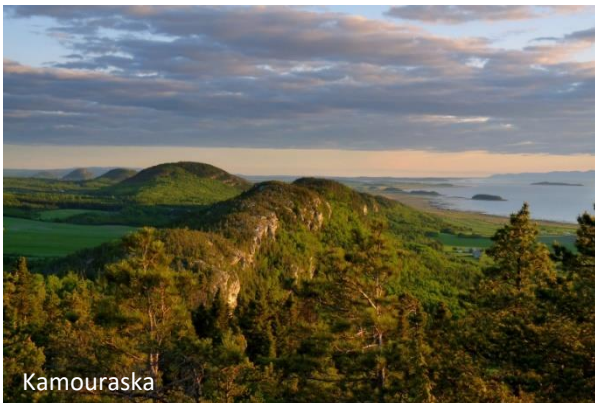


Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines

Kamouraska – Rivière-du-Loup – Témiscouata

Rapport final

2022



Kamouraska



Rivière-du-Loup



Témiscouata



Projet d'acquisition
des connaissances sur les
eaux souterraines

Kamouraska – Rivière-du-Loup – Témiscouata

ÉQUIPE DE RÉALISATION DE L'UQAR

Coordination et révision

Thomas Buffin-Bélanger, professeur
Gwénaëlle Chaillou, professeure

Compilation des données et rédaction

Gwendoline Tommi-Morin, B.Sc. Chimie de l'environnement
Claude-André Cloutier, M.Sc. Géographie
Charles-Édouard Deschamps, Ph.D. Océanographique
Jérôme Dubé, M.Sc, auxiliaire de recherche et d'enseignement
Laura Gatel, Ph.D. Hydrogéologie

Collaborateurs

Marie-Andrée Roy, technicienne en géomatique
Bernard Hétu, professeur en géographie

Assistants et assistantes de terrain

Frédéric Bélanger, B.Sc. chimie
Sophie Bouchard-Skiffington
Olivier Boudreault
Juliette Fournier, B.Sc.
Étienne Gariepy-Girouard, B.Sc.
Olivier Hérard, B.Sc. biochimie
Samuel Laroche, B.Sc. géographie
Matthieu Prugne, B.Sc.

Référence de ce rapport

Tommi-Morin G., Deschamps C.-E., Dubé, J., Buffin-Bélanger T., Chaillou G. (2022) Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines – Kamouraska - Rivière-Du-Loup - Témiscouata. Rapport final 293p.

Photos de couverture

Kamouraska : Nicogag, Wikipedia, CC BY-SA 3.0
Rivière-du-Loup : <http://www.tourismeriviereduloup.ca>; Parc des Chutes
Témiscouata : infodimanche.com, 26 mars 2016

PARTENAIRES

Partenaires académiques



Gestionnaire du territoire



Organismes à but non lucratif



Partenaires ministériels



RÉSUMÉ

Le Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Kamouraska, Rivière-du-Loup et Témiscouata (PACES-KRT) s'inscrit dans le cadre du Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) développé par le Ministère de l'Environnement et de Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) afin d'établir une cartographie hydrogéologique du Québec municipalisé. Le PACES-KRT est réalisé par l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) en collaboration avec les trois MRC incluses dans le territoire ciblé. Le projet compte également sur un appui et une implication significative de l'Organisme des bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR), l'Organisme de bassins versants de la rivière Saint-Jean, le Conseil régional en environnement du Bas-Saint-Laurent (CRE) et le comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire (ZIPSE).

La troisième phase du PACES-KRT s'est déroulée entre avril 2020 et mars 2021 et s'est concentrée sur: la finalisation des travaux de terrain durant l'été 2020 pour compléter ceux de l'année 2019 (installation et instrumentation de piézomètres, suivi hydrologique des cours d'eau, campagne d'échantillonnage ciblée des puits privés et sensibilisation des citoyens); la consolidation des liens avec nos partenaires régionaux via l'organisation de rencontres et d'ateliers de transfert et d'appropriation des connaissances (ateliers 2 et 3 et ateliers RPEP du RQES, rencontres individuelles des MRC, rencontres avec les membres de l'OBAKIR, rencontre sur le terrain ES-KRT avec différents partenaires); la recherche et développement en hydrogéologie régionale avec des projets de recherche ciblés; et la production des livrables finaux.

La réalisation du Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de Kamouraska, Rivière-du-Loup et Témiscouata aura permis de compléter et d'uniformiser les connaissances sur les eaux souterraines du Bas-Saint-Laurent. 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

ainsi que les activités de transfert et d'appropriation des connaissances favoriseront une gestion pérenne des eaux souterraines dans la région du sud-ouest du Bas-Saint-Laurent. Le projet PACES-KRT complète ainsi le portrait régional, à l'échelle du Bas-Saint-Laurent, de la qualité, de la quantité et de vulnérabilité des eaux souterraines.

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉALISATION DE L'UQAR	ii
PARTENAIRES	iii
RÉSUMÉ	iv
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiii
Introduction	1
1. Description du projet	3
1.1. Objectifs	3
1.2. Équipe de réalisation et partenaires	4
1.3. Organisation du rapport.....	6
2. Présentation du territoire à l'étude	7
2.1. Localisation.....	7
Routes, limites municipales et toponymie	8
2.2. Environnement naturel	11
2.2.1. Topographie et pente du sol	11
2.2.2. Hydrographie et limites des bassins versants.....	15
2.2.3. Couverture végétale.....	19
2.2.4. Climatologie	23
2.2.5. Milieux humides	23
2.2.6. Pédologie.....	26
2.2.7. Réseau de surveillance météorologique, hydrométrique et piézométrique	28
2.3. Environnement humain.....	30
2.3.1. Portrait socioéconomique.....	30
2.3.2. Occupation du sol.....	31
2.3.3. Affectation du territoire	33
3. Acquisition de données et travaux réalisés	36
3.1. Compilation de l'information existante	36
3.1.1. Saisie de données à partir des documents existants	38

3.1.2. Intégration et validation des données existantes.....	38
3.2. Travaux de caractérisation	41
3.2.1. Forages	44
3.2.2. Évaluation des paramètres hydrauliques.....	48
3.2.3. Échantillonnage d'eau.....	49
3.2.4. Instrumentation du bassin versant de la Kamouraska	56
4. Contextes géologiques et hydrogéologiques.....	60
4.1. Géologie du socle rocheux	61
4.1.1. Histoire géologique	63
4.1.2. Formations géologiques générales et contexte structural	66
4.2. Géologie du Quaternaire.....	71
4.2.1. Introduction	71
4.2.2. Histoire des évènements du Quaternaire.....	71
4.2.3. Nature et distribution des dépôts meubles	77
4.3. Coupes stratigraphiques	95
4.4. Épaisseur des dépôts meubles.....	110
4.5. Topographie du roc	114
4.6. Conditions de confinement.....	116
4.7. Épaisseurs et limite des aquifères régionaux et contextes hydrostratigraphiques.....	118
4.7.1. Épaisseurs et limite des aquifères régionaux.....	118
4.7.2. Contextes hydrostratigraphiques.....	118
5. Conditions hydrogéologiques	121
5.1. Propriétés hydrauliques	121
5.2. Piézométrie, écoulements et suivi des niveaux d'eau	124
5.3. Recharge et résurgences	129
5.3.1. Calcul de la recharge	130
5.3.2. La recharge des nappes sur le territoire du KRT	136
5.3.3. Résurgences	139
5.4. Vulnérabilité des aquifères	141
5.5. Géochimie de l'eau souterraine.....	146

5.5.1. Base de données géochimiques	146
5.5.2. Analyses des ions majeurs et bruit de fond géochimique	147
5.5.3. Les principaux processus géochimiques	154
5.5.4. La signature isotopique régionale.....	158
5.6. Synthèse hydrogéochimique régionale.....	165
6. Ressource en eau souterraine.....	170
6.1. Utilisation de l'eau souterraine.....	170
6.2. Qualité de l'eau	174
6.2.1. Eau souterraine	174
6.2.2. Eau de surface	184
6.3. Gestion durable de la ressource	186
7. Rencontres avec les partenaires, transfert de connaissances et diffusion des résultats	188
7.1. Rapports aux MRC.....	189
7.2. Activité de transfert de connaissances et de diffusions	191
7.2.1. Atelier RQES #1	191
7.2.2. Atelier RQES #2	194
7.2.3. Atelier RQES #3	195
7.2.4. Activité de gouvernance de la ressource eau souterraine	196
7.3. Diffusion scientifique.....	197
8. Projets scientifiques connexes	199
8.1. Bassin versant expérimental	199
8.1.1. Transport sédimentaire.....	199
8.1.2. Réponses hydrologiques et hydrosédimentaires.....	206
8.2. Résurgences d'eau souterraine en milieu côtier	207
8.2.1. Travaux réalisés sur l'Île-Verte (MRC Rivière-du-Loup)	210
8.2.2. Travaux réalisés aux Îles-de-la-Madeleine (en collaboration avec ULaval).....	211
8.3. Salinisation et potabilité des eaux souterraines du Québec Maritime (RIISQ-RQM)	212
8.4. Changements CLImatiques et Qualité de l'Eau (CLIQUE): flux de matière et transformations biogéochimiques au sein d'un bassin versant appalachien	215

8.5. Mémoire de baccalauréat	216
8.5.1. Cartographie et description des dépôts morainiques dans les monts Notre-Dame, Kamouraska, Frédérique Dumont.....	217
8.5.2. Élaboration d'une méthode de cartographie des eaux souterraines à partir de données géospatiales et de modèle numérique d'élévation, Yan Boulet, 2019	219
Conclusion et recommandations	221
Références.....	226
ANNEXES	237
Annexe 1–Description des sondages dans les dépôts meubles.....	238
Annexe 2–Méthode d’analyses et limite de détection	251
Annexe 3–Dépliant informatif remis aux propriétaires de puits échantillonné 252	
Annexe 4–Entente de collaboration.....	254
Annexe 5–Fiche technique d’échantillonnage	262
Annexe 6–Exemple de lettre envoyée lors de dépassement des normes de potabilité	264
Annexe 7- Cartes des paramètres utilisés pour le calcul de l’indice DRASTIC	266
Annexe 8–Affiche présentée lors du congrès GAC-MAC-IAH en mai 2019	275

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 2.1-Superficie du couvert forestier sur le territoire du PACES-KRT</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 2.2-Superficie des différents milieux humides en km² présents sur le territoire</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 2.3-Liste des stations de surveillance provinciales sur le territoire du PACES-KRT</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 2.4-Croissance démographique des MRC de Rivière-du-Loup, Témiscouata et Kamouraska pour 2016*</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 2.5-Superficie des classes d'occupation du sol.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 3.1-Source des données consultées</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 3.2-Résumé des travaux terrain du PACES-KRT</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3.3-Détail de construction des puits des forages au roc</i>	<i>48</i>
<i>Tableau 3.4-Éléments analysés sur chaque échantillon prélevé. Les méthodes et incertitudes analytiques sont rapportées dans l'annexe 2.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 4.1-Correspondance entre les caractéristiques sédimentologiques des dépôts meubles et leur perméabilité sur le territoire du KRT (adapté de Veillette et al., 2017)</i>	<i>111</i>
<i>Tableau 4.2-Critères de définition des conditions de confinement.....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 5.1-Mesures de tendance centrale et de dispersion des paramètres de transmissivité (T) et de conductivité hydraulique (K) provenant de la compilation des études hydrogéologiques locales du territoire du KRT.....</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 5.2-Résultats de transmissivité et de conductivité hydraulique des forages au roc et des sondages dans les dépôts meubles.....</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 5.3-Résumé des essais de conductivité hydraulique au perméamètre de Guelph et calculs de la conductivité moyenne (Kmean) selon deux méthodes de calcul. SHM : Single Head Method, DHM : Double Head Method.....</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 5.4-Vérification de la pertinence de la méthode de détermination du paramètre de filtre par comparaison avec une étude du CEHQ de 2012.</i>	<i>132</i>
<i>Tableau 5.5-Bilan des stations utilisées pour la calibration, avec valeur du paramètre de filtre α et proportion de la période de calibration couverte par des données journalières (en rouge, livrable 26). ...</i>	<i>133</i>
<i>Tableau 5.6-Performance de la correspondance entre les observations et la calibration pour le meilleur jeu de paramètre issu de la calibration.</i>	<i>135</i>
<i>Tableau 5.7-Bilans d'eau sur les bassins versants des stations de jaugeages utilisés durant la calibration sur la période de septembre 2008 à mai 2012</i>	<i>137</i>
<i>Tableau 5.8-Gabarit des paramètres de l'indice DRASTIC. Tableau tiré de MELCC 2019</i>	<i>144</i>

