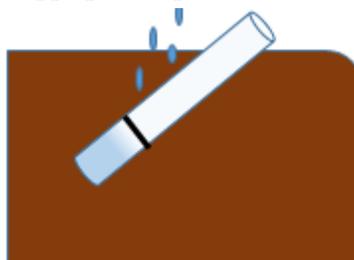


Figure 7.11 : schéma d'un collecteur d'eau

7.3 Caractérisation de la connectivité entre les eaux de la rivière Matane et les eaux souterraines de l'aquifère alluvial, Saint-René-de-Matane, Québec

Catherine Tremblay, étudiant e à la maîtrise en géographie à l'Université du Québec à Rimouski
Direction: Thomas Buffin-Bélanger, UQAR, Gwenaëlle Chaillou, UQAR et Marie Larocque, UQAM

État des connaissances

Les eaux souterraines et de surface ont longtemps été étudiées comme deux entités distinctes ayant peu d'interactions entre elles. Orghidan (1959) est l'un des premiers à étudier la zone de transition entre l'eau souterraine de la plaine alluviale et l'eau de la rivière décrite comme la zone hyporhéique et faisant partie intégrante de l'écosystème fluvial avec ses caractéristiques spécifiques (Schowerbel (1961) dans Brunke et Gonser, 1997). L'étude de la connectivité entre les eaux souterraines et les eaux de surface et des zones d'échange émerge dans les années 80, solidifiant des collaborations étroites entre l'hydrologie et l'hydrogéologie (Brunke et Gonser, 1997; White, 1993; Woessner, 2000). Selon Brunke et Gonser (1997), trois raisons expliquent l'émergence de ces études : (1) les caractéristiques des eaux souterraines et de surface découlent de manière significative de leurs interactions; (2) hydrologiquement, les eaux de surface et souterraines sont étroitement liées; et (3) les hydrosystèmes souterrains dépendent de l'énergie transférée de la surface vers les aquifères sous forme de matière organique dissoute ou particulaire et inversement, plusieurs cours d'eau obtiennent des apports en grande quantité par l'entremise des eaux souterraines.

Aujourd'hui, les échanges rivière-aquifère sont relativement bien documentés. Ils surviennent selon les conditions spécifiques du milieu alluvial, par exemple, la connectivité hydraulique des sédiments des interfaces; la relation entre les niveaux d'eau de la rivière et le gradient hydraulique du niveau de la nappe alluviale; et la géométrie et position du cours d'eau dans la plaine (Woessner, 2000). Woessner indique deux directions principales que prend l'écoulement lors d'échanges d'eaux souterraines et de surface dans une plaine alluviale : (1) un écoulement des eaux souterraines vers la rivière en raison du niveau de la nappe phréatique plus élevée que celui de la rivière (**Figure 7.12A**) et (2) un écoulement de la rivière en à l'intérieur de la plaine alluviale lorsque le niveau de la nappe est inférieur à la rivière (**Figure 7.12B C**). Il est question respectivement de gain et de perte pour la rivière (Woessner, 2000). Les échanges rivière – aquifère se produisent à diverses échelles spatiales et temporelles permettant de définir deux zones distinctes : zone hyporhéique et zone périrhéique.

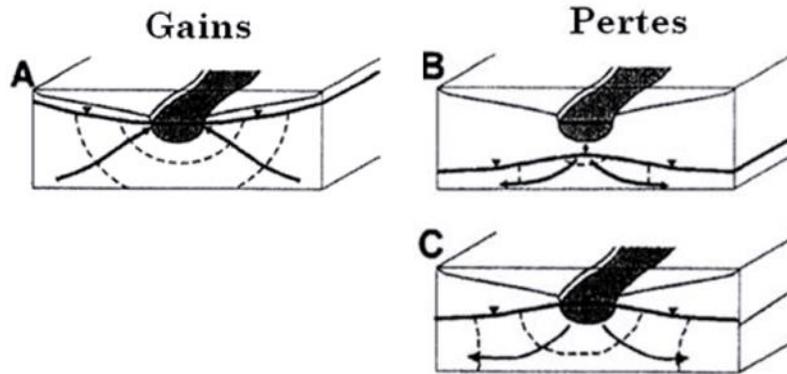


Figure 7.12. Coupes transversales des interactions entre une nappe phréatique et un cours d'eau dans une plaine alluviale comme : (A) gains; (B) et (C) pertes. Le cours d'eau est représenté en noir; la hauteur de la nappe et le niveau d'eau de la rivière (ligne épaisse), écoulement des eaux souterraines (flèches) et les lignes équipotentielles (ligne pointillée) (Modifiée de Woessner, 2000).

Zone hyporhéique

La zone hyporhéique se définit comme la zone interstitielle saturée sous le lit d'un cours d'eau et sur quelques mètres à l'intérieur des berges contenant une certaine portion d'eau de surface infiltrée et mélangée avec les eaux souterraines (White, 1993).

La **Figure 7.13** montre que les échanges d'eaux souterraines – surface à l'intérieur de la zone hyporhéique s'effectuent verticalement et latéralement dans les berges de la rivière. Cette zone saturée comprend des échanges à des échelles spatiales allant de quelques centimètres à la dizaine de mètres. Les écoulements hyporhéiques se situent au niveau des bancs d'accumulation, seuil-mouille ou berges convexes de la rivière (Datry et al. 2008). La zone hyporhéique est essentielle à certains processus et écosystèmes qui dépendent du mélange des eaux souterraines et de surface. Cette dernière sert, entre autres, de contrôle à l'écoulement et à la localisation des échanges d'eau entre un cours d'eau et son aquifère; d'habitat pour les organismes benthiques et interstitiels; de zone importante concernant le cycle du carbone, de l'énergie et des nutriments; de zone d'atténuation naturelle pour certains contaminants par la biodégradation, l'absorption et le mélange et modère la température de l'eau de la rivière; etc. (Environment Agency, 2009).

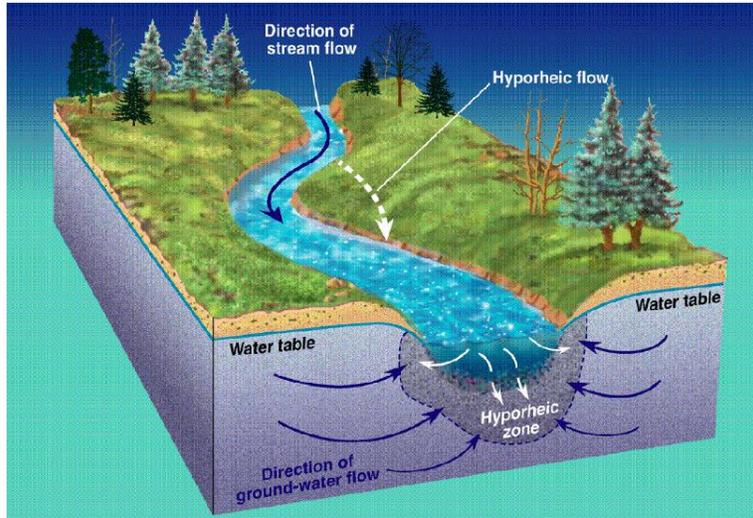


Figure 7.13 : Illustration de la zone hyporhéique et des échanges latéraux et verticaux avec une plaine alluviale.

Zone périrhéique

Selon Mertes (1997), la zone périrhéique complémentaire à la zone hyporhéique, est considérée comme une zone de mélange de différents types d'eau à la surface de la plaine alluviale inondée. Les quatre types d'eau identifiés sont les précipitations, l'eau hyporhéique, les eaux souterraines et les eaux de ruissellement (surface du sol ou petits tributaires). Les masses d'eau, le type d'alluvions et les conditions initiales de saturation du sol jouent un rôle important sur la pression exercée par la rivière en période de crues (Mertes, 1997). Autrement dit, il s'agit de la zone où la fluctuation des niveaux d'eau d'une rivière ou d'un lac influence la nappe phréatique, d'où l'onde phréatique prend son origine. Le rehaussement du niveau d'eau dans la rivière se traduit par la propagation d'une onde phréatique à l'intérieur de la plaine inondable et crée une remontée de la nappe phréatique. Il en résulte des inondations par résurgence de l'eau souterraine ou par accumulation d'eau sur les zones saturées. Ce type d'inondation cause des dommages matériels importants aux infrastructures humaines en bordure des rivières. Ce risque est courant dans les plaines alluviales de plusieurs rivières, dont celle du bassin versant de la rivière Matane (Cloutier, 2013).

De plus, les inondations engendrent le processus de « bank storage ». Durant ces périodes, le niveau de la rivière augmente inversant le gradient hydraulique. Ainsi, l'eau de la rivière peut s'écouler plus loin à l'intérieur de la plaine inondée en raison des apports importants au chenal des précipitations et de la fonte de neige et ainsi ralentir l'écoulement de la nappe vers le cours d'eau, ce qui fait augmenter le niveau de la nappe dans la plaine. Lorsque le niveau de la rivière diminue, le gradient se rétablit et l'eau de la plaine retourne à la rivière. Le processus de stockage dans la plaine inondée et de retour de l'eau au chenal consiste en l'emménagement des berges.

Ce processus hydrologique est très important dans l'atténuation de l'onde de crue et dans l'approvisionnement de la rivière lors des écoulements de base (Squillace, 1996).

Problématique et pertinence de la recherche

Plusieurs recherches ont été menées pour mieux comprendre les interactions complexes entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans les plaines alluviales, et ce, selon plusieurs échelles spatiales et temporelles à travers le monde (Cook et al. 2006; Schmidt et al. 2008 Lamontagne et al. 2011). Cependant, très peu abordent ce sujet dans le contexte québécois nordique en milieu de plaine alluviale. Ce manque de connaissances sur les échanges entre rivière et aquifère alluvial et les processus qui y sont liés est une lacune importante pour la compréhension de ces systèmes complexes. La prise en compte des dimensions latérale et verticale de la zone hyporhéique dans l'aménagement des milieux fluviaux est essentielle aux activités écologiques et au développement de la biodiversité à l'intérieur des cours d'eau (Datry et al. 2008).

De plus, les inondations par résurgence, fréquentes dans les plaines alluviales du Québec, ont déjà été observées lors de crues printanières, et ce, en l'absence de débordement de la rivière. C'est le cas de la vallée de la rivière Matane où la dynamique entre rivière-aquifère est accentuée par les alluvions grossières composant la plaine (Cloutier, 2013). Ce type d'inondation reste peu documenté jusqu'à maintenant comprenant les processus associés dont l'onde de crue phréatique à l'intérieur de la zone périrhéique et le stockage des berges.

Objectifs principal et spécifiques

Les plaines alluviales graveleuses représentent un potentiel aquifère important sur le territoire du PACES-NEBSL.. Ces aquifères sablo-graveleux, dont celui situé dans la vallée de la rivière Matane, ont été peu étudiés jusqu'à maintenant. L'étude des interactions des eaux souterraines et des eaux de surface dans une plaine alluviale graveleuse et ses différentes zones associées permettra d'apporter des connaissances de base pour la gestion des risques et l'aménagement de ces systèmes. Ce projet de maîtrise se veut un approfondissement à plus petite échelle des connaissances de base sur le sujet de la connectivité entre une rivière et son aquifère au Québec nordique.

Ce projet spécifique de maîtrise vise globalement à caractériser la nature des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans une plaine alluviale graveleuse durant les périodes de crue printanière et d'été. Pour ce faire, deux objectifs spécifiques permettront de comprendre ces échanges et de les décrire :

- 1) Analyser la variabilité spatiale et temporelle des zones hyporhéique et périrhéique sur un tronçon de rivière pour les périodes d'été et de crue.
- 2) Caractériser les paramètres de l'onde phréatique à l'intérieur de la plaine alluviale.

Méthodologie

Terrain à l'étude

Le terrain d'étude retenu pour ce projet se situe dans la région administrative du Bas-Saint-Laurent dans la province du Québec. Cette plaine alluviale graveleuse se situe à 28 km en amont de la ville de Matane et à quelques kilomètres au sud-est du village de Saint-René-de-Matane (Cloutier, 2014). Le site Dancause fait partie du bassin versant de la rivière Matane qui possède une superficie de 1 678 km² (**Figure 7.14A**). Cette rivière coule sur plus de 70 km et traverse la province géologique des Appalaches formée de roches sédimentaires, plissées, faillées et métamorphisées (Marchand, 2013). Cette dernière est de type semi-alluviale, c'est-à-dire qu'elle est contrainte sur certaines portions de son tracé par des affleurements en surface du socle rocheux, limitant son déplacement latéral (**Figure 7.14B**) (Buffin-Bélanger et al. 2011). Des sédiments fluviaux glaciaires déposés lors de la dernière glaciation atteignent une épaisseur allant jusqu'à 75 mètres de profondeur au roc à certains endroits. Cette rivière possède un débit annuel moyen de 39 m³/s qui peut aller jusqu'à 350 m³/s lors du niveau plein bord (Cloutier, 2014).