<i>Tableau 5.9-Contribution des faciès géochimiques identifiés à l'aide du diagramme de Piper pour la région KRT, en dessous de la limite de la mer de Goldthwait et au-dessus de la limite de la mer de Goldthwait (voir figure 23).</i>	148
<i>Tableau 5.10. Valeurs moyennes et écarts-types des paramètres chimiques des faciès géochimiques identifiés à l'aide du diagramme de Piper. * T_{alk} : alcalinité totale, TDS : total dissolve solids, CID : carbone inorganique dissous.</i>	151
<i>Tableau 5.11-Localisation et données sur les analyses isotopiques des échantillons de précipitations récoltés à l'aide des pluviomètres sur le territoire KRT.</i>	159
<i>Tableau 6.1-Source d'approvisionnement en eau par MRC.</i>	171
<i>Tableau 6.2-Consommation de l'eau par MRC, provenance de l'eau et par les catégories d'usage. Les chiffres en caractères gras représentent les secteurs consommant le maximum d'eau, en et hors réseau.</i>	172
<i>Tableau 6.3-Compilation des données disponible sur le territoire du KRT selon les critères pour la santé du RQEP et ceux d'ordre esthétique de santé Canada.</i>	180
<i>Tableau 6.4-Résultats bactériologiques des rivières échantillonnées en septembre.</i>	185
<i>Tableau 7.1-Résumé des rencontres avec les partenaires du PACES-KRT</i>	189
<i>Tableau 7.2-Synthèse des enjeux identifiés par les acteurs du KRT ayant un impact sur l'eau souterraine</i>	192

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2.1-Territoire d'étude du PACES-KRT</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2.2-Monadnock émergeant à travers la plaine côtière à St-Germain de Kamouraska. Crédit photo Bernard Côté, Google Earth.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2.3-Segment de la route vallonnée des Monts Notre-Dame (route 232) sur le territoire des Hautes-Terres. Crédit photo : Québec Moto</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2.4-Distribution des types de cultures agricoles présentent dans le KRT (BDPPAD,2020).....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 2.5-Distribution de l'affectation du territoire des MRC de Kamouraska, Rivière-du-Loup et Témiscouata; en km²</i>	<i>34</i>
<i>Figure 3.1-Localisation de tous les objets ayant servi à la production des livrables du PACES-KRT</i>	<i>40</i>
<i>Figure 3.2-Carte de localisation des forages au roc, des stations de jaugeage et des forages dans les dépôts meubles dans le bassin versant expérimental</i>	<i>42</i>
<i>Figure 3.3-Foreuse de l'INRS lors des forages dans les dépôts meubles.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 3.4-Forage du puits F-01 à Kamouraska avec une foreuse conventionnelle de type rotoperçusion par la compagnie Puitbec</i>	<i>47</i>
<i>Figure 3.5-Grille d'échantillonnage pour le territoire du PACES-KRT. Les points correspondent aux puits privés échantillonnés par l'équipe de l'UQAR.</i>	<i>51</i>
<i>Figure 3.6-Échantillonnage d'un puits privé dans le Témiscouata</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3.7-Montage de Rad7 pour l'analyse du radon dans l'eau; technique « wat-250 »</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3.8-Échantillonnage pour l'analyse des gaz dissous (CID, signature isotopique du CID et méthane) ..</i>	<i>55</i>
<i>Figure 3.9-Mesure de la vitesse des courants (photo de gauche) et installation des pièges à sédiments (photo de droite) à la station Goudron.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 3.10-Photo de terrain lors de la prise d'échantillon des sédiments de la rivière Kamouraska. De droite à gauche sur les photos : Aude Flamand (étudiante à la maîtrise), Myriam Vallé (auxiliaire de recherche) et Charles-Edouard Deschamps (Post-doctorat).....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 3.11-Photo du déploiement du turbidimètre NEP595 pour un test terrain dans la rivière Goudron. ..</i>	<i>59</i>
<i>Figure 4.1-Échelle des temps géologiques présentant les principaux événements géologiques à l'origine de la formation du relief des Appalaches au Québec. (Adapté de Brisebois et Brun, 1994).</i>	<i>64</i>
<i>Figure 4.2-a) Schiste ardoisier rouge du Groupe de Saint-Roch à Cacouna. b) Affleurement rocheux (grès et schiste) montrant un plan de stratification verticale dans la Formation de Tourelle (Zone de Humber) à Saint-Joseph-de-Kamouraska c) Colline d'orthoquartzite de la formation de Kamouraska à Saint-Philippe-de-Néri présentant des marques d'abrasion glaciaire (cannelures). (Photos : Jérôme Dubé).....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 4.3 a) Succession de 6 plis anticlinaux serrés et droits sur une distance de 3 km localisée dans le Groupe de Trois-Pistoles (Zone de Humber) à l'est de la rivière Ouelle (Saint-Pacôme). B) Synclinal droit de</i>	

<i>Squatec-Cabano formé dans le Groupe de Chaleurs (Ceinture de Gaspé) bordé par la Faille du Lac Témiscouata/Petit lac Biencourt au nord-ouest et la Faille du Lac-des-Aigles au sud-est.</i>	<i>69</i>
<i>Figure 4.4-a) Mégaformes d'abrasion glaciaire profilée (de type crag-and-tail) montant la direction d'un courant glaciaire vers le nord-est à Saint-Joseph-de-Kamouraska et le profil topographique associé à la coupe A-A'. b) Photo montrant la portion aval de l'accumulation sédimentaire profilée (Jérôme Dubé). ...</i>	<i>72</i>
<i>Figure 4.5-Successions de plages/cordons littoraux soulevés et de différents niveaux de terrasses d'origine marine retrouvés dans une ancienne baie rocheuse à l'ouest de Saint-André-de-Kamouraska.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 4.6- Représentation approximative des limites du paléo-lac Madawaska dans la MRC de Témiscouata selon la variabilité spatiale des altitudes des plus hautes terrasses lacustres documentées par Martineau (1979) dans le secteur de Squatec/Lac-des-Aigles (195 m) et par de Jonge (1951) entre Cabano (180 m) et Dégelis (175m).</i>	<i>76</i>
<i>Figure 4.7-Représentation stratigraphique simplifiée de la succession des dépôts meubles pouvant se retrouver sur le territoire du KRT à suite du dernier retrait glaciaire. Il est à noter que selon les secteurs, certains dépôts peuvent être absents ou avoir été érodé (adapté de RQES : Projet PACES-AT1).....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 4.8-. a) Collines d'orthoquartzite dans la plaine argileuse côtière (relief de monadnocks) à partir de la montagne à Cotton (Saint-Pascal). b) Collines ondulées en avant-plan et hauts sommets effilés en arrière-plan dans le Parc national du Lac-Témiscouata. c) Mince couche d'altérite au sommet d'un affleurement rocheux composé de schiste ardoisier à hématite (rougeâtre) et à chlorite (verdâtre) près de L'Isle-Verte. (Photos : Jérôme Dubé).....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 4.9-a) Till d'ablation mince (<0,5m) retrouvé au nord de Mont-Carmel (Photo Jérôme Dubé) et b) till de fond épais (<1m) à Transfiguration (Photo Bernard Héту).</i>	<i>82</i>
<i>Figure 4.10-a) Dépôt de sable et graviers composant l'esker situé nord-est du Lac de la Grande-Fourche (Photo Bernard Héту). b) Coupe dans une gravière située au sud-est de Quartier Saint-Thomas montrant l'important dépôt de sable et graviers stratifiés d'origine fluvioglaciaire de contact glaciaire (Photo Jérôme Dubé).</i>	<i>84</i>
<i>Figure 4.11-a) Dépôt fluvioglaciaire au sein de la Moraine de Saint-Antonin déposé par les eaux de fonte glaciaire en bordure de la mer de Goldthwait (Photo Bernard Héту). b) Dépôt morainique à granulométrie hétérogène localisé au sud-est de Saint-Onésime dans la vallée de la rivière Ouelle (Photo Jérôme Dubé).</i>	<i>85</i>
<i>Figure 4.12-a) Rythmites silto-argileuses lacustres du paléo-lac Madawaska, vallée de la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick. Une branche de bois récoltée dans ce dépôt à une altitude de 140 m a donné un âge radiocarbone non calibré de $8\,235 \pm 30$ BP (ULA-3939) (Héту et Dubé, inédit). b) Dépôt de sables et graviers montrant des structures d'écoulement associé à la formation d'un delta dans le paléo-lac Madawaska à une altitude de 170 m à Dégelis (Photo Bernard Héту). c) Terrasse lacustre correspondant à un ancien niveau du paléo-lac Madawaska à une altitude de 170 m à Dégelis (Photo Jérôme Dubé).</i>	<i>87</i>

<i>Figure 4.13-a) Argile silteuse grise de la mer de Goldthwait retrouvée le long d'une berge de la rivière Kamouraska (Photo Charles-Édouard Deschamps). b) Dépôt sablo-graveleux d'origine littorale (plage soulevée) à 123 m d'altitude à Saint-Alexandre-de-Kamouraska (Photo Jérôme Dubé).</i>	90
<i>Figure 4.14-Photo montrant la diversité de la sédimentation retrouvée en milieu intertidal et littoral en bordure du fleuve Saint-Laurent à Notre-Dame-du-Portage (Photo Jérôme Dubé).</i>	91
<i>Figure 4.15-a) Plaine alluviale en érosion composée de sables, de graviers et de galets imbriqués (rivière Nouvelle, Gaspésie) montrant la composition sédimentologique de plusieurs rivières graveleuses retrouvées sur le territoire du KRT (Photo Jérôme Dubé). b) Limite du cône alluvial dans le lac de l'est incluant la localisation des chenaux d'écoulement, des exutoires principaux et secondaires ainsi que l'identification de 3 niveaux distincts de la surface du cône (1 = plus haut et 3 = plus bas).</i>	93
<i>Figure 5.1-Niveau d'eau des puits F-01 et F-02 (voir leur position sur figure 3.2) et précipitations durant la période de septembre 2019 à septembre 2020</i>	127
<i>Figure 5.2 : Études des harmoniques de marées dans les puits F01(P1), F02 (P2), F03 (P3) et F04(P4), de juillet 2019 à juillet 2021. A) Niveaux d'eau enregistrés dans les puits au cours de la période d'étude (courbe noire) et niveau d'eau modélisés à partir des composantes de marées K1, M2, M3 et M4 (courbe bleue); B) densité spectrale de puissance (Power Spectral Density, PSD) des composantes de marée K1, M2, M3 et M4 pour les niveaux d'eau enregistrés dans les 4 puits.</i>	128
<i>Figure 5.3-Front de Pareto des résultats de calibration moyennés sur toutes les stations. Les points rouges correspondent aux 25 meilleurs résultats.</i>	134
<i>Figure 5.4-Front de Pareto des résultats de calibration par station de jaugeage</i>	136
<i>Figure 5.5-Recharge mensuelle de janvier 2000 à décembre 2017 moyennée sur tout le territoire du PACES KRT.</i>	138
<i>Figure 5.6-Représentation des sept paramètres DRASTIC ainsi que leurs poids respectifs (Figure tirée de Lefebvre et al. 2015).</i>	142
<i>Figure 5.7-Diagramme de Piper pour les 228 échantillons analysés dans le cadre du programme PACES-KRT.</i>	147
<i>Figure 5.8-Carte montrant la répartition géographique des faciès géochimiques identifiés à l'aide du diagramme de Piper (figure 7). La ligne noire marque la limite de drainage des bassins versants et les flèches bleues l'écoulement régional des eaux souterraines.</i>	149
<i>Figure 5.9-A) Analyse en composante principale (PCA) des principaux paramètres chimiques (Ca, Na, Cl, SO₄ et Talk) permettant de mettre en évidence les voies de minéralisation des eaux souterraines. B) Diagramme de Gibbs permettant de mettre en évidence les processus contrôlant l'évolution chimique des eaux souterraines.</i>	152

<i>Figure 5.10-Interpolation par méthode de krigeage de la position sur l'axe PCA1 de la PCA représentant le degré de minéralisation des eaux souterraines (en vert les eaux les moins minéralisées et en rouge les eaux les plus minéralisées). Les faciès géochimiques ont aussi été rapportés.</i>	<i>153</i>
<i>Figure 5.11: A) Indice de saturation (IS) des minéraux carbonatés pour les différents faciès géochimiques. B) Graphique $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg})$ vs $\text{SO}_4/(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3)$ montrant la dissolution des minéraux influençant la chimie des eaux souterraines.</i>	<i>156</i>
<i>Figure 5.12-Rapports A) brome sur chlore et B) sulfate sur chlore (rapport massique) en fonction de la concentration en ions chlorure (en mg/L). Ici, les ions chlorure sont considérés comme conservatifs et sont utilisés comme traceurs de la salinisation. Le rapport théorique Br/Cl de l'eau de mer actuelle (estuaire du Saint-Laurent) est rapporté. Les différents faciès géochimiques sont aussi présentés.</i>	<i>157</i>
<i>Figure 5.13-Composition isotopique de l'eau souterraine et des précipitations solides et liquides dans la région KRT comparée à la droite météorique mondiale (DMM; Craig, 1961) et à la droite météorique locale (DML).</i>	<i>159</i>
<i>Figure 5.14 - $\delta^{13}\text{CCID}$ en fonction de la concentration en CID pour les échantillons du PACES-KRT. Les faciès géochimiques des échantillons sont présentés et une distinction est faite entre les échantillons prélevés dans la plaine côtière et ceux prélevés dans les hauts plateaux appalachiens. Les domaines de l'origine du $\delta^{13}\text{CCID}$ sont définis dans Cane et Clark (1999).</i>	<i>161</i>
<i>Figure 5.15-A) Boite à moustache des activités du ^{222}Rn en fonction des faciès géochimiques au-dessus et en dessous de la limite marine. B) Graphique montrant l'activité du ^{222}Rn en fonction de la proximité avec une faille.</i>	<i>163</i>
<i>Figure 5.16 : Modèle conceptuel géochimique régional pour l'évolution des eaux souterraines ayant un écoulement sud-nord vers la plaine côtière et l'estuaire du Saint-Laurent.</i>	<i>167</i>
<i>Figure 5.17 : Modèle conceptuel géochimique régional pour l'évolution des eaux souterraines ayant un écoulement nord-sud, vers les vallées appalachiennes.</i>	<i>169</i>
<i>Figure 6.1-Schématisation de la méthodologie utilisée pour le calcul de l'utilisation de la ressource en eau</i>	<i>170</i>
<i>Figure 6.2-Perception de la qualité de l'eau potable et dépassement des normes bactériologiques lors de l'échantillonnage de juin 2019 dans le KRT</i>	<i>175</i>
<i>Figure 6.3- Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines (Conseil des Académies Canadiennes, 2009).....</i>	<i>187</i>
<i>Figure 7.1-Rencontres avec les acteurs des MRC de Rivière-Du-Loup le 17 juin 2020 (haut) et de Kamouraska le 15 juin 2020 (bas).</i>	<i>190</i>
<i>Figure 7.2-Activités d'identification des enjeux du territoire lors de l'atelier # 1 du RQES sur le territoire du KRT le 25 octobre 2018.</i>	<i>193</i>

<i>Figure 7.3-Rencontre virtuelle avec les partenaires dans le cadre du 2e atelier du RQES les 28 et 29 octobre 2020.</i>	194
<i>Figure 7.4-Synthèse de l'activité de groupe ayant pour but de déterminer une zone favorable à l'implantation d'une activité polluante. Chaque couleur de cercle correspondant à une carte attachée à un livrable présenté au paravent sur l'écran.</i>	195
<i>Figure 8.1-A Variations de la hauteur d'eau aux stations KAM1 (rouge) et Goudron (vert) et B courbe de tarage préliminaire pour les stations KAM1 (rouge) et Goudron (vert).</i>	203
<i>Figure 8.2- Boîte à moustache de la concentration des principaux minéraux des SS des affluents de la rivière Kamouraska.</i>	204
<i>Figure 8.3-Distribution de la taille des grains des sédiments en suspension pour les 3 stations : Goudron (vert), KAM1 (rouge) et KAM2 (bleu).</i>	205
<i>Figure 8.4-Niveau d'eau de cinq sous-bassins versants de la rivière Kamouraska et évènement de comparaison</i>	206
<i>Figure 8.5: Graphique représentant les variations de la turbidité/réponse hydrosédimentaire (NTU) en fonction de la variation hydrologique de la rivière Goudron.</i>	207
<i>Figure 8.6-Schématisation d'un estuaire souterrain et de la connexion entre les eaux souterraines et les eaux côtières. Les flèches indiquent le déplacement théorique des masses d'eau et les zones de résurgences des eaux souterraines. Le trait pointillé représente la hauteur de la nappe d'eau douce de l'aquifère et sa pente le gradient hydraulique. Les flèches bleues représentent l'infiltration et l'exfiltration de l'eau de mer dans les sédiments perméables des plages (tiré de Sirois, 2018).</i>	208
<i>Figure 8.7-Illustration du projet avec les outils et techniques développées pour l'analyse combinée d'images aéroportées et de traceurs isotopiques.</i>	209
<i>Figure 8.8-Tournage de capsule explicative avec le professeur Bernard Motulsky et Marylène Kouri.</i>	214
<i>Figure 8.9- Crêtes morainiques identifiées à partir des cartes des ombrages des MNE de résolutions 1m et 10m et localisation des sites échantillonnés.</i>	218
<i>Figure 8.10- Cartographie non ajustée de la modélisation à l'aide du depth to water index (DTWI) sur le territoire de Notre-Dame-des-Sept-Douleurs.</i>	220
<i>Figure 0.1-Stratigraphie de forage André-01</i>	239
<i>Figure 0.2-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage André-02</i>	240
<i>Figure 0.3-Stratigraphie du forage Bruno-01</i>	241
<i>Figure 0.4-Stratigraphie du forage Ouelle-01</i>	242
<i>Figure 0.5-Stratigraphie du forage Kamou-01</i>	243
<i>Figure 0.6-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Denis-01</i>	244
<i>Figure 0.7-Stratigraphie du forage Hélène-01</i>	245
<i>Figure 0.8-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Joseph-01</i>	246

<i>Figure 0.9-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Denis-01</i>	<i>247</i>
<i>Figure 0.10-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Germain-01</i>	<i>248</i>
<i>Figure 0.11-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Bruno-02.....</i>	<i>249</i>

Introduction

En avril 2018 débutait la quatrième vague des projets d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines au Québec (PACES). Ces projets visent à dresser un portrait de la ressource en eau souterraine du Québec municipalisé, dans le but de la protéger et d'en assurer la pérennité. Au courant de la troisième phase du programme, qui s'est déroulée d'avril 2012 à mars 2015, le nord-est du Bas-Saint-Laurent avait été caractérisé par l'équipe de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR). Forte de l'expérience acquise durant ce projet, l'UQAR a été mandatée une seconde fois afin de finaliser l'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans le sud-ouest du Bas-Saint-Laurent, soit les MRC de Kamouraska, Rivière-du-Loup et Témiscouata (KRT).

Le territoire du PACES-KRT correspond en grande partie aux limites du territoire couvert par l'organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR) ainsi que l'organisme de bassins versants du fleuve Saint-Jean. Le territoire touche trois MRC, soit celles de Kamouraska, Rivière-du-Loup et du Témiscouata. Le PACES-KRT compte sur un partenariat et une collaboration avec les trois MRC incluses dans le territoire ciblé, l'OBAKIR, l'OBV fleuve Saint-Jean, le Conseil régional en environnement du Bas-Saint-Laurent (CRE) et le comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire (ZIPSE), la table de concertation du sud de l'estuaire (TCR), la division régionale du MAPAQ, ainsi que la Santé Publique du Bas-Saint-Laurent. Le PACES-KRT s'est déroulé en trois phases consécutives, soit: 1) une phase de collecte des données existantes sur le territoire (2018-2019); 2) une phase de travaux de terrain, d'acquisition de données et de mise en place de la base de données (2019-2020); et 3) une phase de terrain complémentaire associée à une phase d'interprétation et de synthèse (2020-2021). Au cours du projet, le transfert des connaissances a été mené en parallèle aux 3 phases afin de faciliter l'appropriation de connaissances par les partenaires régionaux, mais aussi d'augmenter les échanges de savoirs au sein même du projet. Ce travail a été mené en collaboration étroite avec le Réseau Québécois sur les Eaux Souterraines (RQES).

Ce rapport final résume les activités réalisées au cours des trois phases du projet qui se sont déroulées du 1^{er} avril 2018 au 31 mars 2021. Les trois phases complétées, soit : *Phase I* - Collecte des données existantes, *Phase II* - Travaux de terrain et *Phase III* - Synthèse des données ont permis de répondre aux objectifs des projets PACES qui sont présentés au chapitre suivant.