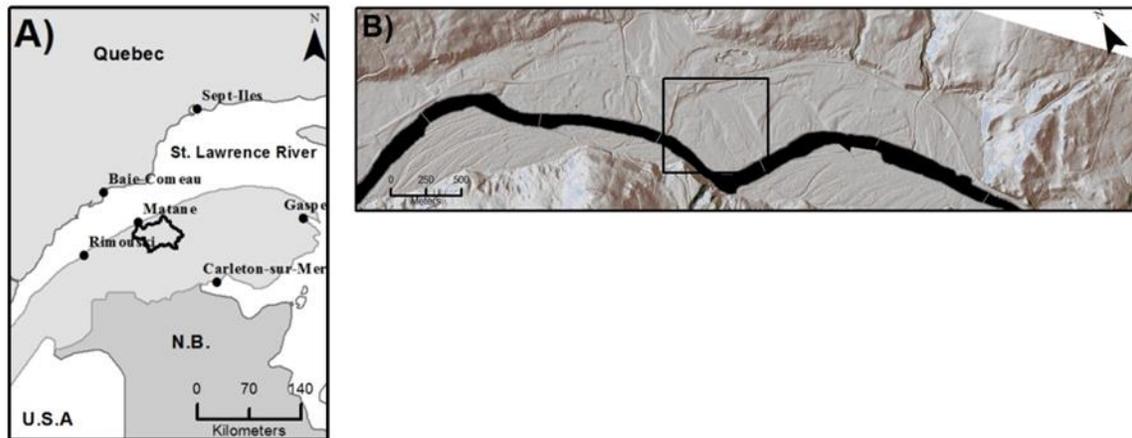


Figure 7.14 : A) Localisation régionale du bassin versant de la rivière Matane. B) Localisation du site d'étude Dancause à Saint-René-de-Matane dans son cadre géomorphologique.

Matériel et collecte de données

Vingt-quatre piézomètres ont été installés pour couvrir de manière homogène le site d'étude depuis 3 ans. Pour permettre une analyse plus fine à proximité de la rivière, un transect comportant sept piézomètres a été mis en place à l'été 2014 (points jaunes, **Figure 7.15**). Les piézomètres sont équipés de sondes Hobo® Water Level Logger U20-001 et Hobo Water Temp Pro v2 pour enregistrer les niveaux d'eau et la température à un intervalle de 15 minutes.

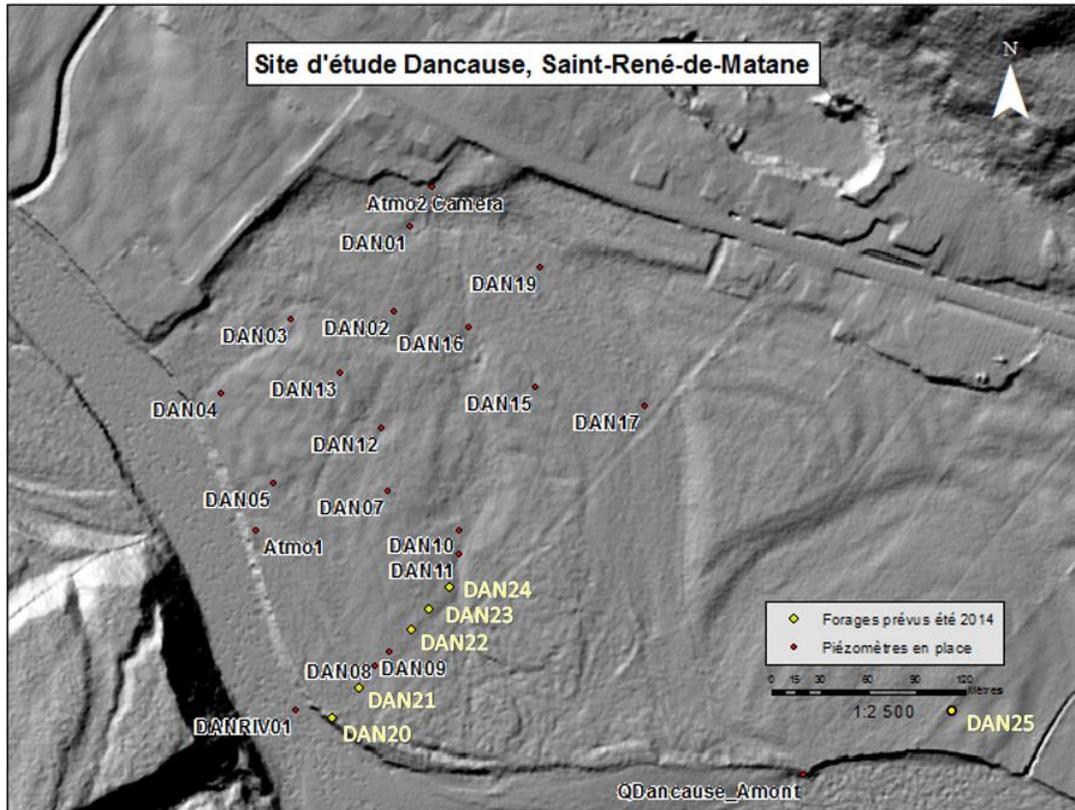


Figure 7.15 : Position des piézomètres des niveaux d'eau et de la pression atmosphérique dans la plaine alluviale du site Dancause.

Trois campagnes d'échantillonnage pour les paramètres physico-chimiques de l'eau de la rivière et de la plaine alluviale (température, salinité, conductivité spécifique, oxygène dissout et pH), les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$) et le radon (^{222}Rn) ont été effectuées : la première durant la période d'étiage à l'été 2013, la seconde durant la période de crue au printemps 2014 et la troisième à l'été 2014. Les paramètres physico-chimiques ont été prélevés à l'aide d'une sonde YSI 650 Multiparameter Display System. Un échantillonnage de ^{222}Rn a été réalisé par des mesures in situ à l'aide du RAD7 et la cellule RAD AQUA (Figure 7.16). Finalement, les échantillons d'eau pour les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) ont été analysés à l'aide d'un spectromètre de masse (Micromass Isoprime TM à double injection (dual inlet)). Pour le $\delta^{13}\text{C}$ et le DIC, les analyses en laboratoire ont été faites respectivement avec un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse et un chromatographe ionique. Des échantillons d'eau ont également été envoyés aux laboratoires MAXXAM pour l'analyse d'une quarantaine de paramètres physico-chimiques.



Figure 7.16 : Instrument RAD7 utilisé pour les mesures in situ du ^{222}Rn

Résultats préliminaires

Caractérisation de l'eau dans la plaine alluviale

Dans le but de répondre au premier objectif de ce projet, une analyse statistique préliminaire des paramètres physico-chimiques de l'eau a été effectuée. Les analyses préliminaires des isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) à l'intérieur du site Dancause révèlent que l'eau de la plaine est essentiellement un mélange d'eaux provenant de la neige (points oranges) et de la pluie (points roses) (**Figure 7.17**). Ces données ont été prélevées entre les périodes d'été 2013 et 2014. Il est à remarquer que les eaux de la plaine alluviale et de la rivière se retrouvent à l'intérieur des pôles eaux de pluie et eaux de neige. Ainsi, les eaux souterraines de la plaine sont relativement jeunes et leur signature isotopique est semblable à celle de la rivière, également issue de ces deux types d'eau. Il est à supposer que les eaux que l'on retrouve dans la plaine inondable sont essentiellement des eaux de recirculation de la rivière comprenant des eaux de pluie et de neige. Aussi, les isotopes stables se répartissent autour de la courbe météorique de la région du nord-est du Bas-Saint-Laurent indiquant que ces derniers sont semblables à ceux de la région.

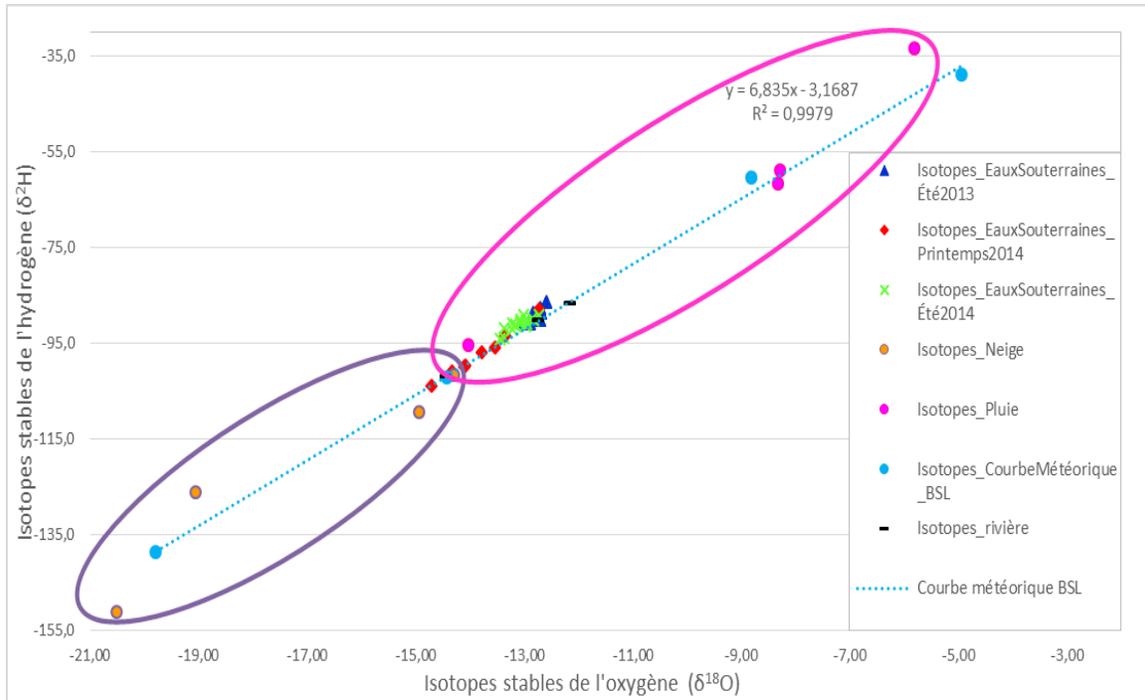


Figure 7.17. Relation des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) des eaux souterraines de la plaine alluviale du site Dancause situés par rapport à la courbe météorique de la région du nord-est du Bas-Saint-Laurent (Québec) entre la période d'été 2013 et 2014.

Les analyses des paramètres physico-chimiques, plus précisément de l'oxygène dissout (mg/L), semblent indiquer un écoulement amont-aval prédominant dans la plaine alluviale en période d'été, contrairement aux périodes de crues (analyse de l'onde phréatique) où les écoulements sont davantage en relation avec la distance perpendiculaire à la rivière (**Figure 7.18**). Le même phénomène est observable avec les isotopes stables de l'oxygène, où le fractionnement isotopique semble devenir plus important selon la distance amont-aval (**Figure 7.19**).

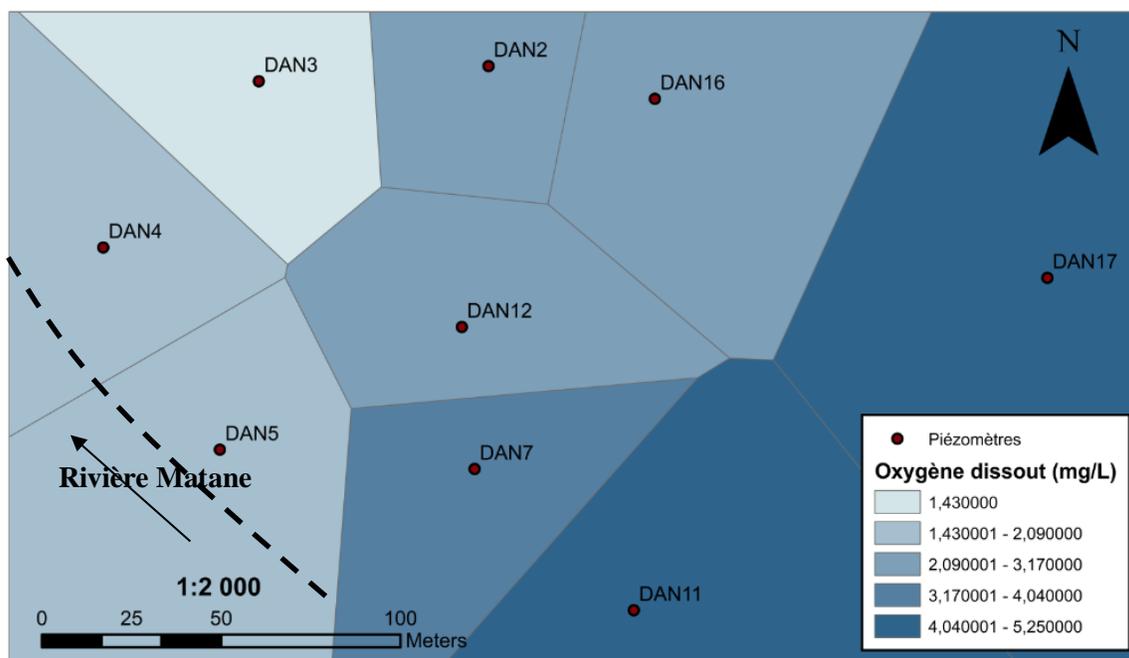


Figure 7.18. Répartition des valeurs de l’oxygène dissout (mg/L) (polygones de Thiessen) dans la plaine alluviale du site Dancause pour la période d’été 2013, Saint-René-de-Matane (Québec).

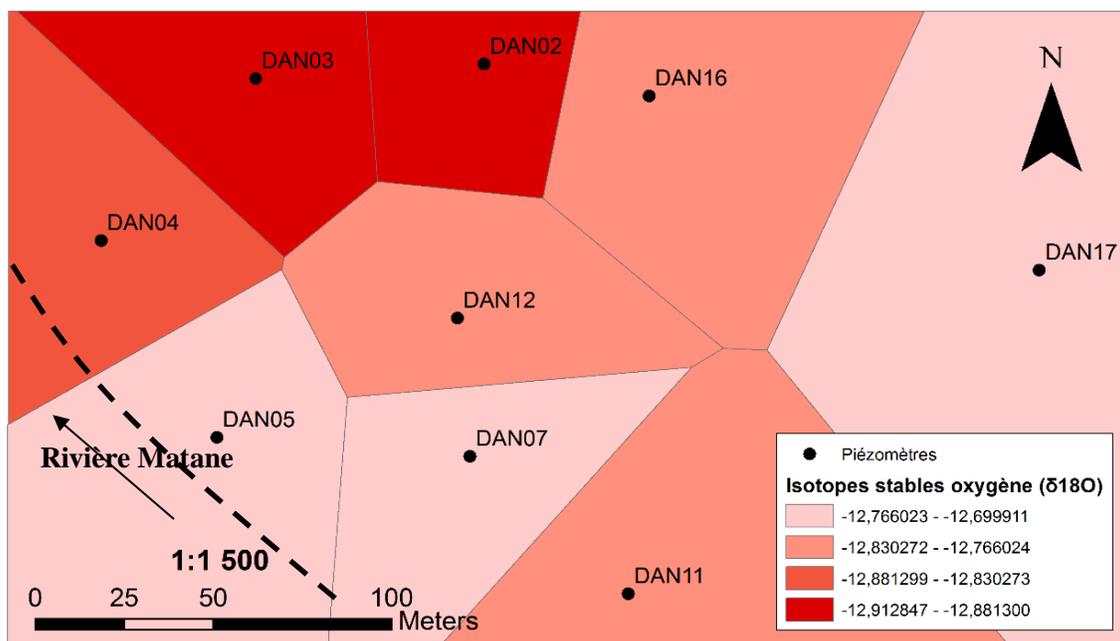


Figure 7.19. Répartition des isotopes stables de l’oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) (polygones de Thiessen) dans la plaine alluviale du site Dancause pour la période d’été 2013, Saint-René-de-Matane (Québec).

Caractérisation des ondes phréatiques

Pour répondre au deuxième objectif, des analyses des niveaux d'eau dans la plaine alluviale ont été effectuées pour comprendre l'onde phréatique et le phénomène de « bank storage ». Cinquante événements de crue provoquant des ondes phréatiques sont survenus dans les 3 dernières années. Les ondes de crues de ces événements ont été analysées pour comprendre les mécanismes de propagation, d'atténuation et d'exfiltration de l'onde phréatique (Buffin-Bélanger et al. en révision). La **Figure 7.20A** montre la relation entre la distance perpendiculaire à la berge de la rivière Matane avec le temps de réponse à l'intérieur de chaque piézomètre de la plaine un événement de crue. Cet événement se caractérise par une onde phréatique possédant une vitesse de propagation moyenne de 7,7 m/h avec un R^2 de 0.91 suggérant une forte corrélation entre la distance et le temps de réponse. Plus la distance augmente perpendiculairement à la berge, plus le temps de réponse augmente à travers la plaine alluviale. La **Figure 7.20B** illustre le nombre d'événements de crue (57 événements de crue au total) en fonction de la vitesse de propagation de l'onde phréatique où la plupart des événements sont compris dans un intervalle de vitesse de 8,2 à 13,5 m/h. La majorité des événements de crue ont un coefficient de régression au-dessus de 0,80 (**Figure 7.20C**).

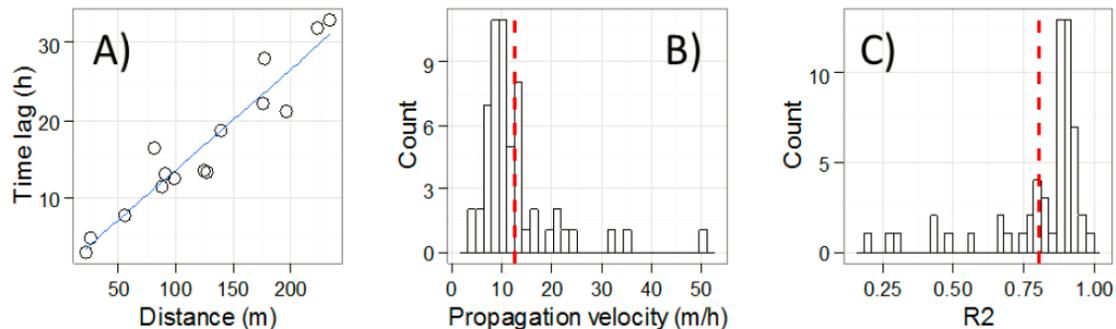


Figure 7.20. A) Temps de réponse de l'onde phréatique en fonction de la distance perpendiculaire à la berge pour un événement de crue (41). 9B) Histogramme de la répartition des 57 événements en fonction de la vitesse de propagation de l'onde phréatique. 9C) Histogramme des coefficients de régression de la relation linéaire entre le temps de réponse des piézomètres et la distance perpendiculaire à la berge (Buffin-Bélanger et al. en révision).

Les analyses statistiques de la vitesse de propagation de l'onde phréatique dans la plaine alluviale montrent que cette dernière est influencée par plusieurs caractéristiques des crues de la rivière. Avec respectivement un R^2 de 0,31, 0,30 et 0,26, le niveau maximum de la rivière, conditions initiales des niveaux d'eau souterraines et l'amplitude de la crue sont des facteurs déterminants dans la propagation de l'onde phréatique à l'intérieur de la plaine alluviale (**Figure 7.21**).

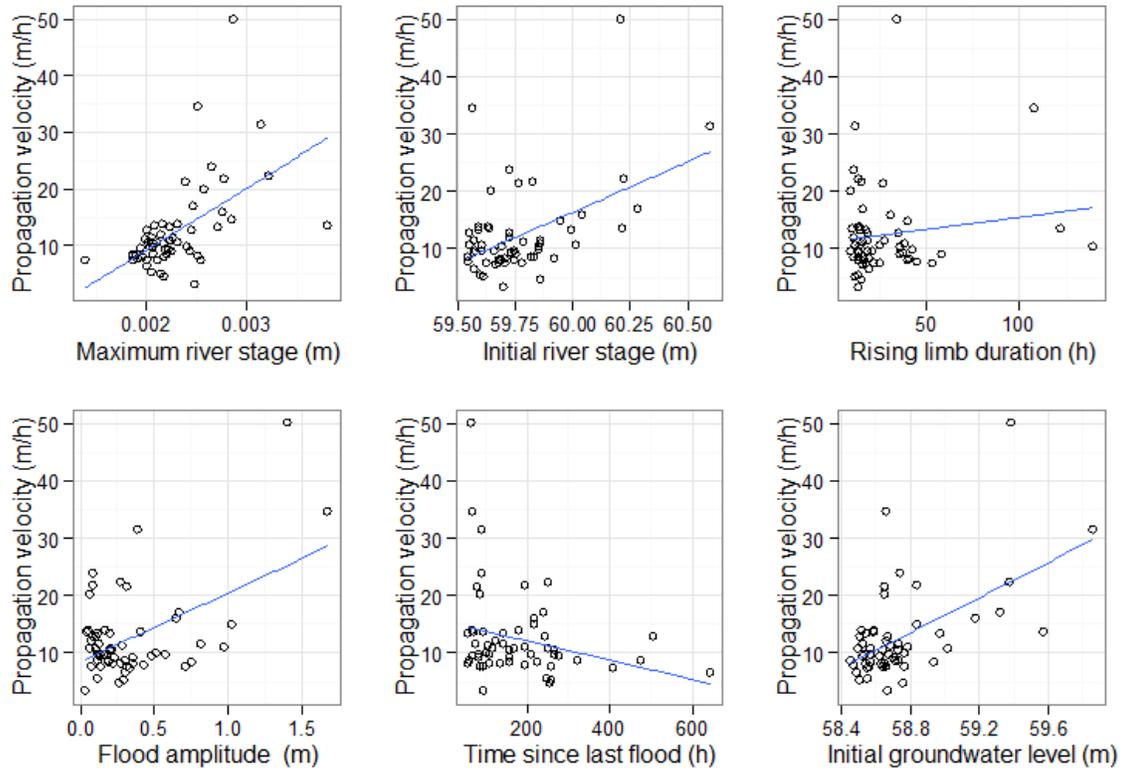


Figure 7.21. Vitesse de propagation de l'onde de crue selon les caractéristiques des événements de crue (Buffin-Bélangier et al, en révision)

7.4 La protection des eaux souterraines : action collective pour le maintien de l'activité agricole dans une municipalité de Bas-Saint-Laurent.

Marise Bélanger : étudiante au DESS en Développement régional et territorial à l'Université du Québec à Rimouski

Introduction

Les municipalités du Québec sont de plus en plus nombreuses à s'approvisionner en eau souterraine. Pour assurer la préservation en quantité et en qualité, le *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection* (RPEP) (chapitre Q-2, r. 35.2) oblige les municipalités à délimiter des périmètres de protection autour des ouvrages de captage d'eau potable municipaux. En zone agricole, ces périmètres restreignent l'utilisation des matières fertilisantes d'origine animale, obligeant les producteurs agricoles à utiliser des engrais minéraux, qui peuvent cependant apporter d'autres problèmes, comme la présence de nitrates dans l'eau potable. À Sainte-Luce au Bas-Saint-Laurent, l'activité agricole est très importante sur le territoire, particulièrement en amont de la source d'eau potable. Malgré l'imposition de restrictions, elle est identifiée comme responsable d'une augmentation des nitrates dans l'eau potable. Pour solutionner ce problème, les entreprises agricoles de ce territoire collaborent avec la municipalité depuis 2012 à la mise en place d'un projet de recherche agricole pour maintenir cette activité économique d'importance dans le milieu et assurer la protection de l'eau potable. Le processus de mise en place de ce projet visant la modification de pratiques culturales des entreprises agricoles du bassin versant de la nappe d'eau souterraine sera étudié afin de connaître l'influence de différents facteurs tels que le rôle des acteurs politiques locaux, le contexte politique local et la faisabilité des solutions proposées (Boulangier, 2004).

Le sujet d'étude

La municipalité de Sainte-Luce puise son eau potable dans un aquifère situé en milieu agricole. Comme les drains de captage d'eau sont situés dans une nappe d'eau souterraine considérée vulnérable (par le type de sol très perméable) les activités agricoles en amont sont restreintes. Malgré l'application des normes contenues dans le RPEP, comme l'imposition de restrictions aux activités dans les aires de protection des ouvrages de captage, la municipalité a décelé la présence de nitrates dans l'eau potable. Des démarches ont alors été entreprises pour la mise en place d'un projet agricole de recherche appliquée visant la réduction des nitrates. Le cas de Sainte-Luce constitue un terrain d'étude pour comprendre le processus de concertation et de coopération qui s'est mis à l'œuvre au cours des dernières années pour entreprendre cette action collective. **Comment la dynamique sociale a influencé la mise en place d'une action collective visant la préservation de la qualité de l'eau potable et le maintien de l'activité agricole dans la municipalité de Sainte-Luce ?**

Problématique

La municipalité de Sainte-Luce, située dans la MRC de la Mitis au Bas-Saint-Laurent, compte 2 900 habitants. En 2007, conformément au RPEP, la municipalité de Sainte-Luce établit des zones de protection autour de ses ouvrages de captage, une zone de protection bactériologique de 91,5 hectares et une zone de protection virologique de 108,5 hectares, pour un total de 200 hectares. Depuis 2008, les concentrations en nitrites-nitrates augmentent dans différents piézomètres (puits utilisés pour suivre la qualité de l'eau). Suite à la recommandation de l'ingénieur en charge des suivis de qualité de l'eau, en conformité avec le RPEP, la municipalité avisa les producteurs agricoles ayant des activités dans les aires de protection que celles-ci pouvaient avoir des répercussions directes sur la détérioration de l'eau potable, et les convoqua avec différents intervenants pour trouver des solutions à la mise en valeur de l'eau potable et des activités agricoles (Drainville, 2013).