1. Description du projet

1.1. Objectifs

L'objectif premier du PACES-KRT (Kamouraska – Rivière-du-Loup – Témiscouata) est d'accroître et d'actualiser les connaissances sur les eaux souterraines pour la région du sud-ouest du Bas-Saint-Laurent, et ce, dans une optique de développement durable de la ressource. Plus précisément, le PACES-KRT vise à :

- **dresser** un portrait de la ressource en eau souterraine à l'échelle des bassins versants du KRT pour soutenir les besoins d'information sur la qualité, la quantité et la vulnérabilité de cette ressource;
- **développer** des partenariats entre le milieu académique, les gestionnaires du territoire (MRC et municipalités), et les organismes régionaux (CRE-BSL, OBVs, ZIPSE, MAPAQ) dans l'acquisition des connaissances sur la ressource en eau souterraine;
- **arrimer** les livrables du MELCC aux besoins régionaux des différents partenaires du projet pour optimiser l'appropriation et l'intégration des données dans les prises de décision;
- **fournir** des outils de gestion de la ressource pour en assurer la pérennité en termes de qualité et de quantité et en intégrant la composante « risque » dans la perspective de changements environnementaux;
- **transférer** les connaissances générées dans le PACES-KRT afin d'outiller les gestionnaires du territoire et les organismes régionaux et leur permettre de prendre les mesures adaptées pour la gestion durable et pérenne des ressources en eau souterraine

La phase III du projet visait principalement à finaliser la phase d'acquisition de connaissances avec une dernière campagne terrain d'échantillonnage d'eau souterraine ainsi qu'à continuer nos efforts en recherche et développement sur des

questions de recherche ciblées. Plus spécifiquement, cette dernière phase nous a permis de clore la phase acquisition de connaissances avec une campagne de travaux de terrain complémentaires à ceux effectués en 2019 qui incluait une campagne d'échantillonnage ciblé sur l'île Verte et dans la région de Rivière-du-Loup. Elle fut également majoritairement consacrée à la validation, l'analyse et à l'interprétation des données acquises au courant des 3 dernières années.

1.2. Équipe de réalisation et partenaires

Le projet PACES-KRT est coordonné par Thomas Buffin-Bélanger, professeur de géographie et spécialiste de la géomorphologie et de l'hydrologie fluviale, et Gwénaëlle Chaillou, professeure de chimie marine et titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur la géochimie des hydrogéosystèmes côtiers. L'équipe de réalisation était principalement composée d'une chargée de projet, Gwendoline Tommi-Morin (B.Sc Chimie), spécialisée en chimie de l'environnement et géochimie. Notons que Claude-André Cloutier (M.Sc. Géographie), spécialisé en hydrogéologie et géomorphologie fluviale, a participé à la campagne terrain de 2019 ainsi qu'à la réalisation de certains livrables. Il a quitté l'équipe de coordination en septembre 2019. L'équipe s'est aussi agrandie en février 2020 avec l'arrivée de Charles-Édouard Deschamps (Ph. D.), spécialiste en géologie, géochimie et minéralogie. L'équipe compte aussi sur l'expertise de 2 membres de la section de géographie de l'UQAR, soit Marie-Andrée Roy, technicienne en géomatique, ayant des expertises en cartographie et en gestion de bases de données, et Jérôme Dubé, auxiliaire de recherche et d'enseignement à l'UQAR, ayant des expertises en géomorphologie et hydrologie fluviale et en histoire du Quaternaire.

La réalisation du PACES-KRT est possible grâce au partenariat avec des acteurs régionaux, des collaborateurs de recherche du réseau RQES, ainsi que plusieurs ministères du Gouvernement provincial. Ceux-ci sont énumérés ci-dessous:

Partenaires régionaux

MRC de Kamouraska, de Rivière-du-Loup et du Témiscouata

L'ensemble des municipalités du territoire (49)

Conseil régional en environnement du Bas-Saint-Laurent (CRE)

Comité ZIP du sud de l'estuaire (ZIPSE)

Table de concertation de la zone sud de l'estuaire moyen (TCR)

Organismes des bassins versants du Fleuve Saint-Jean et du Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)

Autres partenaires du projet

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC)

Ministère des Transports (MTQ)

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)

Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH)

Réseau québécois sur les Eaux Souterraines (RQES)

Durant l'été 2019, l'équipe terrain était composée de 6 auxiliaires de recherche, dont 5 étudiants de premier cycle en géographie (Sophie Bouchard-Skiffington, Olivier Boudreault, Étienne Gariépy-Girouard, Juliette Fournier et Matthieu Prugne) et 1 étudiant finissant du baccalauréat de chimie (Frédéric Bélanger). Nous avons également pu compter sur un agent de recherche, Samuel Laroche (B.Sc.), pour l'implantation et le suivi des stations de jaugeage sur le bassin versant de la rivière Kamouraska à l'automne 2019. Au cours de l'automne 2019, un autre stagiaire de premier cycle de chimie, de l'Université de Sherbrooke, nous a aidés à l'analyse du méthane (Olivier Hérard). Pour les travaux faits à l'automne 2020, Olivier Boudreault ainsi que Samuel Laroche ont de nouveau fait partie de l'équipe terrain ainsi que le post-doctorant Charles-Édouard Deschamps aidé de Myriam Vallée (B.Sc.) et Aude Flamand (B.Sc.). Laura Gatel (Ph. D) professionnelle de recherche en hydrogéologie de l'Université Laval, s'est également jointe à l'équipe pour la mise en

œuvre de l'outil HydroBugdet permettant l'évaluation de la recharge relative à l'échelle du territoire.

1.3. Organisation du rapport

Ce rapport présente tous les résultats obtenus au cours du projet PACES-KRT. Il est séparé en huit chapitres afin de bien décrire la méthodologie et les résultats obtenus durant les trois phases du projet. Le **chapitre 2** décrit la géographie de la zone d'étude. Le **chapitre 3** résume l'acquisition des connaissances ainsi que tous les travaux terrain effectués de 2018 à 2021. La géologie du roc et du quaternaire ainsi que les contextes hydrogéologiques font l'objet du **chapitre 4**. Le **chapitre 5** s'attarde davantage sur les conditions hydrogéologiques et la géochimie de l'eau souterraine. L'état de la ressource en eau souterraine est présenté au **chapitre 6**. Finalement, le **chapitre 7** résume les différentes rencontres avec nos partenaires ainsi que les activités de diffusion auxquelles l'équipe du PACES-KRT a participé et le **chapitre 8** expose les projets scientifiques connexes. Ce rapport se conclut par des recommandations qui découlent des travaux et des rencontres avec nos partenaires durant les trois dernières années.

2. Présentation du territoire à l'étude

2.1. Localisation

Le projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines concerne un territoire d'une superficie terrestre de plus de 7400 km². Cette superficie correspond à une proportion significative du Bas-Saint-Laurent et suit les limites des territoires des MRC de Kamouraska, de Rivière-du-Loup et du Témiscouata. Deux territoires non organisés (TNO), Picard et Petit-Lac-Ste-Anne, sont présents dans la MRC de Kamouraska et représentent près de 760 km². Le territoire comprend des portions significatives des bassins versants des rivières du Loup, Ouelle, Kamouraska et des lacs Témiscouata et Pohénégamook, couverts par les organismes de bassin versant du Fleuve Saint-Jean et l'OBAKIR. Il compte aussi une frange côtière d'une centaine de kilomètres le long de l'estuaire du Saint-Laurent, en incluant plusieurs îles et îlots faisant partie du territoire du comité ZIP du sud de l'estuaire et de la Table de concertation régionale du sud de l'estuaire moyen. L'île Verte est la seule île habitée du territoire et compte 36 habitants permanents et environ 150 habitants semi-permanents sur une superficie totale de 11,5 km². Cette dernière fait l'objet d'un projet de recherche particulier qui sera décrit au chapitre 8.

Le territoire du KRT a une population de près de 75 000 habitants répartis dans 49 municipalités (figure 2.1) Les plus grandes villes sont Rivière-du-Loup (20 050 hab.), Témiscouata-sur-le-Lac (4 935 hab.) et La Pocatière (4 024 hab.).