La municipalité de Sainte-Luce a fait réaliser une enquête sur l'intérêt des entreprises agricoles à participer à un projet de recherche, impliquant la modification de leurs méthodes de cultures dans les aires de protection afin de contrer le lessivage des nitrates. Ces dernières semblent démontrer une ouverture à participer au projet pour que leurs activités ne nuisent pas à la qualité de l'eau potable (Drainville, 2013). À l'été 2013, le projet de recherche appliquée fut mis en branle par la mise en place d'actions agro-environnementales dans le bassin versant des ouvrages de captage par une collaboration entre les producteurs agricoles, la municipalité de Sainte-Luce, le MDDEFP, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et l'entreprise Terre-eau (firme d'agronomie). Avec ce projet, la municipalité de Sainte-Luce poursuit deux objectifs: assurer l'amélioration de la qualité de l'eau potable du bassin versant des puits de captation d'eau de la municipalité à des fins d'alimentation humaine, de même que la mise en valeur des activités agricoles du bassin versant des puits de captage d'eau de la municipalité.

L'intérêt des agriculteurs à participer au projet de recherche appliquée de Sainte-Luce afin que leurs activités ne comportent plus aucun danger pour l'eau potable des citoyens, tel que noté par Drainville (2013), indique-t-il une préoccupation de leur part pour le bien commun ? Mais ont-ils eu le choix ? Les élus auraient pu restreindre davantage les activités agricoles dans le bassin versant des ouvrages de captage de son eau potable, ils ont plutôt entrepris des démarches pour trouver une autre solution permettant la préservation de la qualité de l'eau et le maintien des activités agricoles, qui occupent une part importante de l'activité économique de son territoire. Quels sont les facteurs ayant influencés le choix des élus ? Retracer l'historique de l'action effectuée par la municipalité, le processus de prise de décision et connaître les rôles joués par les différents acteurs, permettraient d'identifier les facteurs déterminants la mise en place d'une action collective pour la protection de l'eau souterraine. L'hypothèse de recherche est la suivante :

- C'est la présence d'acteurs-clés dans la dynamique sociale qui a favorisée la concertation et l'action collective pour solutionner le problème de contamination de l'eau potable tout en maintenant l'activité agricole sur le territoire.

Plus spécifiquement, est-ce que l'environnement social a joué un rôle dans la prise de décision des élus ? Est-ce que les élus avaient les connaissances nécessaires à la compréhension des enjeux ou ont-ils fait appel à des experts ? Est-ce que le contexte politique a influencé la démarche ? Cette étude permettra d'apporter des éléments supplémentaires à la connaissance de l'intégration des mesures de protection de l'eau souterraine à l'aménagement du territoire, de l'évitement de conflits d'usages par une gestion intégrée, du support des institutions gouvernementales et sur la concertation entre les acteurs du milieu, entre autres des agriculteurs. Elle permettra d'identifier les facteurs qui ont influencé le processus de gouvernance mis en place à Sainte-Luce pour la protection de l'eau potable. Éventuellement, l'étude pourrait donner des pistes d'actions pour d'autres municipalités du Bas-Saint-Laurent qui peuvent faire face à des situations semblables étant donné les similitudes dans les types de sols en différents endroits, ce qui sera confirmé par le PACES-NEBSL, également pour d'autres municipalités au Québec.

Les objectifs de l'étude sont :

- Identifier les facteurs qui ont influencé le processus de gouvernance mis en place à Sainte-Luce pour la réalisation de l'action collective ;
- Identifier les difficultés de mise en place de processus de gouvernance ;
- Évaluer l'influence du leadership, d'élus locaux ou d'acteurs exogènes au conseil municipal, qui a mené à l'action collective;
- Évaluer l'influence des ministères présents dans la mise en place et le suivi de cette action collective.

Méthodologie

Population et terrain d'étude

La municipalité de Sainte-Luce située dans la MRC de Mitis, occupe 71,90 km² avec une population de 2 869 personnes selon le décret 2013 (ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire). La présente étude se consacrera au secteur de Luceville de cette municipalité, qui compte 1 362 personnes (Statistiques Canada). Le secteur de Luceville est formé d'une agglomération urbanisée avec plusieurs services de proximité (école, épicerie, commerces) reliée au réseau d'aqueduc municipal s'approvisionnant à partir des puits de captage situés au sud du village dans un secteur agricole.

La population ciblée par l'étude de cas de Sainte-Luce sera constituée d'élus, du directeur général de la municipalité et agriculteurs installés dans l'aire d'alimentation d'eau potable ainsi que les autres acteurs impliqués du domaine politique et expert.

Cueillette et analyse des données

Deux types de données seront utilisés pour cette étude : des données secondaires, qui viendront d'une analyse de documents et de contenus de la municipalité, dans les archives et documents légaux, et des données de première main recueillis par le biais d'entretien. Ces entretiens seront semi-directifs et permettront de recueillir la compréhension du projet en cours par les différents acteurs dans leurs propres termes et aller au-delà des questions. Le guide d'entretien comprendra des parties spécifiques aux milieux municipal, agricole, expert et des ministères. Tous les entretiens seront enregistrés. Des pré-tests seront réalisés auprès d'élus d'une autre municipalité dans la MRC voisine de Rimouski-Neigette, de même qu'auprès d'agriculteurs. Les informations recueillies seront compilées en vue d'effectuer une analyse de contenu. Le premier niveau d'analyse de contenu portera sur les données secondaires recueillies. Par la suite, le contenu des entretiens sera analysé suite à une classification par catégories à l'aide de l'outil NVIVO. Après croisement et synthèse des données, il sera possible d'axer l'analyse qualitative vers des réponses aux questions de recherche et ainsi mettre en relation les différentes visions, étapes pour retracer l'historique de la démarche et identifier les facteurs importants ayant influencé l'action collective.

8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

8.1 Conclusion générale

Les connaissances sur les eaux souterraines étaient minimales et fragmentaires dans le Bas-Saint-Laurent. Aucun projet de cartographie hydrogéologique régionale n'avait jusqu'à présent été complété dans cette région où près de 200 000 personnes habitent. En 2010, les plans directeurs de l'eau des organismes de bassin versant du Bas-Saint-Laurent ainsi que la Commission sur l'eau de la Conférence régionale des élus (CRÉ) du Bas-Saint-Laurent soulignaient la nécessité d'acquérir des connaissances sur cette ressource afin de mettre en place des outils de gestion efficaces pour en assurer la qualité et la quantité. C'est dans ce contexte que l'UQAR, appuyée par l'INRS-ETE et la CRÉ du BSL, a proposé de développer et de piloter un projet régional d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines des bassins versants du nord-est du Bas-Saint-Laurent dans le cadre de la troisième et dernière phase du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Québec du MDDELCC.

Les résultats présentés dans ce rapport sont donc ceux de trois années de travail en collaboration avec de nombreux partenaires provinciaux, régionaux et institutionnels. Les résultats de ce projet proviennent également de la participation active des citoyens du nord-est du Bas St-Laurent qui ont donné accès non seulement à leurs puits pour l'échantillonnage mais aussi à leur terrain pour l'installation de piézomètres et la réalisation des relevés hydrogéologiques. **L'objectif du PACES-NEBSL était de compiler, d'uniformiser, d'actualiser et de bonifier les connaissances sur les eaux souterraines de la région du nord-est du Bas-Saint-Laurent.** Plus spécifiquement, le PACES-NEBSL visait :

- 1) à dresser un portrait de l'eau souterraine du territoire du nord-est du Bas-Saint-Laurent en termes de qualité, quantité et vulnérabilité,
- 2) à développer une expertise en hydrogéologie à l'UQAR en formant du personnels hautement qualifiés pour l'acquisition et le développement de connaissances en hydrogéologie;
- 3) à assurer la transmission de ces connaissances aux partenaires régionaux.

Pour ce qui est du portrait du territoire, on distingue deux principaux contextes hydrogéologiques qui correspondent aux régions physiographiques : la Plaine Côtière (< 150 m d'altitude) et les Hautes-Terres (> 150 m d'altitude). Cette distinction réfère aux territoires immergés ou non par la mer postglaciaire de Goldthwait lors de la dernière déglaciation dont le niveau maximale se situe autour de 165 m. D'un point de vue hydrogéologique, ces deux contextes sont distincts et ont des dynamiques distinctes.

Les Hautes-Terres représentent la majorité du territoire du PACES-NEBSL (73%). Sur cette portion du territoire, l'aquifère principal est l'aquifère rocheux en condition de nappe libre

puisque les dépôts meubles sont peu épais et correspondent généralement à des altérites perméables ou du till. Ce dernier n'est pas assez épais pour être considéré comme étant un aquitard. Localement, des aquifères granulaires de surface de faible dimension et de faible puissance saturée sont utilisés comme sources d'approvisionnement individuelles. Les résultats du bilan hydrique spatialisé indiquent que le contexte des Hautes-Terres est la principale zone de recharge du territoire du NEBSL. Les niveaux d'eau sont près de la surface et les puits ont une profondeur moyenne de 35 m. L'indice de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère rocheux des Hautes-Terres varie de moyen à significatif (100 à 180).

La Plaine Côtière est caractérisée par une vaste distribution de différents types de sédiments en termes d'épaisseur, de nature et d'architecture. On y retrouve une couverture quasi-continue de dépôts marins et littoraux généralement épais comblant les sillons appalachiens et la plupart des vallées alluviales. L'aménagement de puits de surface (fontaines) à partir des sédiments littoraux perméables surmontant les sédiments marins imperméables est une pratique fréquente pour l'approvisionnement résidentielle. Localement, des aquifères granulaires captifs (parfois en condition artésienne) peuvent être retrouvés sous l'argile marine dans les sillons appalachiens. Dans les vallées alluviales, on retrouve en surface des sables et des graviers alluviaux reposant généralement sur des sédiments argileux marins. Ces argiles reposent le plus souvent directement sur le roc ce qui implique que l'aquifère rocheux est généralement en condition de nappe captive. Dans quelques vallées, il est cependant possible retrouver par endroits des aquifères granulaires captifs sous les argiles marines. Ces aquifères d'épaisseurs variables (de 2 à plus de 20 mètres) peuvent être très productifs. La recharge de l'aquifère rocheux sur le territoire de la Plaine Côtière est nulle à très faible en raison de la forte présence des sédiments argileux ou de till imperméable recouvrant le roc. Ces formations aquitards forment une barrière protectrice de l'aquifère rocheux. L'indice de vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère rocheux sur la Plaine côtière est généralement faible (moins de 100), mis à part sur les crêtes rocheuses perçant la couverture de dépôts meubles.

L'indice DRASTIC des aquifères granulaires à nappe libre n'a pu être calculé à l'échelle régionale. Cependant, plus localement, des indices DRASTIC ont été calculés pour l'aquifère alluvial de Matane et pour les piézomètres mis en place durant le projet. Ces indices DRASTIC sont compris entre 140 et plus de 180 et indiquent que ces aquifères granulaires à nappe libre sont très vulnérables à la contamination de surface.

Sur les Hautes-Terres, l'eau de l'aquifère rocheux est de type Ca-HCO₃, indiquant que l'eau souterraine provient d'une recharge récente. Sur la Plaine Côtière, l'eau des aquifères granulaires à nappe libre sont aussi de type bicarbonatée-calcique (Ca-HCO₃), ce qui indique une recharge récente provenant des précipitations et de la fonte des neiges. Par contre, dans les aquifères semi-confinés et confinés il y a présence de processus géochimiques tels que des échanges cationiques entre l'argile et les formations aquifères (granulaires ou rocheuses), ce qui explique que l'on peut retrouver à l'occasion une eau plus évoluée (Na-HCO₃) sur la Plaine Côtière. Seulement quelques

échantillons de type d'eau chlorurée-sodique (Na-Cl) ont été retrouvés dans l'aquifère rocheux à proximité de l'estuaire, et globalement les faibles valeurs de salinité indiquent qu'il n'y aurait pas de problème d'intrusion d'eau saline provenant de l'estuaire. Ces valeurs seraient plutôt le résultat d'une minéralisation des écoulements profonds provenant de l'amont hydraulique des Hautes-Terres.

La qualité de la ressource est généralement bonne à l'échelle régionale. Toutefois, des dépassements des objectifs esthétiques (OE) et des concentrations maximales acceptables (CMA) ont été notés. Les paramètres liés aux OE qui sont le plus fréquemment au-dessus de la limite recommandée sont le manganèse, le pH et le fer, et ce, autant dans l'aquifère rocheux que granulaire. Les concentrations de manganèse sont au-dessus de la limite recommandée dans 25% des puits de la région, celles en fer dans 10 % et le pH est trop alcalin ou trop basique dans 20 %. Ces dépassements ne sont toutefois pas excessifs par rapport à la limite établie. En ce qui concerne les CMA pour la santé humaine, des dépassements n'ont été notés que dans 0,9 % des puits échantillonnés. Les paramètres concernés sont principalement pour les fluorures et les nitrites-nitrates, mais également pour l'arsenic et l'antimoine. Six puits, dont quatre dans le roc, ont eu des dépassements en fluorures. Les six puits se trouvent en contexte semi-captif ou captif, ce qui laisse présager que la présence de fluorures est d'origine naturelle. Par contre, les nitrites-nitrates se retrouvent dans six puits situés en contexte de nappe libre autant pour l'aquifère rocheux que granulaire, ce qui laisse supposer une contamination d'origine anthropique.

Les formations géologiques du Bas-Saint-Laurent sont principalement schisteuses et sont associées à l'orogénèse taconienne. Ces roches sont tendres et ne comportent pas de grands réseaux de fractures. Elles peuvent répondre adéquatement aux besoins d'approvisionnement d'une maison unifamiliale mais, généralement, elles ne peuvent subvenir à l'approvisionnement d'une petite municipalité. La combinaison de plusieurs puits forés dans ces formations peut par contre être envisagé afin d'approvisionner un plus grand nombre de personnes. Au sud de la faille de Neigette, cependant, on retrouve quelques formations de calcaire, de grès et de conglomérat plus productives qui sont issues de l'orogénèse acadienne. Sur le territoire, les aquifères granulaires suffisamment productifs pour répondre aux besoins d'approvisionnement municipale sont peu nombreux. Ces aquifères sont en grande partie déjà exploités. Parmi eux, on retrouve les aquifères de Neigette où la ville de Rimouski s'approvisionne, celui de Price et celui de Sainte-Luce. L'aquifère alluvial de Matane dans lequel s'approvisionnent les municipalités de Matane et de Saint-René-de-Matane est le plus imposant du nord-est du Bas-Saint-Laurent.

Pour ce qui est de l'expertise, le projet PACES-NEBSL a contribué à la formation d'une douzaine de personnes aux concepts et à la mesure en hydrogéologie. Deux chargés de projet à temps plein ont piloté les échéanciers et la production des livrables. Ils ont supervisé près d'une dizaine d'étudiants au baccalauréat pour différentes phases de la réalisation des travaux. Six étudiants à la maîtrise ont été impliqués dans la production de données à intégrer dans le rapport PACES-NEBSL. Ce personnel hautement qualifié a contribué au développement et à la mise en place

d'une expertise qui n'existait pas à l'UQAR. Quelques articles dans des revues scientifiques avec comités de révision ont d'ailleurs été produits et publiés sur une thématique originale de recherche d'un continuum hydrologique entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans divers environnements.

Pour ce qui est du transfert des connaissances, le projet PACES-NEBSL a réalisé plus d'une vingtaine de rencontres et présentations (**Tableau 3.6**) rejoignant plus de 300 personnes de différentes sphères reliées à la gestion et à l'aménagement du territoire, à la concertation environnementale ou au milieu académique, et ce, sans compter les nombreuses discussions avec les citoyens lors des travaux terrain. Aussi, une activité de formation en hydrogéologie visant particulièrement les aménagistes du territoire, a été donnée par Renald McCormack (Envir'Eau Puits) en juin 2014. Cette formation, visait à les informer et à les éclairer sur les processus, les concepts et les législations provinciales en hydrogéologie. Enfin, une dernière série de présentation aux partenaires régionaux sera réalisée au printemps 2015 pour la présentation des résultats finaux du PACES-NEBSL.

8.2 Recommandations

Recommandations générales quant à la gestion de l'eau souterraine

- Alors que les politiques de gestion des ressources en eau s'intéressent aux eaux de surface et aux eaux souterraines comme des entités distinctes, il est clair aujourd'hui qu'elles ne forment qu'une même et unique ressource. Il est recommandé de considérer les eaux souterraines et les eaux de surfaces comme une même ressource en eau.
- Le PACES-NEBSL dresse un portrait des aquifères régionaux mais il ne présente en aucun cas leurs dynamiques annuelles (ou saisonnières) et leurs devenir face à différents changements, qu'ils soient anthropiques ou climatiques. Il est recommandé d'intégrer et de partager le suivi des niveaux d'eau et de la qualité de l'eau dans l'ensemble des puits d'observation municipaux et gouvernementaux.
- La gestion de la ressource en eau souterraine se fait par la participation et l'implication des instances mandatées. Il est recommandé d'assurer une concertation régionale entre les organismes mandatés et intéressés à assurer la gouvernance de la ressource en eau qu'elle soit souterraine ou de surface. Il est aussi recommandé de clarifier le rôle des organismes déjà présents sur le territoire dans cette concertation.
- Il est recommandé de partager les connaissances acquises dans le cadre du PACES-NEBSL par le biais d'ateliers de transferts et de formation tels ceux mis en place par le RQES.
- Il est recommandé d'encourager les travaux de caractérisation des eaux souterraines à travers des projets en partenariat avec des utilisateurs régionaux de la ressource. Le projet

mis en place avec la compagnie Terre-Eau Inc. via une bourse de maîtrise en milieu de travail (programme BMP) en est un bon exemple.

Recommandations quant à la quantité, la qualité et la vulnérabilité de l'eau souterraine

- Les cartes émanant du projet PACES-NESBL illustrent les composantes hydrogéologiques à l'échelle régionale. Elles ne peuvent remplacer les études requises pour définir les conditions hydrogéologiques à l'échelle locale. **Il est fortement recommandé d'éviter l'inférence à l'échelle locale d'informations générées à l'échelle régionale.**
- Il est recommandé de réaliser une étude complémentaire à l'échelle locale avant tout nouveau projet d'exploitation de l'eau souterraine ou activité susceptible d'avoir un impact sur la quantité et la qualité de la ressource.
- Les aquifères granulaires productifs et de dimensions appréciables pour l'approvisionnement municipale sont peu nombreux et très circonscrits sur le territoire du nord-est du Bas-Saint-Laurent. Il est donc recommandé de continuer d'assurer leur protection par un suivi des activités se déroulant dans les zones d'alimentation et par un suivi des niveaux piézométriques.
- L'aquifère alluvial de la vallée de la rivière Matane est l'aquifère granulaire le plus imposant du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent. Il est recommandé de raffiner sa caractérisation à l'échelle locale et mieux comprendre sa connectivité avec la Rivière Matane. L'analyse devra être étendue aux versants de la vallée et aux importants volumes de sédiments fluvioglaciers (terrasses de kame) qui y sont accrochés par endroits.
- La campagne de forage du PACES-NEBSL a permis de découvrir un aquifère avec un potentiel intéressant pour l'approvisionnement d'ordre municipale dans la vallée de la rivière Mitis. Il est recommandé de poursuivre les travaux d'exploration pour mieux connaître l'architecture et la zone de recharge de l'aquifère confiné du secteur de la station piézométrique 02190002 du réseau de suivi à Sainte-Angèle-de-Mérici et dans la portion amont de la vallée (secteur Sainte-Jeanne-D'Arc).
- Il est recommandé de mieux intégrer les connaissances acquises lors du PACES-NEBSL lors de la planification de l'aménagement du territoire; par exemple, i) considérer le rôle du développement urbain et des activités anthropiques sur l'imperméabilisation des zones de recharge; ou encore ii) considérer l'impact du développement agricole (drainage, épandages de produits chimiques, etc.) et forestier sur la qualité des eaux souterraines. Ces connaissances devraient être intégrées par les instances impliquées dans la gestion du territoire et de la ressource eau souterraine.
- La carte DRASTIC de ce projet a été calculée pour l'aquifère rocheux et ne peut être utilisée pour la vulnérabilité des aquifères de surface. Il est recommandé d'étudier localement les aquifères granulaires de surface pour y déterminer les indices drastiques comme le prévoit la réglementation.

- Il est recommandé d'encadrer toute activité susceptible d'affecter la qualité de l'aquifère alluvial de Matane en raison de sa grande vulnérabilité DRASTIC.
- Le PACES-NEBSL a relevé des dépassements partout sur le territoire, tant pour les critères esthétiques que pour les concentrations maximales acceptables pour la santé. Ainsi, il est recommandé de créer une base de données de la qualité de l'eau souterraine centralisée au MDDELCC pour chacun des puits qui est foré, au même titre que la base de données du SIH.

Recommandations scientifiques

- Il est recommandé de procéder à une étude spécifique sur le méthane (CH₄) et autres gaz associés (éthane, propane, hélium et radon) dans les eaux souterraines du territoire. Cette étude permettrait de spécifier l'origine du carbone inorganique dissous (CID) présent dans les eaux souterraines. Ces études devraient être amont de tout projet d'exploration des ressources naturelles non renouvelables.
- Il est recommandé de poursuivre l'échantillonnage d'eaux de pluie, souterraines et de neige pour bonifier la droite météorique des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) afin de mieux déterminer l'origine de l'eau souterraine ainsi que sa dynamique.
- Il est recommandé de poursuivre le suivi de la connectivité hydraulique entre l'eau souterraine et les eaux de surface pour les vallées de Matane et de Mitis. Plus précisément, il est recommandé de mieux délimiter la zone de mélange (zone hyporhéique) et l'extension maximale de l'influence d'une rivière dans les aquifères alluviaux. La délimitation de ces deux enveloppes devrait être intégrée dans les cadres de gestion des corridors fluviaux.
- La haute qualité des données recueillies dans le cadre du projet PACES-NEBSL permet d'envisager de développer et de tester des solutions analytiques et des modèles numériques. Il est recommandé de valoriser ces données en ce sens pour mettre en place des outils de prédiction/prévision pour la gestion de la ressource.

Recommandations relatives aux travaux PACES

- Il est recommandé de compléter la couverture des territoires municipalisés du Québec.
- Il est recommandé d'entreprendre la couverture des territoires non municipalisés, visés par des activités d'exploration et d'exploitation des ressources.
- Il est recommandé de développer un programme de formation axée sur la gestion de la ressource pour les élus, les gestionnaires et les professionnels qui sont responsables de la gestion, de la protection et de la conservation de l'eau souterraine.

- Il est recommandé d'assurer l'accessibilité et l'intégration des données existantes détenues par les différentes instances gouvernementales et privées pour la réalisation de futurs projets PACES.
- Il est recommandé que le MDDELCC poursuive la mise à jour des bases de données créées par les projets PACES.
- Il est recommandé de développer des outils de gestion de la ressource en fonction des enjeux régionaux.
- Il est recommandé d'assurer l'accessibilité des données et cartes générées dans le cadre des projets PACES du Québec aux gestionnaires de la ressource en eau souterraine.