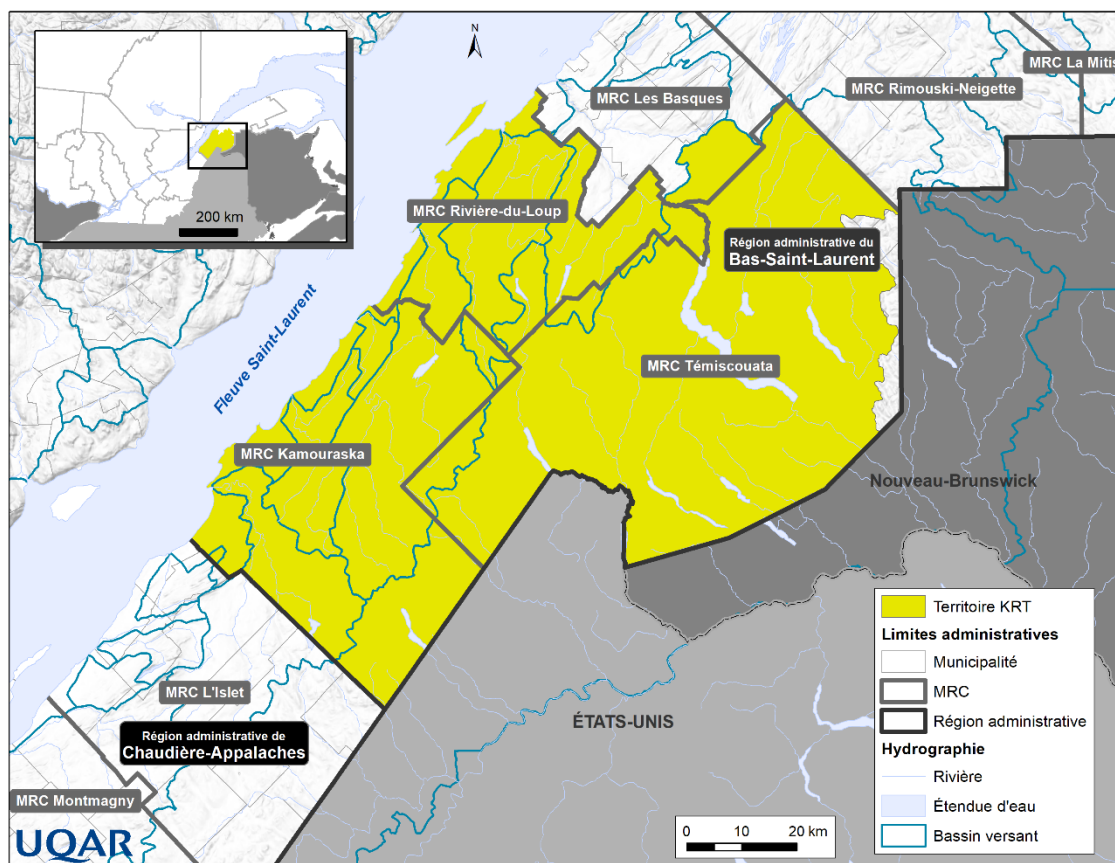


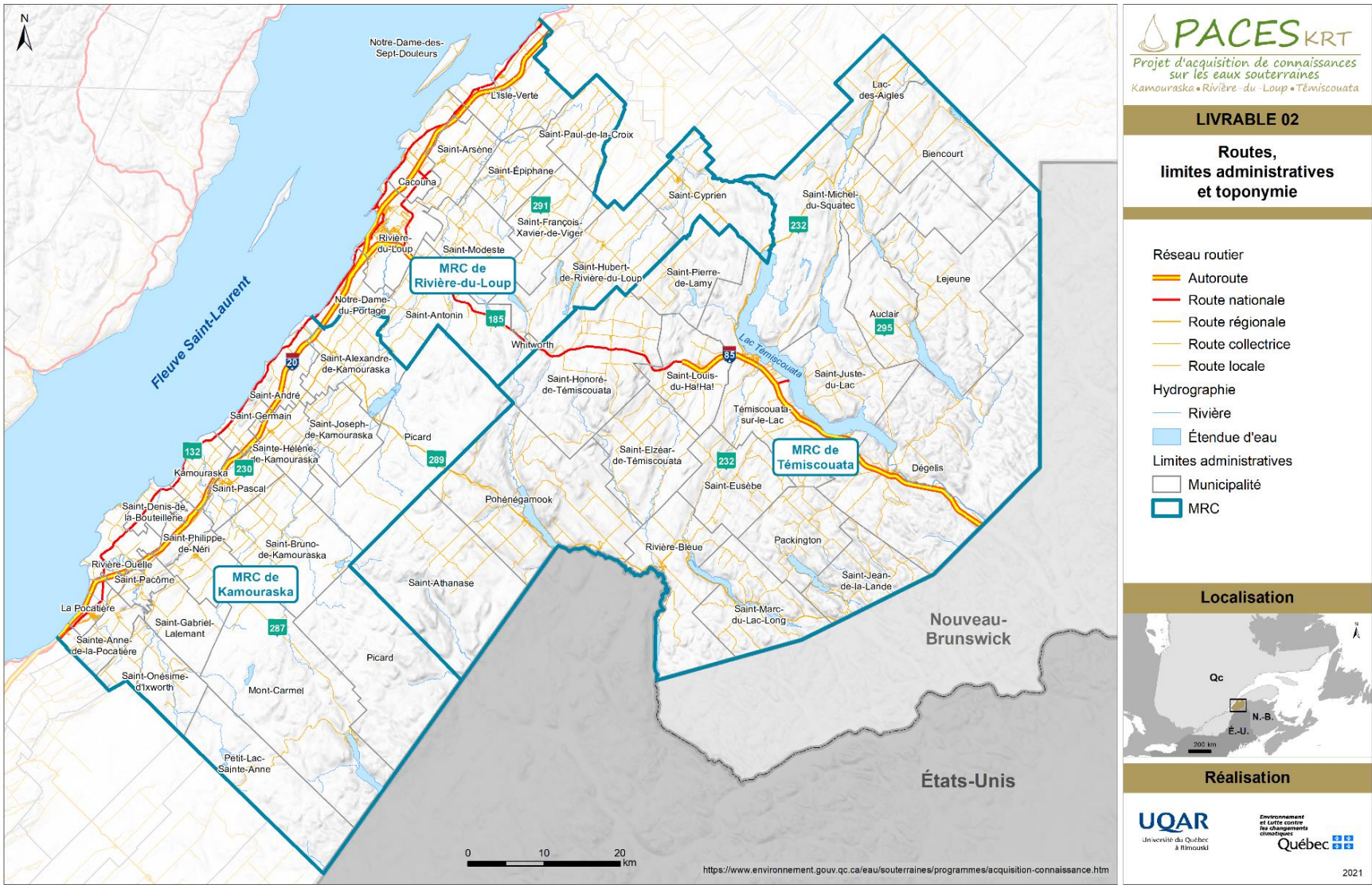
Figure 2.1-Territoire d'étude du PACES-KRT

Routes, limites municipales et toponymie

Le territoire du PACES-KRT touche les feuillets 21N04, 21N05, 21N06, 21N07, 21N09, 21N10, 21N11, 21N12, 21N13, 21N14, 21N15 et 22C03.

Pour ce qui est du réseau routier, l'autoroute Jean Lesage (E20) traverse tout le territoire du PACES-KRT d'ouest en est sur une longueur de 95 km. Une portion de la route transcanadienne, l'autoroute Claude Béchard (E85) traverse également le territoire sur un axe nord/sud sur un tronçon de 54 km et est entrecoupée par la route nationale 185 sur 40 km. La troisième phase de la construction de cette autoroute est en cours et vise à finaliser l'autoroute entre Saint-Louis-du-Ha!Ha! et Saint-Antonin. Cette autoroute constitue un axe stratégique puisqu'elle relie le Nouveau-Brunswick et les provinces maritimes. La route nationale 132 traverse tout le territoire à l'étude d'ouest en est sur près de 100 km.

Quatre routes régionales d'importance traversent le territoire, deux d'ouest en est, soit la 232 de Rivière-Bleue à Biencourt (72 km) et la 230 de La Pocatière à Saint-Alexandre-de-Kamouraska (53 km). Et deux du nord au sud, soit la 289 de Saint-Jean-de-la-Lande à Saint-André (40 km) et la 295 de Dégelis à Saint-Michel-de-Squatec (60 km, livrable 02)



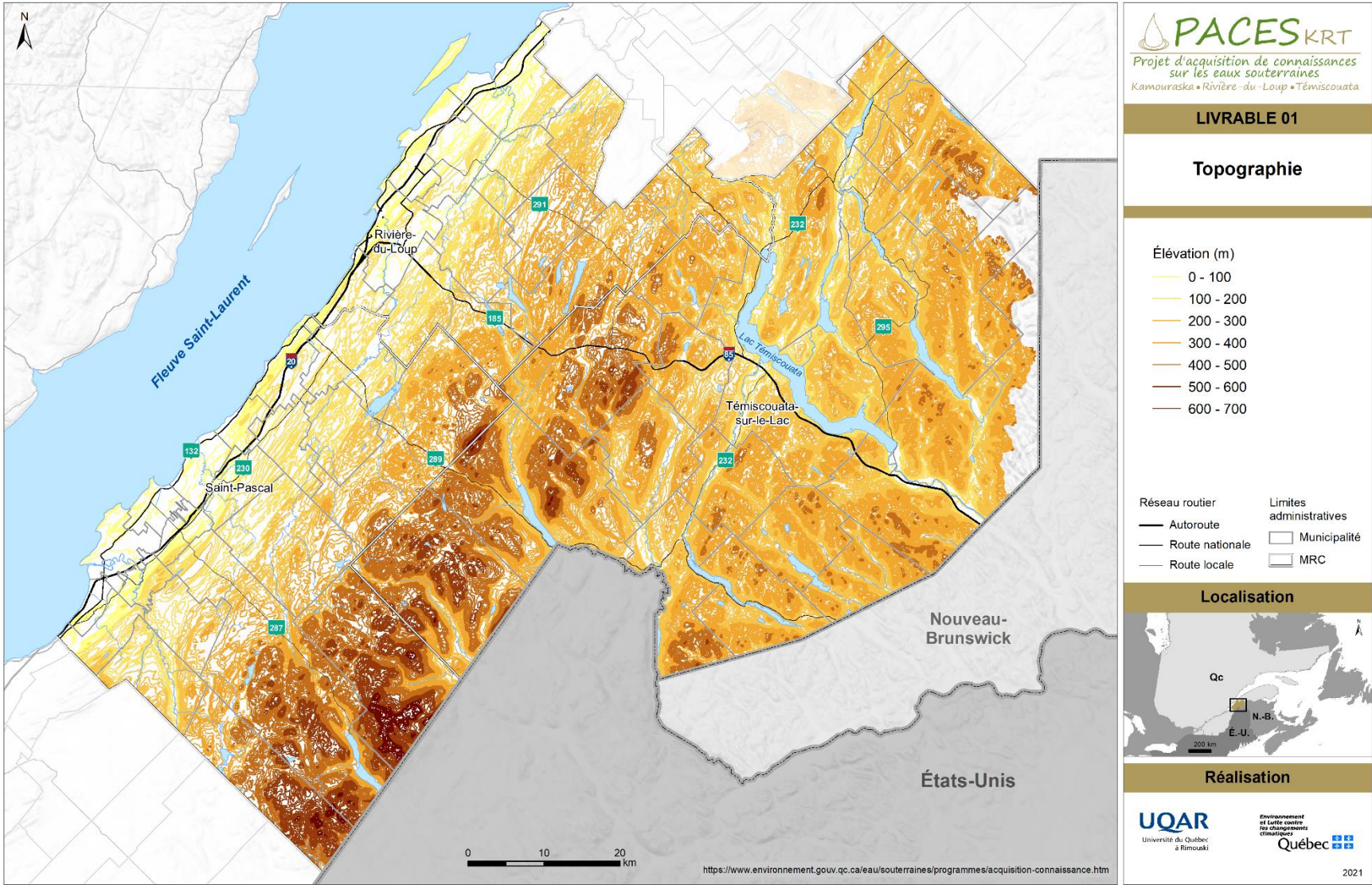
LIVRABLE 02

2.2. Environnement naturel

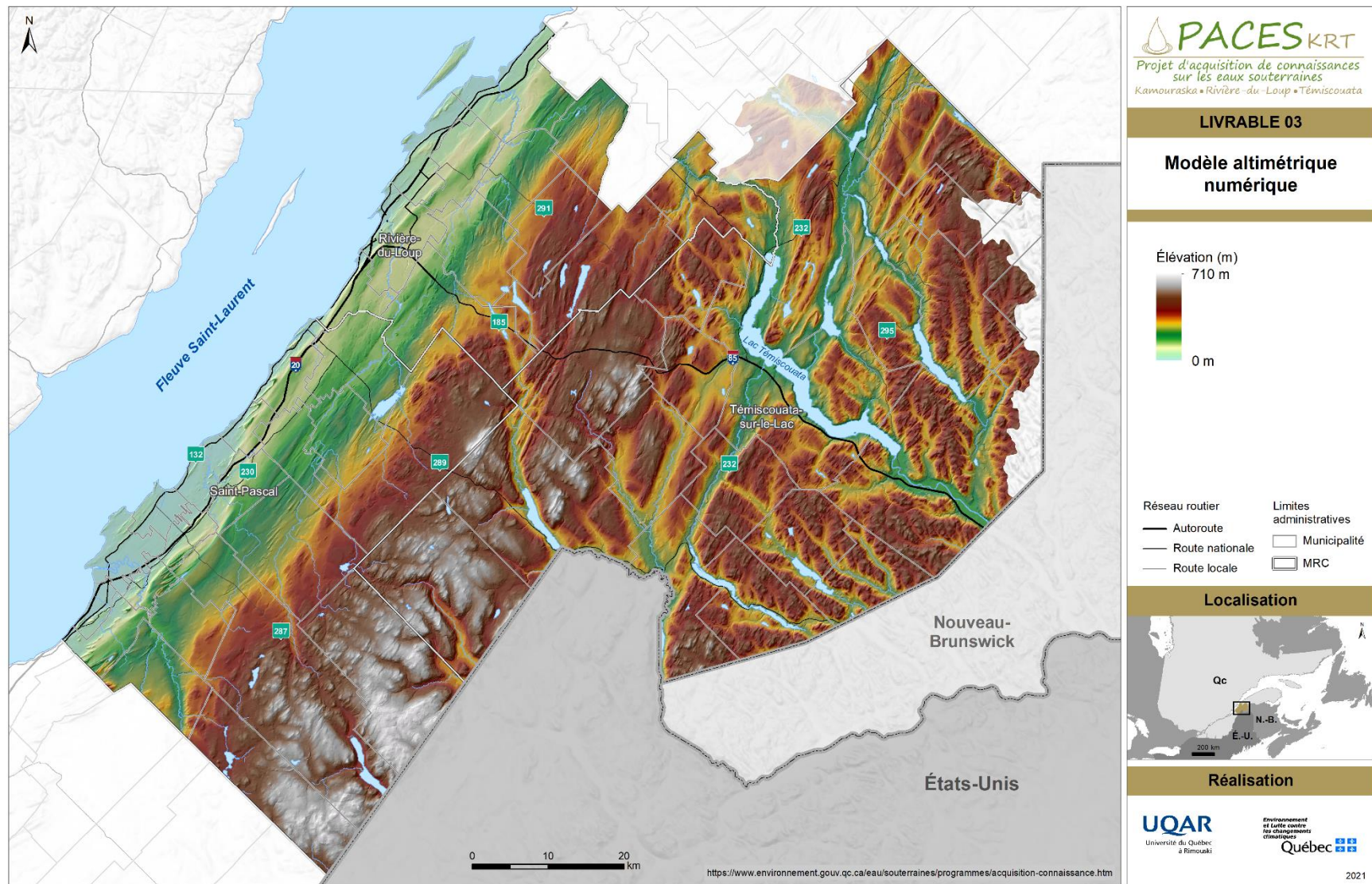
2.2.1. Topographie et pente du sol

La topographie du territoire (livrable 01) provient de la base de données topographique du Québec (BDTQ). Le modèle numérique d'élévation (MNE, livrable 03) fournit par le MELCC au début du projet et a été développé à partir de courbes de niveau 1 / 20 000 de la BDTQ. Il a été corrigé avec le réseau hydrographique.