RÉFÉRENCES

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R.J., and Hackett G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings: WWA/EPA Series, EPA-600/2-87-035.
- Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). 2008. Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique. Collection cours de formation no 32. 613 p.
- Agriculture Canada, 1989. Étude des sols défrichés du comté de Rimouski (Qué.), périmètre Saint-Simon / Sainte-Flavie / Les Hauteurs, Direction générale du développement agricole, Canada, 197 p.
- Andrews R. J., Lloyd J.W., Lerner D.N. 1997. Modelling of nitrate leaching from arable land into unsaturated soil and chalk : 1. Development of a management model for applications of sewage sludge and fertilizer. *J. Hydrol.*, 200, 179-197.
- Ballard, J-M., Carrier, M-A., Lefebvre, R., Bleser, J., Beaudin, I., Rivard, C. 2012. Protocole pour la préparation du livrable 26 – Utilisation de l'eau, Protocoles pour la production des livrables PACES, 10 p. + annexes.
- Banton, O., Cellier, I., Martin, D., Martin, M., Samson, J-C. 1995. Contexte social de la gestion des eaux souterraines au Québec. Québec. Rapport de l'INRS-Eau, 441 p.
- Bédard, P. 1993. Postglacial and pre-last-glacial weathering of till on the high plateaus of central Gaspésie, Québec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30: 1853-1860.
- Bédard, P. et David, P. P. 1991. La météorisation sur les hauts plateaux de la Gaspésie (Québec) : quelques aspects. *Géographie physique et Quaternaire*, 45(2) : 195-211.
- Bencala, K. E. 2005. Hyporheic Exchange Flows. in United States Geological Survey, [En ligne], (<http://water.usgs.gov/nrp/proj.bib/Publications/2005/bencala.2005.pdf>). Page consultée le 15 mars 2014.
- Bencala, K. E. 2000. Hyporheic zone hydrological processes. *Hydrological Processes*, Vol. 14, pp. 2797-2798.
- Bergström L. et Jarvis N.J. 1991. Prediction of nitrate leaching losses from arable land under different fertilization intensities using the SOIL-SOILN models. *Soil Use Manage.*, 7, 79-85.
- Beuret, J-E. et Cadoret, A.. 2011. Une gouvernance territoriale endogène de l'environnement : contours et enjeux. *Géographie, Économie, Société*, Vol. 13, p. 363-386.
- Bolduc S., Larocque M., Prichonnet G. 2006. Vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination par les nitrates sur le bassin versant de la rivière Noire (Montérégie, Québec), *Revue des sciences de l'eau*, vol.19, n°2, 87-99.
- Borns, H. W., Doner, L. A., Dorion, C. C., Jacobson, G. L. Jr., Kaplan, M. R., Kreutz, K. J., Lowell, T. V., Thompson, W. B. et Weddle, T. K., 2004. Deglaciation of Maine, USA, in J. Ehlers and P. Gibbard, eds., *Quaternary Glaciation-Extent and Chronology, Part II*. Elsevier, pp. 89-109.

Boucher, D. 1996. Analyse morphométrique des cones de dejection dans le Bas-Saint-Laurent/Gaspésie, Québec et dans les Alpes du Sud, France. Université du Québec à Rimouski, Mémoire de baccalauréat, 12 p.

Boulanger, M. 2004. Les politiques de protection de l'eau souterraine dans quatre municipalités. *Recherches sociographiques*, vol. 45, no 3, p. 549-567.

Boulton, A.J., Findlay, S., Marmonier, P., Stanley, E.H. & Valett, M. 1998. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 29, pp. 59-81.

Blanchette, D., Cloutier, V., Roy, M., Audet-Gagnon, F., Castelli, S., Beaudry, C. 2012, Protocole préliminaire de prélèvement d'échantillons d'eau souterraine, Protocoles pour la production des livrables PACES, 13 p. + annexes

Blanchette, D. 2012. Correspondance des classes de drainage IRDA-SIEF, Annexe A-5 du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue, Protocoles pour la production des livrables PACES, 5 p.

BPR. 2003. Analyse des questions d'approvisionnement en eau pour le secteur de l'agriculture. Programme national d'approvisionnement en eau. Province de Québec, 95 p.

Brunke, M. & Gonser, T. 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, Vol. 37, pp. 1-33.

Buffin-Bélanger, T., Cloutier, C-A., Tremblay, C., Chaillou, G., Larocque, M. *Accepté*. Attenuation, propagation and exfiltration of groundwater floodwaves in the gravelly floodplain of the Matane River, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*.

Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T., Dubé, J., Morneau, F. 2011. Cartographie des aléas fluviaux dans la vallée de la Matane par l'approche hydrogéomorphologique, volume 1 : guide d'interprétation. Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 21 p.

Bryant, C. et Desroches, S. 2008. Gouvernance et participation citoyenne dans la planification du développement territorial : Quelle place pour l'eau? Vers une gouvernance de l'eau au Québec, Québec : Éditions Multimondes, p. 245-260.

Busca, D. 2010. L'action publique agri-environnementale. La mise en œuvre négociée des dispositifs. Harmattan. Paris. 329 p.

Cadwell, D. H., 1978. Bedrock control of ice marginal positions in Central New York. *Geology*, 6: 278-280.

Caldwell, D. W., Hanson, L. S. et Thompson, W. B. 1985. Styles of deglaciation in central Maine, p. 45-58. *In* H. W. Borns, P. LaSalle et W. B. Thompson, *édit.*, Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec. Geological Society of America, Special paper 197, 159 p.

Canards illimités Canada. 2010. Classification des milieux humides et modélisation de la sauvagine dans le Québec forestier. Ressource électronique Données vectorielles, 1/ 20 000.

Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Parent, M., Ballard, J.-M., Benoit, N., Vigneault, H., Beaudry, C., Malet, X., Laurencelle, M., Gosselin, J.-S., Ladevèze, P., Thériault, R., Beaudin, I., Michaud, A., Pugin, A., Morin, R., Crow, H., Gloaguen, E., Bleser, J., Martin, A., Lavoie, D. 2013. Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Projet réalisé conjointement par l'INRS, la CGC, l'OBV Yamaska et l'IRDA dans le cadre du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, rapport final INRS R-1433, soumis en juin 2013.

Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Rivard, C., Beaudin, I., St-Laurent, I. 2012. Protocole pour la préparation du livrable 11 – Pédologie. Protocoles pour la production des livrables PACES, 6 p. + annexes.

Chalmers, R., 1898. Surface geology and auriferous deposits of southeastern Quebec; Geological Survey of Canada, Annual Report for year 1897, v. 10, Part J, p. 1-160.

Chalmers, R. 1906. Surface geology of eastern Quebec; Geological Survey of Canada, Annual Report for 1904, Part A, p. 250-263.

Chauvin, L., Martineau, G. et LaSalle, P. 1985. Deglaciation of the Lower St. Lawrence Region, Québec, p. 111-123. In H. W. Borns, P. LaSalle et W. B. Thompson, édit., Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec. Geological Society of America, Special paper 197.

Clark I. et P. Fritz. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. CRC Press LLC. Florida. 328 p.

Cloutier, C.-A. 2013. Vers l'analyse à haute résolution spatiale et temporelle de la connectivité entre une rivière et son aquifère alluvial lors d'évènements de crue. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski.

Cloutier, C.-A., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M. 2014. Controls of groundwater floodwave propagation in a gravelly floodplain. *Journal of Hydrology*, 511: 423-431. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.014.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M. M., Bourque, E., Therrien, R. 2006. Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*. 14: 573-590.

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

Coleman, A. P. 1922. Physiography and glacial geology of Gaspé Peninsula, Québec. CGC, Bulletin 34, 52 p.

Coll, D. 1994. Aperçu géomorphologique du Quaternaire de la vallée inférieure de la Matane. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, Québec, 94 p.

Conférence régionale des élus du Bas-Saint-Laurent (CRÉBSL). 2015. Site internet consulté le 16-03-2015, <http://www.crebsl.org/ressources-naturelles/communautes-et-territoire>

- Conseil des Académies Canadiennes (CAC). 2009. La gestion durable des eaux souterraines au Canada, Gouvernement du Canada, 292 p.
- Cook, P.G., Lamontagne, S., Berhane, D., & Clark, J.F. (2006). Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers ^{222}Rn and SF_6 . *Water Resources Research*, Octobre 2006, Volume 42, pp 1-12.
- Couillard, L. et Grondin, P. 1986. La végétation des milieux humides du Québec. Les publications du Québec, Québec. 400 p.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, vol. 133, p. 1709-1703.
- Custodio, E. et Bruggerman, K.A. 1987. Groundwater problems in coastal areas, UNESCO, Paris.
- Datry, T., Dole-Olivier, M-J., Marmonier, P., Claret, C., Perrin, J-F., Lafont, M. & Breil, P. 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries - E A T*, n° 54, pp 3 à 18.
- David, P. P. et Leblais, J., 1985. Glacial maximum and deglaciation of western Gaspé, Québec, Canada, p. 85-109. In H. W. Borns, P. LaSalle et W. B. Thompson, édit., *Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec*. Geological Society of America, Special paper, 197 p.
- De Loe, R.C. et Kreutzwiser, R. D. 2005. Closing the groundwater protection implementation gap. *Geoforum*, vol. 36, p. 241–256.
- De Loe, R.C, Di Giantomasso, S.E. et Kreutzwiser, R. D. 2002. Research. Local Capacity for Groundwater Protection in Ontario. *Environmental Management*, Vol. 29, No 2, p. 217–233.
- Delin S. et Stenberg M. 2014. Effect of nitrogen fertilization on nitrate leaching in relation to grain yield response on loamy sand in Sweden. *European Journal of Agronomy* 52, Part B(0): 291-296
- Desmarais, L. 1988. Géologie et geomorphologie quaternaire: Secteur du lac Matapédia et de la rivière Mitis (Québec); *Memoire de maitrise*, Université du Québec à Montreal, 140 p.
- Dingman, S.L. 2002. *Physical hydrology*, Waveland Press, Inc. Deuxième édition, 646 p.
- Dion, D.-J. et Maranda, R. 1978. *Levé géotechnique de la région de Rimouski*. Ministère des richesses naturelles, Québec, DPV-580, 31 p. + une carte h.-t.
- Dionne, J.-C. 1968. Carte morpho-sédimentologique de la région de Trois- Pistoles. *Revue de Géographie de Montréal*, 22 : 55-64.
- Dionne, J.-C. 1972a. Le Quaternaire de la région de Rivière-du-Loup/Trois-Pistoles, côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec. Centre de Recherches forestières des Laurentides, rapport d'information QF-X-27, 95 p.
- Dionne, J.-C. 1972b. Caractéristiques des blocs erratiques des rives de l'estuaire du Saint-Laurent. *Revue de géographie de Montréal*, 26 : 125-152.

- Dionne, J.-C. 1977. La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31 : 61-80.
- Dionne, J.-C. 1988a. Holocene relative sea-level fluctuations in the St. Lawrence Estuary, Québec, Canada. *Quaternary Research*, 29, 233-244.
- Dionne, J.-C. 1988b. Évidence d'un bas niveau marin à l'Holocène à Saint-Fabien-sur-Mer, estuaire maritime du Saint-Laurent. *Norois*, 35: 19-34.
- Dionne, J.-C. 1993. Écoulement tardi-glaciaire à l'île aux Lièvres et îlots avoisinants, moyen estuaire du Saint-Laurent. Congrès annuel de l'AQQUA (Québec), Résumés, *Bulletin de l'AQQUA*, 19, (1): 12.
- Dionne, J.-C. 1997. Bilan vicennal des connaissances sur la Mer de Goldthwait. *Bulletin de l'Association québécoise pour l'étude du Quaternaire*, 23(1): 6-20.
- Dionne, J.-C. 1999 : Indices de fluctuations mineures du niveau marin relatif à l'Holocène supérieur, à L'Isle-Verte, côte sud de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 53 : 277-285.
- Dionne, J.-C. 2001a. Traces du dernier épisode glaciaire à l'île aux Lièvres, Estuaire du Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 125(2) : 43-48.
- Dionne, J.-C. 2001b. Relative sea-level changes in the St. Lawrence estuary from glaciation to present day, p. 271-284, *in* : T. K. Weddle et M. J. Retelle, édité., *Deglacial history and relative sea-level changes, Northern New England and adjacent Canada*, Geological Society of America, Special Paper 351, 292 p.
- Dionne, J.-C. 2002a. Une nouvelle courbe du niveau marin relatif pour la région de Rivière-du-Loup (Québec). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, n° 1, p. 33-44.
- Dionne, J.-C. 2002b : État des connaissances sur la ligne de rivage Micmac de J. W. Goldthwait (estuaire du Saint-Laurent). *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, n° 1, p. 97-121.
- Dionne, J.-C. 2007. La batture de l'anse au Sable à Rimouski : un estran typique de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 61, n° 2-3, p. 195-210.
- Dionne, J.-C. 2011. Les méga-blocs de la batture entre Sainte-Luce-sur-Mer et Sainte-Flavie, estuaire du Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 135 (2) : 49-56.
- Dionne, J.-C. et Coll, D. 1995. Le niveau marin relatif dans la région de Matane (Québec), de la déglaciation à nos jours. *Géographie physique et Quaternaire*, 49(3) : 363-380.
- Dionne, J.-C et Pfalzgraf, F. 2001. Fluctuations holocènes du niveau marin relatif à Rivière-Ouelle, côte sud du moyen estuaire du Saint-Laurent : données complémentaires. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 55, n° 3, p. 289-300.
- Dionne, J.-C. et Poitras, S. 1998a. Lithologie des cailloux de la baie de Mitis, rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent: un exemple de transport glaciaire et glacial complexe. *Géographie physique et Quaternaire*, 52 : 107-122.

- Dionne, J.-C. et Héroux, R. 1966. Cartes morpho-sédimentologiques du Bas Saint Laurent/Gaspésie. Bureau d'Aménagement de l'Est du Québec (BAEQ), Mont-Joli, cartes manuscrites à 1 / 50 000.
- Direction générale du Bas-Saint-Laurent du ministère des Ressources naturelles et de la faune. (2010) Portrait Territorial – Bas-Saint-Laurent. 117p.
- Dorion, C.C., Balco, G. A., Kaplan, M. R., Krutz, K. J., Wright, J. D. et Borns, H. W., Jr. 2001. Stratigraphy, paleoceanography, chronology, and environment during deglaciation of eastern Maine, p. 215-242, in : T. K. Weddle et M. J. Retelle, édit., Deglacial history and relative sea-level changes, Northern New England and adjacent Canada, Geological Society of America, Special Paper 351, 292 p.
- Drainville, L. 2013. Maintien de la qualité de l'eau potable et des activités agricoles dans le bassin versant des ouvrages de captage de l'eau de la municipalité de Sainte-Luce. Devis de recherche scientifique. Terre-Eau. Saint-Joseph-de-Lepage. 28 p.
- Drainville, L. 2013. Synthèse des activités agricoles 2012 au sein des zones de protection du bassin de captage de l'eau potable de la municipalité de Sainte-Luce. Rapport technico-agronomique et biologique. Terre-Eau. Saint-Joseph-de-Lepage. 18 p.
- Dumais, P., Poirier, J., Rousseau, G. 1998. La préhistoire du Témiscouata, trente ans plus tard, Paléo-Québec – L'éveilleur et l'ambassadeur – Essais archéologiques et ethnohistoriques en hommage à Charles A. Martijn, 27, Recherches Amérindiennes au Québec, Montréal, p. 53-80.
- Dyck, J. G. et Blake, W., Jr. 1965. GSC radiocarbon dates IV. Geological Survey of Canada, Paper 65-4, 23 p.
- EIEQ, 2015. Région Bas-Saint-Laurent. <http://www.economie.gouv.qc.ca/pages-regionales/bas-saint-laurent/creneaux-dexcellence/tourbe-et-agroenvironnement/> (page consultée le 7 février 2015).
- Elson, J. A. 1969. Late Quaternary marine submergence of Québec. *Revue de Géographie de Montréal*, XXIII : 247-259.
- Environment Agency. 2009. The Hyporheic Handbook. Science report SC050070, Hyporheic Network, Integrated catchment science program, October, Bristol, ISBN: 978-1-84911-131-7.
- Fauveau, E, 2006. Caractérisation hydrogéologique et identification de faciès des dépôts meubles par enfoncement direct et forage par rotoperçusion. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 170 p.
- Ferguson G. et Gleeson T. 2012 Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change, *Nature climate change*, vol.2. 342-345. Doi : 10.1038/nclimate1413.
- Frank, J. et Stuanes, A.O. 2003. Short-terms effect of liming and vitality fertilization on forest soil and nutrient leaching in a Scot Pines Ecosystem in Norway". *Forest ecology and management*, 176, 371-386.
- Gagnon, D. 2004. La forêt naturelle du Québec, un survol. Rapport préparé pour la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise. Groupe de recherche en écologie forestière interuniversitaire Université du Québec à Montréal. 74 p.

Garneau, M. 1987. Reconstitution paléoécologique d'une tourbière littorale de l'estuaire du Saint-Laurent : analyse macrofossile et sporopollinique. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 41(1) : 109-125.

Gauthier, R. et Grandtner, M.M. 1975. Étude phytosociologique des tourbières du Bas-Saint-Laurent, Québec. *Nat. Can. (Que.)*, 102: 109–153.

Gerath, R. F., Fowler, B. K. et Haselton, G. M., 1985. The deglaciation of the northern White Mountains of New Hampshire, p. 21-28. In H. W. Borns, P. LaSalle et W. B. Thompson, édit., *Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec*, Geological Society of America, Special paper 197.

Giroux I. 2002. Contamination de l'eau par les pesticides dans les régions de culture de maïs et de soja au Québec – Résultats des campagnes d'échantillonnage 1999, 2000 et 2001, et évolution temporelle de 1992 à 2001. Ministère de l'environnement du Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, Canada, 54 pages.

Gröning, M., Lutz, H.O., Roller-Lutz, Z., Kralik, M., Gourcy, L., Pöltstein, L. 2012. A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for ^{18}O and ^2H analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*, 448-449, pp. 195-200.

Grootjans A.P., Hartog P.S., Fresco L.F.M., Esselink H. 1991, Succession and fluctuation in a wet dune slack in relation to hydrological changes, *Journal of Vegetation Science* 2: 545-554.

Grootjans A.P., Sival F., Stuyfzand, P. 1996. Hydro-geochemical analysis of a degraded dune slack, *Vegetatio* 126 : 27-38.

Groupe scientifique sur l'eau. 2003. Institut National de santé publique au Québec. « Fiche technique nitrite/nitrate »

Guilcher, A., 1981. Cryoplanation littorale et cordons glaciels de basse mer dans la région de Rimouski, côte sud de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec, *éographie physique et Quaternaire*, vol. 35, n° 2, p. 155-169.

Freeze, R.A. et Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*, Englewood Cliff, Prentice Hall.

Hallbacken L. et Zhang L.Q. 1997. Effect of experimental acidification, nitrogen addition and liming on ground vegetation in a mature stand of Norway in SE Sweden, *Forest ecology and management*, 108, 201-213.

Herbert, V., Maillefert, M., Petit, O. et Zuindeau, B. 2009. Risque environnemental et action collective : l'exemple de la gestion du risque d'érosion à Wissant (Côte d'Opale). *VertigO – La revue en sciences de l'environnement*, vol.9, no 3, 16 p.

Héту, B. 1987. Grèzes litées, p. 24-26, *in* : Gray, J. T. & 19 collaborateurs, 1987. *Processus et paléoenvironnements du Quaternaire dans la péninsule gaspésienne et le Bas-Saint-Laurent*. XII^e congrès de l'INQUA, Excursion C-4, CRSNG, 85 p.

Héту, B. 1994. Déglaciation, émergence des terres et pergélisol tardiglaciaire dans la région de Rimouski, Québec. *Paléo-Québec*, 22 : 3-48.

Hétu, B. 1998. La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-Saint-Laurent (Québec) : indices d'une récurrence glaciaire dans la Mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. *Géographie physique et Quaternaire*, 52(3) : 325-347.

Hétu, B. 2008. Paléohydrologie à l'Holocène supérieur dans l'Est du Québec (Canada). *Géomorphologie – Relief, Processus, Environnement*, 1 : 45-58.

Hétu, B. et Bail, P. 1996. Évolution postglaciaire du régime hydrosédimentaire et vitesse de l'ablation dans un petit bassin-versant des Appalaches près de Rimouski (Bas-Saint-Laurent, Québec), *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50, n° 3, p. 351-363.

Hétu, B. et Gray, J. T. 2002. L'apport de la géomorphologie à l'archéologie paléoindienne dans l'est du Québec : une géoarchéologie à (ré-)inventer ? *Recherches amérindiennes au Québec*, 32(3) : 76-90.

Houde-Poirier, M.. 2014. Écoulements glaciaires au Wisconsinien supérieur, déglaciation et variations du niveau marin relatif dans la région de Gaspé, Québec. Université du Québec à Rimouski, Mémoire de maîtrise, 161 p.

Hvorslev, M.J. 1951. Time lag and soil permeability in groundwater observation. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experimental Station, Vicksburg, Miss., Bulletin 365.

Jolicoeur, M. 2007. Étude de faisabilité du système de captage de 1000 GUSM jumelé à des installations de recharge artificielle, Rapport déposé à Municipalité du village de Trois-Pistoles, 36 p. + annexes.

Jolicoeur, M. 2007. Étude hydrogéologique, Rapport d'aménagement des puits F.E. 1/04 (150mm) et P.E. 1/04 (300 mm). Rapport déposé à la municipalité de Saint-Jean-de-Dieu, 8 p. + annexes.

Kelley C.J., Keller C.K., Evans, R.D., Orr C.H., Smith J.L., Harlow B.A. 2013. Nitrate-nitrogen and oxygen isotope ratios for identification of nitrate sources and dominant nitrogen cycle processes in a tile-drained dryland agricultural field, Elsevier, *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 731-738.

Kelley, K. R. et Stevenson, F. J. 1995. Forms and nature of organic N in soil. *Fertilizer research*, 42(1-3): 1-11.

Kiewiet de Jonge, E. J. C. 1951. Glacial water levels in the St. John River Valley. Thèse de doctorat, Université Clark, Worcester, Mass., 116 p.

Kite, J.S., 1983. Late Quaternary glacial, lacustrine, and alluvial geology of the upper St. John river basin, northwestern Maine and adjacent Canada. Thèse de doctorat (Ph. D.), University of Wisconsin at Madison, 339 p.

Kite, J.S., Lowell, T. V. et Stuckenrath, R., 1981. Late Wisconsin residual ice cap, evidence from northwestern Maine. *Geological Society of America, Annual Meeting, Northcentral section, Abstracts with programs*, v. 13, p. 488.

Kite, J.S. et Stuckenrath, R., 1989. Postglacial evolution of drainage in the middle and upper St. John river bassin, Maine and New Brunswick. In: M.G. Survey (Édit.), *Studies in Maine Geology*, pp. 135-142.

Institut nationale de la statistique du Québec, 2014. *Panorama des regions du Québec*, 176 pages.

International Atomic Energy Agency, 2002. Special issue on the global network of isotopes in precipitations. *Water & Environment Newsletter*, Issue 16, November, ISSN 1020-7120.

Lamontagne, S., Taylor, A.R., Cook, P. G. & Hamilton, S. 2011. Interconnection of Surface and Groundwater Systems – River Losses from Losing/Disconnected Streams, Macquarie River Site Report. CSIRO, Water for a Healthy Country Flagship Report series ISSN: 1835-095X.

Lasserre F., Razack M. et Banton O.1999. A GISlinked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater. *J. Hydrol.*, 224, 81-90.

Larocque, A., Dubois, J.-M. M. et Leblon, B. 2003. A methodology to reconstruct small and short-lived ice-dammed lakes in the Appalachians of Southern Quebec. *Quaternary International* 99-100 : 59–71

Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L., Meyzonnat, G. 2013. *Projet de connaissances des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour, Rapport final*. Université du Québec à Montréal, 187 p.

Lavoie, C. Zimmermann, C. et Pellerin, S. 2001. Peatland restoration in southern Québec (Canada): A paleoecological perspective. *Écoscience*, 8 (2) : 247-258.

Lavoie, R., Lebel, A., Joerin, F., Rodriguez, M.J. 2013. Integration of groundwater information into decision making for regional planning: A portrait for North America. *Journal of Environmental Management*, vol. 114, no 1, p.496-504.

Lebuis, J. 197. *Géologie du Quaternaire de la region de Matane-Amqui, Comte de Matane et Matapedia, Quebec*; Ministère des Richesses naturelles du Quebec, DP-21, 18 p.

Lebuis, J. et David, P. P. 1977. La stratigraphie et les événements du Quaternaire de la partie occidentale de la Gaspésie. *Géographie physique et Quaternaire*, 31 (3-4): 275-296.

Lee, H. A. 1955. Surficial geology of Edmundston, Madawaska, and Temiscouata counties, New Brunswick and Quebec. Geological survey of Canada, paper 55-15.

Lee, H. A. 1959. Surficial geology of Grand Falls, Madawaska, and Victoria Counties, New Brunswick. Geological survey of Canada, Map 24-1959.

Lee, H. A. 1962. Surficial geology of Rivière-du-Loup/Trois-Pistoles Area, Québec. Geological Survey of Canada, Paper 61-32, 2 p.

Letourneau, A. 2009. Les théories de la gouvernance : pluralité de discours et enjeux éthiques. *VertigO – La revue en sciences de l’environnement, Hors-série*. 6 p.

Locat, J. 1976. Quaternary geology of the Baie-des-Sables/Trois-Pistoles area, Québec, with some emphasis on the Goldthwait sea clay. Thèse de M.Sc., University of Waterloo, 214 p.

Locat, J. 1977. L'émersion des terres dans la région de Baie-des-Sables/Trois- Pistoles, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31 : 297-306.

Locat, J. 1978. Le Quaternaire de la région de Baie-des-Sables—Trois-Pistoles. Ministère des Richesses naturelles, Québec, DPD-605, 64 p.

Lortie, G. et Guilbault, J.P. 1984. Les diatomées et les foraminifères de sédiments marins postglaciaires du Bas-Saint-Laurent (Québec): analyse comparée des assemblages. *Naturaliste canadien*, 111: 297-310.

Lortie, G. et Martineau, G. 1987 : Les systèmes de stries glaciaires dans les Appalaches du Québec, ministère de l'énergie et des Ressources du Québec, DV 85-10, 45 p., 1 carte.

Lowell, T. V. 1985. Late Wisconsin ice-flow reversal and deglaciation, northwestern Maine, p. 71-83. In: H. W. Borns, P. LaSalle et W. B. Thompson, édit., *Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec*, Geological Society of America, Special paper 197, p. 85-109.