Le territoire à l'étude se divise en deux grandes particularités physiogéographiques: la plaine côtière et les hauts plateaux appalachiens. La plaine côtière représente les territoires ennoyés par la mer de Goldthwait lors de la dernière déglaciation. Ces territoires correspondent à ceux ayant généralement une altitude inférieure à 163 m par rapport au niveau moyen de la mer au niveau de Rivière-du-Loup et 145 m vers La Pocatière. Ils représentent principalement les grandes plaines agricoles du Kamouraska et de la région de Rivière-du-Loup. Les seuls éléments escarpés du relief que l'on retrouve dans la plaine côtière sont les monadnocks du Kamouraska (aussi appelés cabourons par les gens du Kamouraska (figure 2.2)). Les monadnocks sont des crêtes rocheuses de quartzites émergeant des plaines agricoles et dégagées par érosion différentielle lors de la dernière déglaciation. On peut également apercevoir des crêtes rocheuses des formations schisteuses parallèles à l'estuaire.



LIVRABLE 01



LIVRABLE 03



Figure 2.2-Monadnock émergeant à travers la plaine côtière à St-Germain de Kamouraska.
Crédit photo Bernard Côté, Google Earth

Au sud de la plaine côtière se trouvent les hauts plateaux appalachiens. Martineau (1979) y distingue deux sous-zones : la zone montagneuse et la zone du haut-plateau. La zone montagneuse, orientée sud-ouest – nord-est, correspond aux monts Notre-Dame (figure 2.3). Cette zone est traversée par de profondes vallées fluviales orientées nord-ouest – sud-est et les versants atteignent des dénivelés de l'ordre de 200 m. La sous-zone physiogéographique du haut-plateau représente un plateau érodé et mollement ondulé d'une altitude moyenne de 400 m. Les collines y sont larges et s'élèvent légèrement au-dessus du plateau.



Figure 2.3-Segment de la route vallonnée des Monts Notre-Dame (route 232) sur le territoire des Hautes-Terres.
Crédit photo : Québec Moto

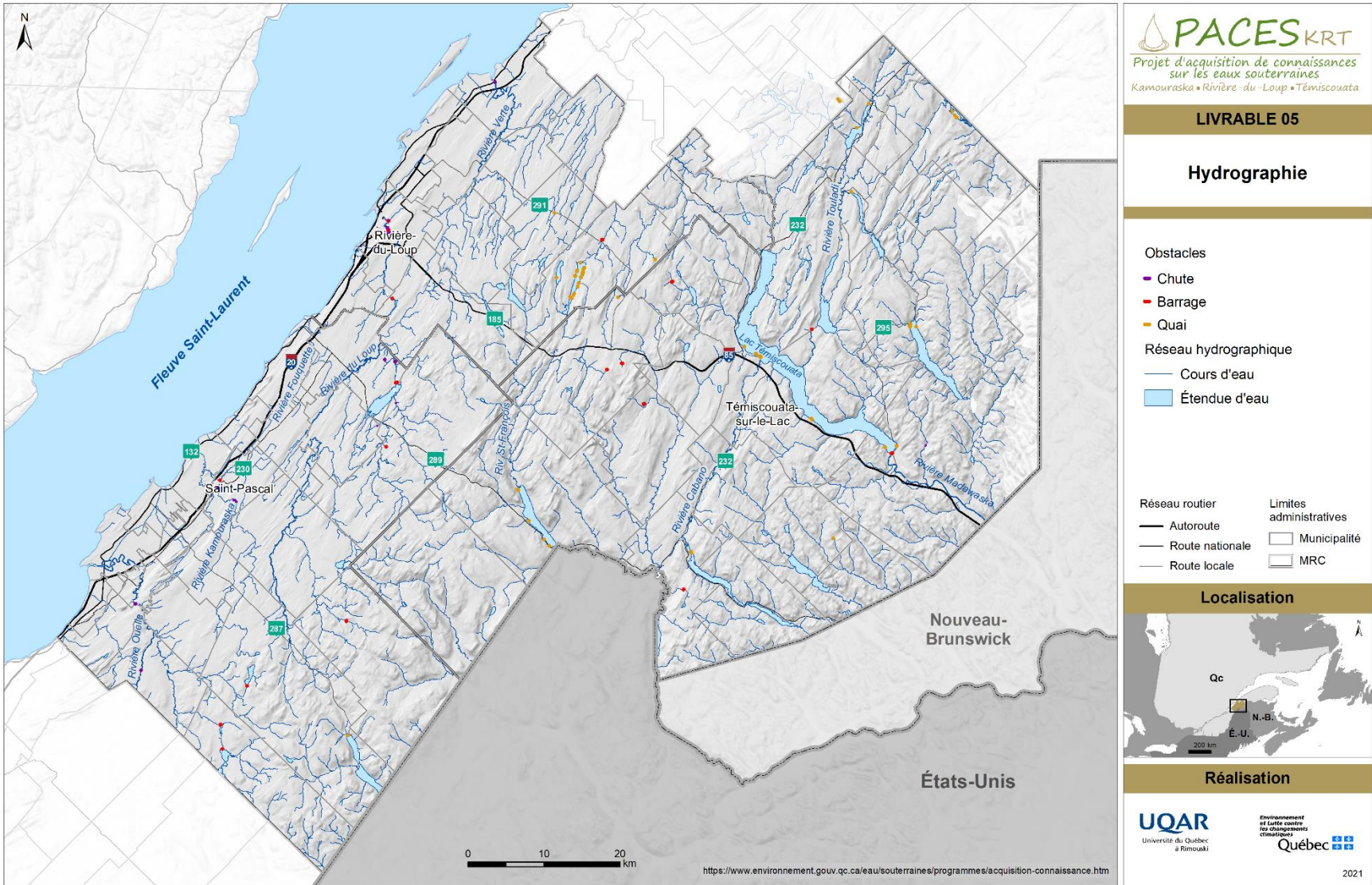
2.2.2. Hydrographie et limites des bassins versants

Les données utilisées pour représenter le réseau hydrographique du territoire (livrable 05) proviennent de la Géobase du Réseau Hydrographique du Québec (GRHQ) (1 :20 000). La localisation des barrages et chutes d'eau du territoire proviennent du Réseau Hydrique National (RHN). Le livrable 06 représente les bassins versants de niveau 1 pour la région hydrographique 02 et les bassins versants d'ordre 2 pour la région hydrographique 01. Les données proviennent de la base de données des Bassins Hydrographiques du Québec à l'échelle 1/20 000 du CEHQ.

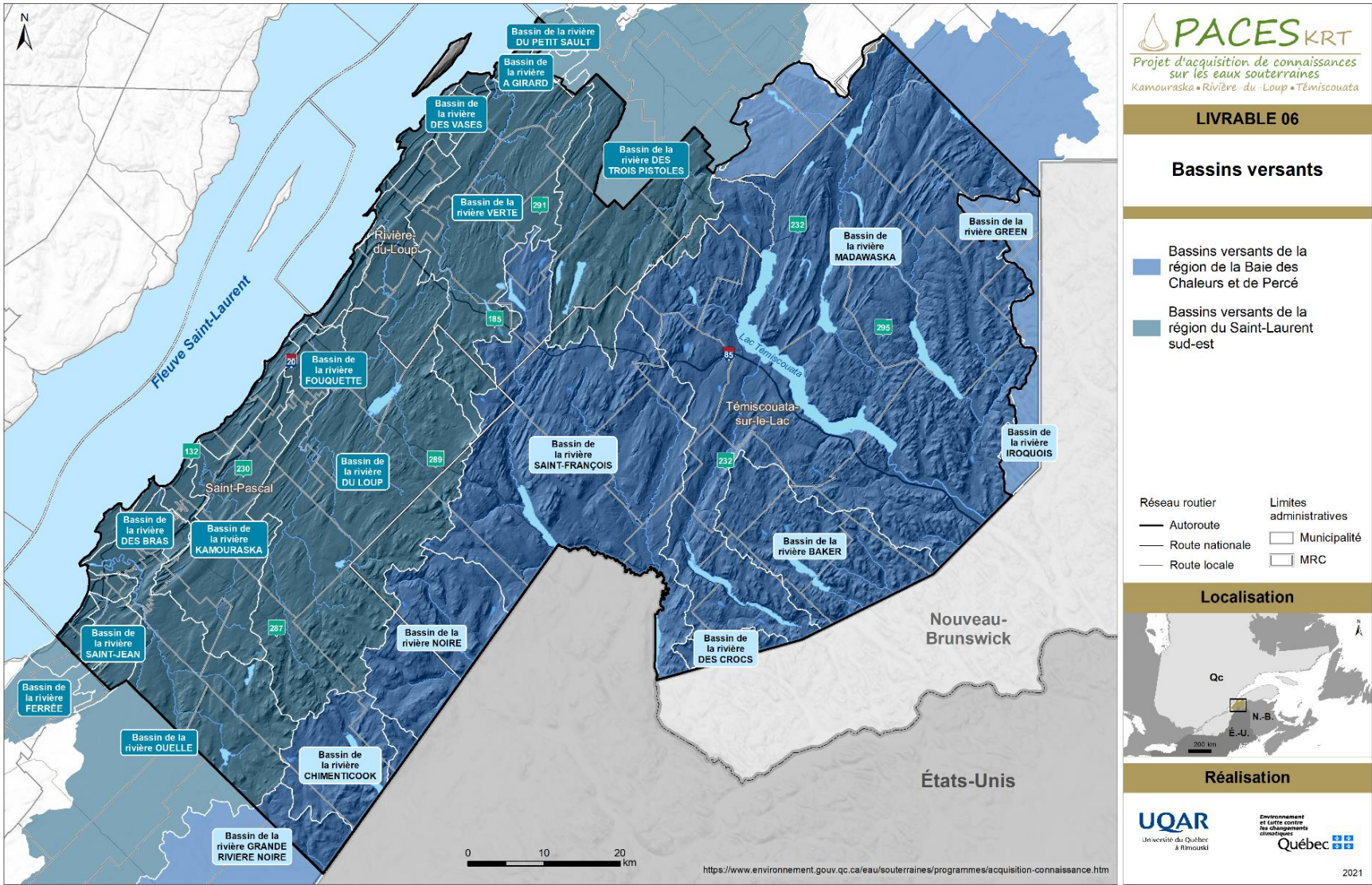
Le territoire chevauche deux régions hydrographiques du Canada, soit celle Saint-Laurent Sud-Est (région 02), qui couvre principalement la plaine côtière des MRC de Kamouraska et Rivière-du-Loup. L'orientation du drainage de surface est principalement contrôlée par la géologie structurale. Les barres appalachiennes, parallèles à l'estuaire, imposent aux cours d'eau un parcours en paliers jusqu'à l'estuaire dans une orientation nord-est. La présence de chutes d'eau montre bien cette particularité géographique. Seuls quatre lacs de taille « appréciable » se trouvent sur cette portion du territoire, soit les lacs Morin (6,5 km²), Saint-François (3,6 km²), Saint-Hubert (1,4 km²) et de la Grande Fourche (4,2 km²). En tout, 11 bassins versants de niveau 1 sont présents dans

cette région ainsi que plusieurs bassins versants résiduels en bordure du Fleuve. Seulement 5 de ces bassins font plus de 100 km², soit les bassins versants des rivières Du Loup (1092 km²), Trois-Pistoles (934 km²), Ouelle (838 km²), Verte (511 km²) et Kamouraska (304 km²). À noter que l'amont de la Ouelle (soit une superficie de 473 km²) se trouve dans la MRC de l'Islet et que l'embouchure de la Trois-Pistoles (538 km²) se trouve dans la MRC des Basques (une partie de cette information est déjà disponible dans le rapport du PACES-NEBSL; voir Buffin-Bélanger *et al.*, 2015).