Maillefert, M. 2009. Action collective territoriale et modèles de développement régional : le cas de trois sites de la région nord-pas de calais. *Vertigo- La revue en sciences de l'environnement*, vol. 9, no 2, 15 p.

Marchand, J.-P., Buffin-Bélanger, T., Héту, B. et St-Onge, G. 2014. Stratigraphy and infill history of the glacially eroded Matane River Valley, eastern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51, 2, 105-124.

Martineau, G. 1977. Géologie des dépôts meubles de la région de Kamouraska–Rivière-du-Loup. Ministère des Richesses naturelles du Québec, DPV-545, 17 p.

Martineau, G. 1979a. Dépôts meubles de la région de Rimouski — Trois-Pistoles. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DPV - 717, 10 p., 1 carte (1/100 000).

Martineau, G. 1979b. Géologie des dépôts meubles de la région du Lac Témiscouata. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, DPV - 618, 18 p., 1 carte (1/100 000).

Martineau, G. et Corbeil, P. 1983. Réinterprétation d'un segment de la moraine de Saint-Antonin, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 37 (2) : 217-221.

McCormack, R. 1978. Hydrologéologie de Rivière-du-Loup – Trois-Pistoles, Ministères des richesses naturelles, Direction générale des eaux, Québec, rapport H.G.-10, 49 p. + une carte h.-t.

Mertes, L.A.K. 1997. Documentation and significance of the perirheic zone on inundated floodplains. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 7, pages 1749-1762.

Meyzonnat, G., Larocque, M. 2011. Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine sur la zone Bécancour (Centre-du-Québec). *Geohydro*. 7 p.

Milot, N. 2009. Institutionnaliser la collaboration : planifier le recours aux approches collaboratives en environnement. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol.9, no 1, 10 p.

Ministère des Affaires municipales et des Régions (MAMR). (2008). Pour une plus grande prospérité et vitalité de nos municipalités – Plan d'action gouvernemental à l'intention des municipalités dévitalisées. 60 p.

Ministère des Affaires Municipales et Occupation du Territoire (MAMOT). 2015. Site internet consulté le 16-03-2015 <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/repertoire-des-municipalites/>

Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation. 1979. Étude pédologique du comté de Rivière-du-Loup. 116p.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). 2014. site internet consulté le 31-10-2014 <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/Eau/souterraines/puits/demystifier.htm#statistiques>

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). 2011. Guide des conditions générales, troisième appel de propositions du programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines. Gouvernement du Québec, ISBN : 978-2-550-53934-6, 21 p.

Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC). 2015. Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection. Site internet. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/prelevements/reglement-prelevement-protection/index.htm>

Ministère de l'Environnement du Québec (MENV). 2004. Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé. Ministère de l'environnement du Québec, Québec, Canada

Ministère des Ressources Naturelles (MRN) (visité : 2012) Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp#sapBouleauJaune>.

Mijangos I., Albizu I., Epelde L., Amezaga., Mendarte S., Garbisu, 2010. Effects of liming on soil properties and plant performance of temperate mountainous grassland, *Journal of Environmental Management*, 91, 2066-2074

Mission HGE. 2005. Levés de géophysique combinés sismique-réfraction et résistivité électrique, Rapport déposé à la Municipalité du Bic, 24 p. + annexes

Mission HGE. 2007. Aires de protection autour des ouvrage de captage pour l'approvisionnement en eau des municipalités de Luceville et de Sainte-Luce N/Réf : 06245-101 – Rapport technique. Gilles Michaud. 29 pages + annexes.

Mission HGE. 2012. Rapport technique-Suivi de la nappe aquifère 2012, municipalité de Ste-Luce. Gilles Michaud. 56 pages + annexes.

Monfet, J. 1979. Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'hydrométrie, Gouvernement du Québec, 39 p.

Newman, W. A., Genes, A. N. et Brewer, T. 1985. Pleistocene geology of northeastern Maine. In H. W. Borns, P. LaSalle et W. B. Thompson, édit., *Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec*, p. 59-70. Geological Society of America, Special paper 197.

Occhiotti, S. 1989. Géologie quaternaire de la sous-région de la vallée du Saint-Laurent et des Appalaches, p. 374-407. In R. J. Fulton, édit., *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*, Commission géologique du Canada, Géologie du Canada 1.

Occhiotti, S., Parent, M., Lajeunesse, P., Robert, F., Govare, É. 2011. Late Pleistocene-Early Holocene decay of the Laurentide Ice Sheet in Québec-Labrador, p. 601-630, in : J. Ehlers, P.L. Gibbard et P.D. Hughes, editors: *Developments in Quaternary Science*, Vol. 15, Amsterdam, The Netherlands.

Organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent, 2011. *Portrait préliminaire de la zone de l'organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent*, 122 p.

Oudin, L., Michel, C. & Anctil, F. 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 – Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *J. Hydrol.* 303(1-4), 275-289, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.025.

Pellerin, S. et Lavoie, C. 2000. Peatland fragments of southern Quebec: recent evolution of their vegetation structure. *Can. J. Bot.* 78: 255–265.

Pellerin, S. et Lavoie, C. 2003. Recent expansion of jack pine in peatlands of southeastern Québec: A paleoecological study. *Écoscience*, 10 (2): 247-257.

Pinti, D.L., Gélinas, Y., Larocque, M., Hélie, J-F., Lefebvre, R., Retailleau, S., Moritz, A., Barnetche, D. 2014. Concentration et source de méthane naturel dans les eaux souterraines des Basses Terres du Saint-Laurent. Audience du BAPE sur les shales gazéifères, Saint-Hyacinthe.
Primeau S. et Grimard Y. 1989. *Rivière Yamaska 1975-1988, vol2 : Résultats complémentaires sur la qualité des eaux*. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, Sainte-Foy, Québec.

Poirier, C., Fortier Filion, T.-C., Turcotte, R., Lacombe, P. (2012). Apports verticaux journaliers estimés 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, 112 p.

Prichonnet, G. et Desmarais, L. 1985: Remarques sur les mouvements et la dispersion glaciaire du Wisconsinien en Gaspésie (Québec); dans *Recherches en cours*, Partie B; Commission géologique du Canada, Etude 85-1 B, p. 531-540.

Prichonnet, G. 1995. Géologie et géochronologie postglaciaire dans la région limitrophe de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent, Québec. Commission géologique du Canada, Bulletin 488, 69 p.

Pronk, A. G., Bobrowsky, P. T. et Parkhill, M. A. 1989. An interpretation of late Quaternary glacial flow indicators in the Baie des Chaleurs region, northern New Brunswick. *Géographie physique et Quaternaire*, 43 : 179-190.

Rappol, M. 1989. Glacial history and stratigraphy of northwestern New Brunswick. *Géographie physique et Quaternaire*, 43 : 191-206.

Rappol, M. 1993. Ice flow and glacial transport in Lower St. Lawrence, Québec. Geological Survey of Canada, Paper 90-19, 28 p.

Rappol, M. et Russell, H. 1989: Glacial dispersal of Precambrian Shield and local Appalachian rocks in the lower St. Lawrence region in western Gaspésie, Quebec, and in adjacent New Brunswick; Current Research, Part B; Geological Survey of Canada, Paper 89-1 B, p. 127- 136.

Raynauld, M., Peel, M., Lefebvre, r., Crow, H., Molson, J., Ahad, J. et Gloagen, E. 2014. Caractérisation hydrogéologique du secteur Haldimand. Rapport de recherche R-1497. 227p.

Richard, P. J. H. et Larouche, A. 1994. Histoire postglaciaire de la végétation et du climat dans la région de Rimouski, Québec. *Paléo-Québec*, 22: 49-111.

Richard, P. J. H., Veillette, J., Larouche, A. C., Héту, B., Gray, J. T. et Gangloff, P., 1997. Chronologie de la déglaciation en Gaspésie : nouvelles données et implications. *Géographie physique et Quaternaire*, 51(2) : 163-184.

Rivard, C., Carrier, M-A., Lefebvre, R. 2012. Protocole pour la préparation du Livrable 22- Vulnérabilité de l'aquifère de roc régional. Protocoles pour la production des livrables PACES, 18 p.

Robins N.S., Pye K., Wallace H. 2013. Dynamic coastal dune spit: the impact of morphological change on dune slacks at Whiteford Burrows, South Wales, UK, *Journal of Coastal Conservation* 17: 473-482.

Santé Canada. 2014. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada – Tableau sommaire. Bureau de la qualité de l'eau et de l'air, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario.

Schmidt, A., Schlueter, M., Melles, M., Schubert, M. 2008. Continuous and discrete on-site detection of radon-222 in ground- and surface waters by means of an extraction module. *Applied Radiation and Isotopes* 66, p.1939-1944.

Sebilo M., Mayer B., Nicolardot B., Pinay G., Mariotti A. 2013. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol.10 , no.45, 18185-18189.

Sierra, A. et Lewis, N. 2009. Gouvernance sur le territoire. Un regard attentif à la concertation du pouvoir. *VertigO – La revue en sciences de l'environnement*. Hors-Série 6. 8 p.

Shaw, J., Piper, D. J. W., Fader, G. B. J., King, E. L., Todd, B. J., Belt, T., Batterson, M. J. et Liverman, D. G. E., 2006. A conceptual model of the deglaciation of Atlantic Canada. *Quaternary Science Reviews*, 25, p. 2059–2081.

Shilts, W. W., Rappol, M. & Blais, A., 1992. Evidence of late and postglacial seismic activity in the Témiscouata- Madawaska Valley, Quebec - New Brunswick, Canada. *Can. J. Earth Sci.* 29, 1043-1069.

- Shilts, W. W., Blais, A. & Adams, J., 1989. Subbottom profiling of Quebec Appalachian lakes and its potential application to assessing seismic hazard. Geological society of Canada, Current research, part B, Paper 89-1B, p. 143-154.
- Stratford C.J., Robins N.S., Clarke D., Jones L, Weaver G. 2013. An ecohydrological review of dune slacks on the west coast of England and Wales, *Ecohydrol* 6: 162-171.
- Stoker, G. 1998. Governance as theory: five propositions. *International social science journal*. Vol.50, no 155, p.17-28.
- Squillace, P.J.1996. Observed and Simulated Movement of Bank-Storage Water. *Groundwater*, Vol. 34, No. 1, January-February, pp. 121-134.
- Therrien, P et Comeau, G. 2012. Protocole pour la préparation du livrable 4 Pente, Université Laval. Protocoles pour la production des livrables PACES, 5 p.
- Sylvestre, B. et Rodriguez, M.J. 2008. Protection strategies for drinking groundwater sources in small Quebec municipalites. *Journal of Environmental Management* vol. 88, no 1, p. 28-42.
- Theis, C.V. 1963. Estimating the transmissivity of a water table aquifer from the specific capacity of a well. U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1536-I:332-36.
- Theys, J. 2002. La Gouvernance, entre innovation et impuissance : Le cas de l'environnement, Développement durable et territoires. Dossier 2. 28 p.
- Veillette, J. et Cloutier, M., 1993. Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec, Commission géologique du Canada, carte 1804A, échelle 1/250 000.
- Veillette, J.j., Cloutier, M., Héту, B., Cloutier, C.-A., Houde-Poirier, M., Paradis, S.J. et Buffin-Bélangier, T. (en préparation). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire du Bas Saint-Laurent, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier public XXXXX, échelle 1:250 000.
- Vouillamoz J-M., Hoareau J., Grammare M., Caron D., Nandagiri L., Legchenko A. 2012, Quantifying aquifer properties and freshwater resource in costal barries : a hydrogeophysical approach applied ay Sasihithlu (Karnataka state, India), *Hydrology and Earth System Sciences* 16 : 4387-4400.
- Vrba, J. et Zaporozec, A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Verlag HeinzHeise, Hannover, Germany, International Contributions to Hydrogeology, Vol. 16, 131 p.
- White, D.S. 1993. Perspectives of Defining and Delineating Hyporheic Zones. *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 12, No. 1, Mars, pp. 61-69.
- Wong, M.T.F. et Nortcliff, S. 1995. Seasonal fluctuations of native available N and soil management implications. *Fertilizer Research* 42, 13-26.
- Woessner, W.W. 2000. Stream and Fluvial Plain Groundwater Interactions: Rescaling Hydrogeologic Thought. *Groundwater*. Vol. 38, No. 3, Mai-Juin, pp. 423-429.

Wondzell, S. M. & Gooseff, M. N. 2013. Geomorphic Controls on Hyporheic Exchange Across Scales: Watersheds to Particules. in John F. Shroder (dir.), *Treatise on Geomorphology* Volume 9, Omaha, NE, USA, pp. 204-218.