La région hydrographique de la Baie-des-Chaleurs – Percé (région 01) pour sa part correspond majoritairement à la MRC de Témiscouata. Dans ce cas-ci, les barres appalachiennes orientées vers le nord-est dirigent les écoulements principalement en direction sud-ouest. Par contre, à partir de la subdivision géologique de la Ceinture de Gaspé, les patrons d'écoulements deviennent sud-sud-est. Dans ce secteur, le relief très disséqué empêche le développement de plaines alluviales. Un seul bassin versant de niveau 1 est présent dans cette région, soit celui du fleuve Saint-Jean (Wolastoq en Malécite) qui draine près de 55 000 km², dont 4 415 km² dans le KRT (3 856 dans sur le territoire de la MRC du Témiscouata). Trois sous-bassins de niveau 2 sont considérés comme importants, car ils recoupent les plus grands lacs de la région. Tout d'abord, le bassin versant de la rivière Madawaska (dont 2 857 km² sont situés dans la Province de Québec) inclut le lac Témiscouata (67 km²), le Grand lac Squatec (12,8 km²) et le lac Long (9,8 km²). Ensuite, le bassin versant Saint-François (957 km²) dont le territoire s'étend du Lac Saint-François, dans la MRC de Rivière-du-Loup et jusqu'aux États-Unis, passe par le lac Pohénégamook (16,6 km²). Et finalement, la Chimenticook (187 km²) sur la frontière canado-américaine de la MRC de Kamouraska qui inclut le lac de l'Est (7,4 km²).



LIVRABLE 05



LIVRABLE 06

2.2.3. Couverture végétale

Afin de cartographier la couverture végétale, les données du 5^e inventaire du système d'inventaire écoforestier (SIEF; MFFPQ, 2020) ainsi que celles de la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD 2020) ont été utilisées. La forêt bas-laurentienne se trouve dans la zone tempérée nordique qui est majoritairement occupée par le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune. Cependant, une petite partie à l'extrême ouest du Kamouraska – la bande littorale s'étirant de Kamouraska à La Pocatière – est plutôt colonisée par l'érablière à tilleul (AFBL,2019). Les sites mésiques sont occupés par des peuplements de bouleaux jaunes et de résineux, comme le sapin baumier, l'épinette blanche et le thuya. Le domaine forestier inventorié par photo-interprétation équivaut à près de 81% (5986 km²) de la superficie du territoire. Le tableau 2.1 présente les superficies par type de couvert forestier en km². Ce couvert est caractéristique de la sous-zone du territoire d'étude, la forêt mélangée (MFFPQ, 2019), car il est dominé par un peuplement mixte à 38 % suivi de près par un peuplement de feuillus à 33 % (livrable 08A). Pour ce qui est du KRT, la forêt occupe plus de 80 % du territoire d'étude, ce qui est légèrement en deçà de la moyenne bas-laurentienne de 85 % (AFBL,2019).

Tableau 2.1-Superficie du couvert forestier sur le territoire du PACES-KRT

Couvert forestier	Superficie (km ²)	% du territoire forestier
Feuillus	1 999	33
Mixte	2 259	38
Résineux	1 729	29
Total	5 987	100

Au niveau de l'agriculture, les terres agricoles déclarées occupent 780 km²(≈12 %) du territoire du KRT. Ces terres sont principalement localisées sur la plaine côtière au niveau des MRC du Kamouraska et de Rivière-du-Loup. La figure 2.4 présente la ventilation des types de culture assurés en 2020 par la Financière Agricole du Québec (FADQ, livrable 08b). La portion de terre agricole utilisée pour la culture du foin et les pâturages représente la plus grande superficie des terres cultivées avec 3705 km² suivis par la culture céréalière (blé, avoine, orge, millet...) qui occupe quelque 204 km². La catégorie « inconnu » regroupe les terres en friche, non cultivées, orphelines, en vente ou pour lesquelles aucune information n'est disponible. La catégorie « autre », quant à elle, regroupe les terres en locations, non assurables, semées d'engrais verts ou de cultures émergentes (asclépiade, féverole, etc.).

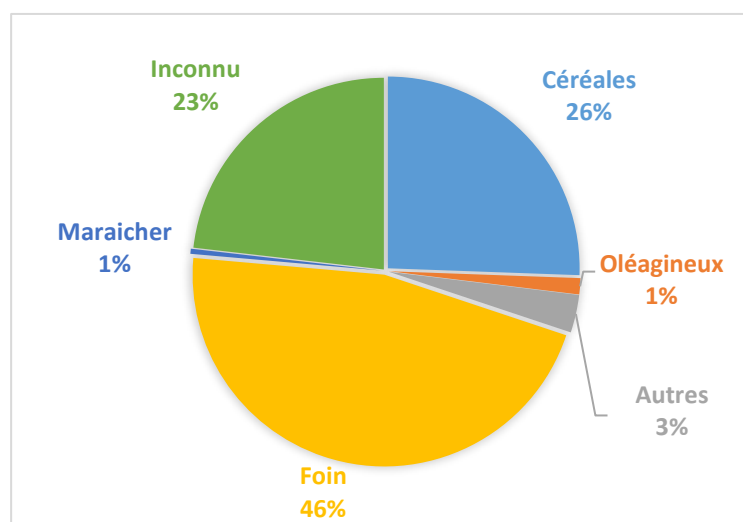
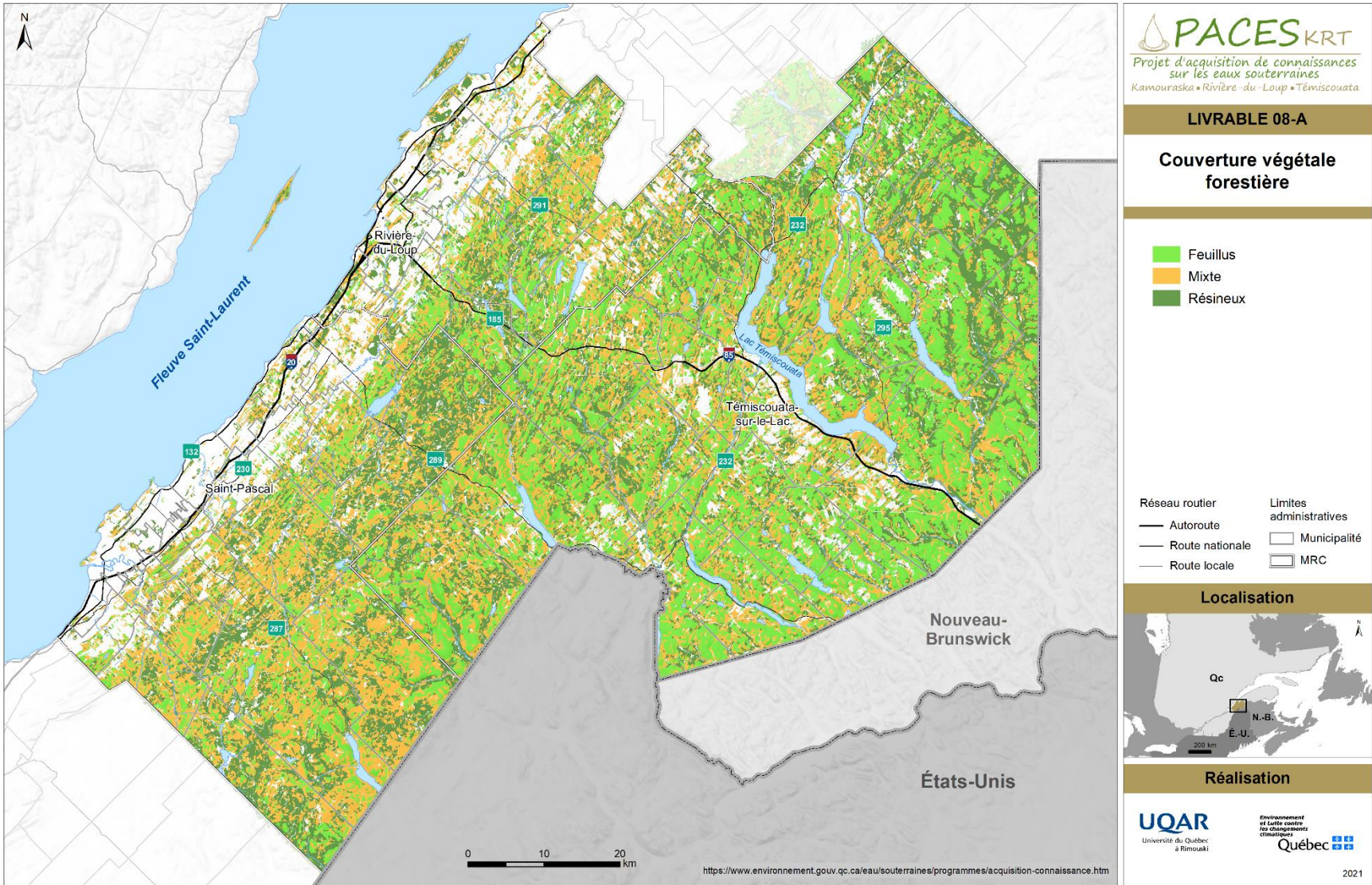
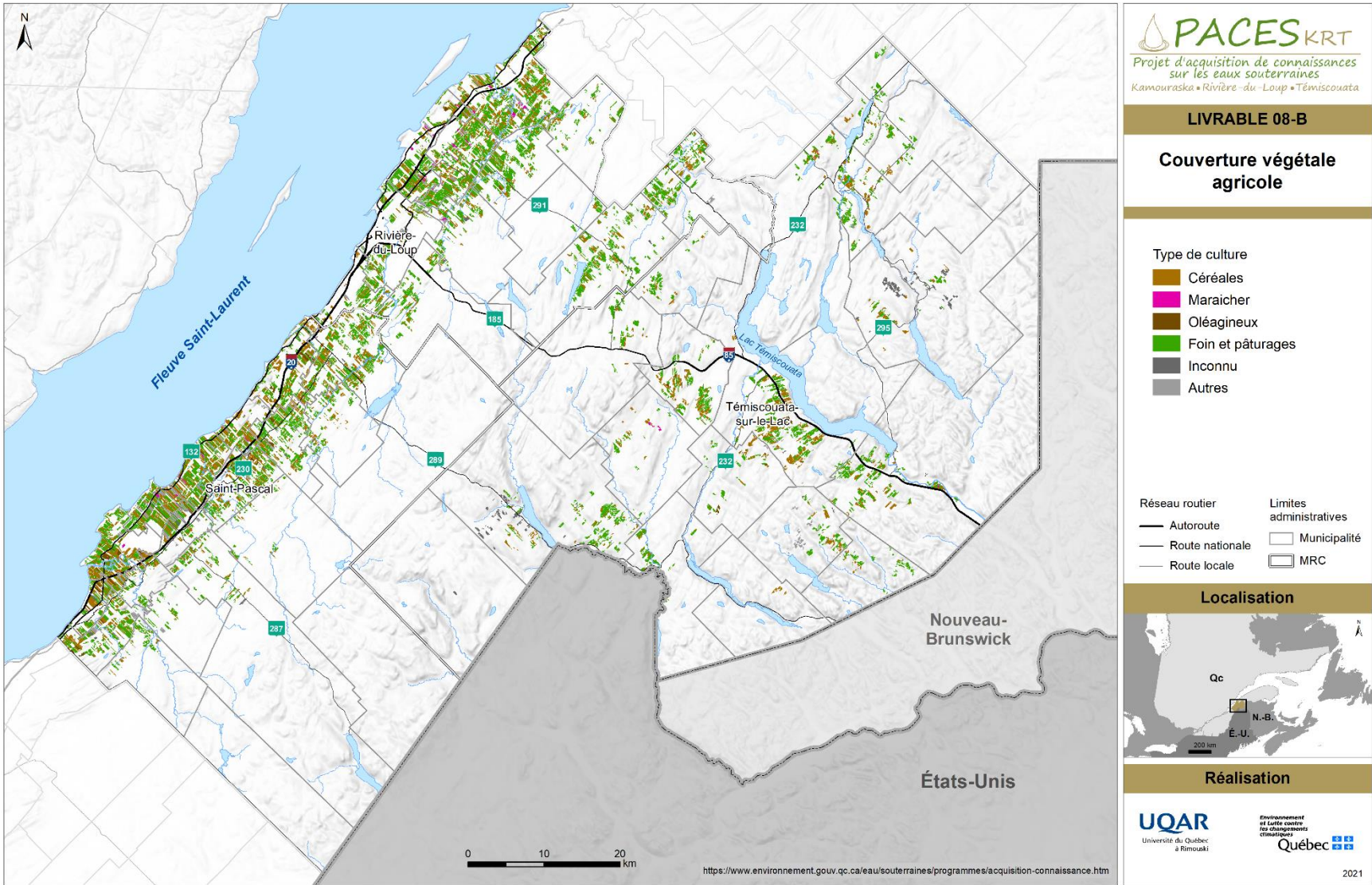


Figure 2.4-Distribution des types de cultures agricoles présentent dans le KRT (BDPPAD,2020)



LIVRABLE 08A



LIVRABLE 08B

2.2.4. Climatologie

Le territoire du PACES-KRT est caractérisé par la présence d'un climat de type subpolaire-subhumide intermédiaire au niveau de la plaine côtière et de type subpolaire-subhumide continental pour la portion du territoire sur les hauts plateaux appalachiens. Les contrastes de température entre les deux régions physiogéographiques du territoire sont influencés par le relief des Appalaches et les courants du fleuve Saint-Laurent. Ainsi, dans les hauts plateaux appalachiens, les températures sont de quelques degrés plus élevés en été et de quelques degrés plus bas en hiver. Les hivers durent généralement cinq mois complets, et les étés sont courts et chauds. En plus de tempérer le climat sur la côte, l'influence du fleuve apporte davantage de précipitations.

On retrouve 10 stations météorologiques sur le territoire du PACES-KRT dont 5 ont accumulé plus de 50 ans de données (voir livrable 26, section 2.2.7). La moyenne de précipitation annuelle sur ses 5 stations est 1011,54 mm dont plus de 70 % sont sous forme de pluie. La moyenne des températures est de 3,3°C. Les températures minimales, en janvier, varient entre -16,1 et -20,3°C et les maximums, enregistrés en juillet, varient entre 22,9 et 24,3°C.

Des 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 27)

2.2.5. Milieux humides

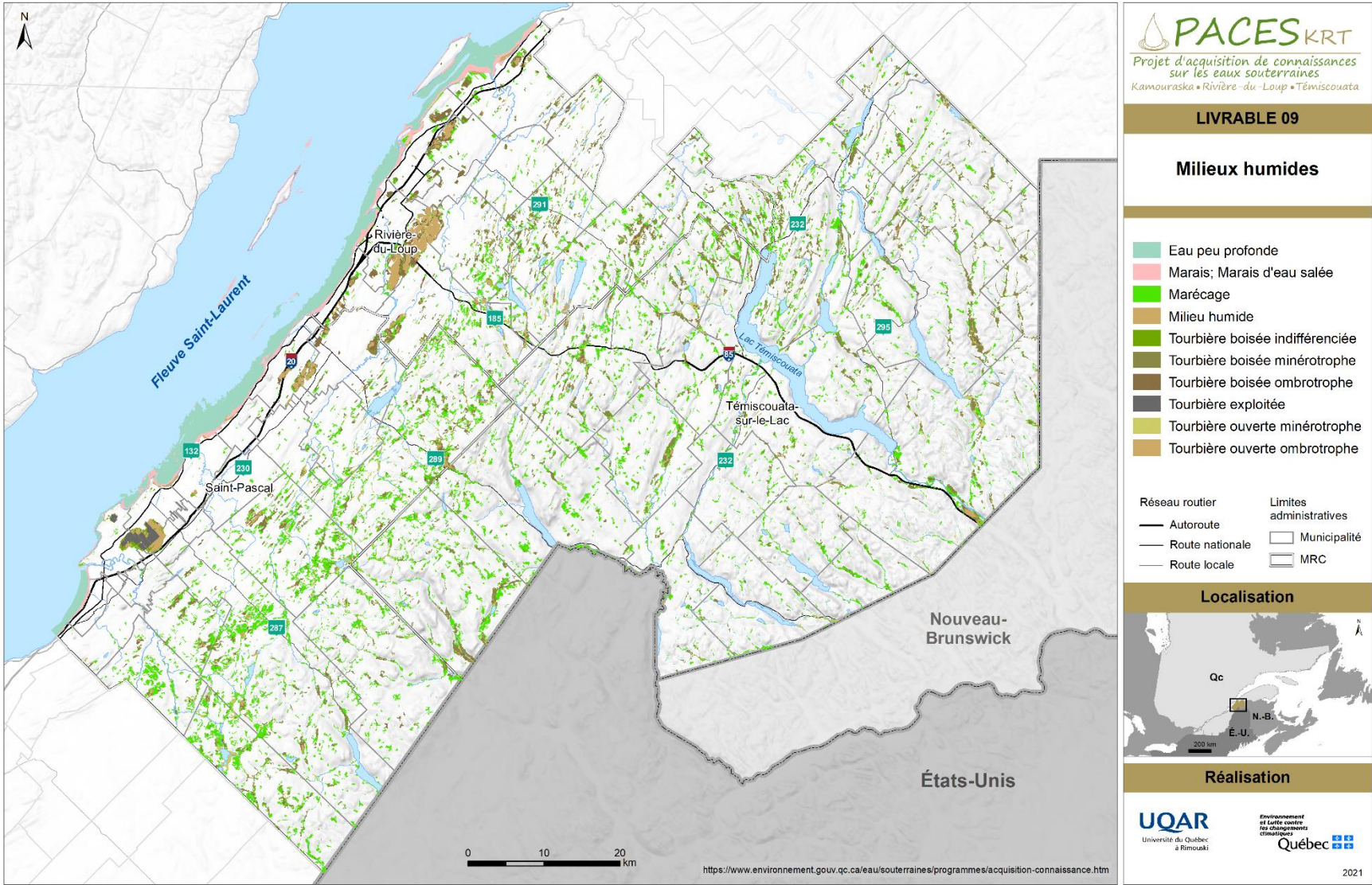
Le livrable 09 présente la localisation et les types de milieux humides. Ces données proviennent d'abord de la cartographie des milieux humides du Kamouraska fait par Canards illimités Canada, qui couvrent 9 km de la zone littorale et ont été cartographiés par LIDAR et orthophoto. Les autres données du territoire proviennent de la cartographie

des milieux humides potentiels 2019 du MELCC. Cette dernière source constitue une agrégation de différentes bases de données produites à d'autres fins et à des échelles différentes. Le résultat de cet assemblage dépend de la précision et de l'exactitude de chacune des sources de données utilisées. Ces données doivent être utilisées en restant vigilant en regard de leurs potentiels et limites. Le tableau 2.2 répertorie chacun des types de milieux humides ainsi que la superficie qu'ils couvrent sur le territoire du KRT. La majeure partie de ces milieux se retrouvent dans la plaine côtière sous forme de tourbière.

Tableau 2.2-Superficie des différents milieux humides en km² présents sur le territoire

Cultures	Superficie (km²)	% du territoire
Milieu humide indifférencié	10,1	0,1
Tourbières ombotrophes	41,9	0,6
Tourbières minérotrophes	221,7	3,0
Tourbières forestières indifférenciées	9,4	0,1
Eau peu profonde	64,2	0,9
Marécage	324,0	4,4
Marais	5,6	0,1
Total	212,1	9,2

Les tourbières de type minérotrophe (forestières ou non) dominent avec près de 221 km² de superficie. Deux tourbières de dimensions importantes se trouvent dans la région de Rivière-Du-Loup (32 km²) et de Rivière-Ouelle (17 km²). Les tourbières de la région de Rivière-du-Loup sont actuellement exploitées à plus de 50 %, principalement par les Tourbières Berger et par Premier Tech, alors que celles de Rivière-Ouelle le sont à 40 % par les Tourbières Lambert. La cartographie présentée n'est pas exhaustive et se base en partie sur de la photo-interprétation. Cependant, avec l'entrée en vigueur de la Loi sur la conservation des milieux humides et hydriques le 23 mars 2018, une cartographie plus pointue des milieux humides du KRT devrait être disponible au courant de l'année 2021.



LIVRABLE 09

2.2.6. Pédologie

La carte pédologique (livrable 11) provient des feuillets au 1 : 20 000 de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA). La représentation graphique des données de l'IRDA est faite à partir d'une réorganisation de l'information contenue dans les tables d'attributs. Cette réorganisation a été faite conformément au protocole du livrable "pédologie" développé par les projets PACES, et consiste principalement à la création d'un attribut "texture de sol" à partir des noms de séries de sols. Du point de vue agronomique un sol issu d'un dépôt de till peut être classé comme étant loameux. Une attention particulière a donc été portée afin de distinguer les sols issus de till (principalement localisés sur les hauts plateaux appalachiens) et les loams issus des dépôts alluviaux que l'on peut retrouver dans les fonds de vallées et dans la plaine côtière.

Pour la plaine côtière, les sols loameux et les sols argileux sont les unités pédologiques dominantes. Ces sols proviennent à la fois de l'invasion et de la régression de la mer de Goldthwait qui ont laissé en place des dépôts marins fins et sableux. On retrouve également la présence d'importantes superficies de sols organiques correspondant aux grandes tourbières de la région décrites dans la section précédente. Sur les haut-plateaux, les sols sont principalement composés de dépôts de till. Le till régional comporte une bonne proportion de gravier dans une matrice silto-argileuse ce qui limite le drainage vertical. On y retrouve quelques zones de dépôts organiques correspondant à des cédrières. Les sols de fonds de vallées sont des loams très bien drainés.

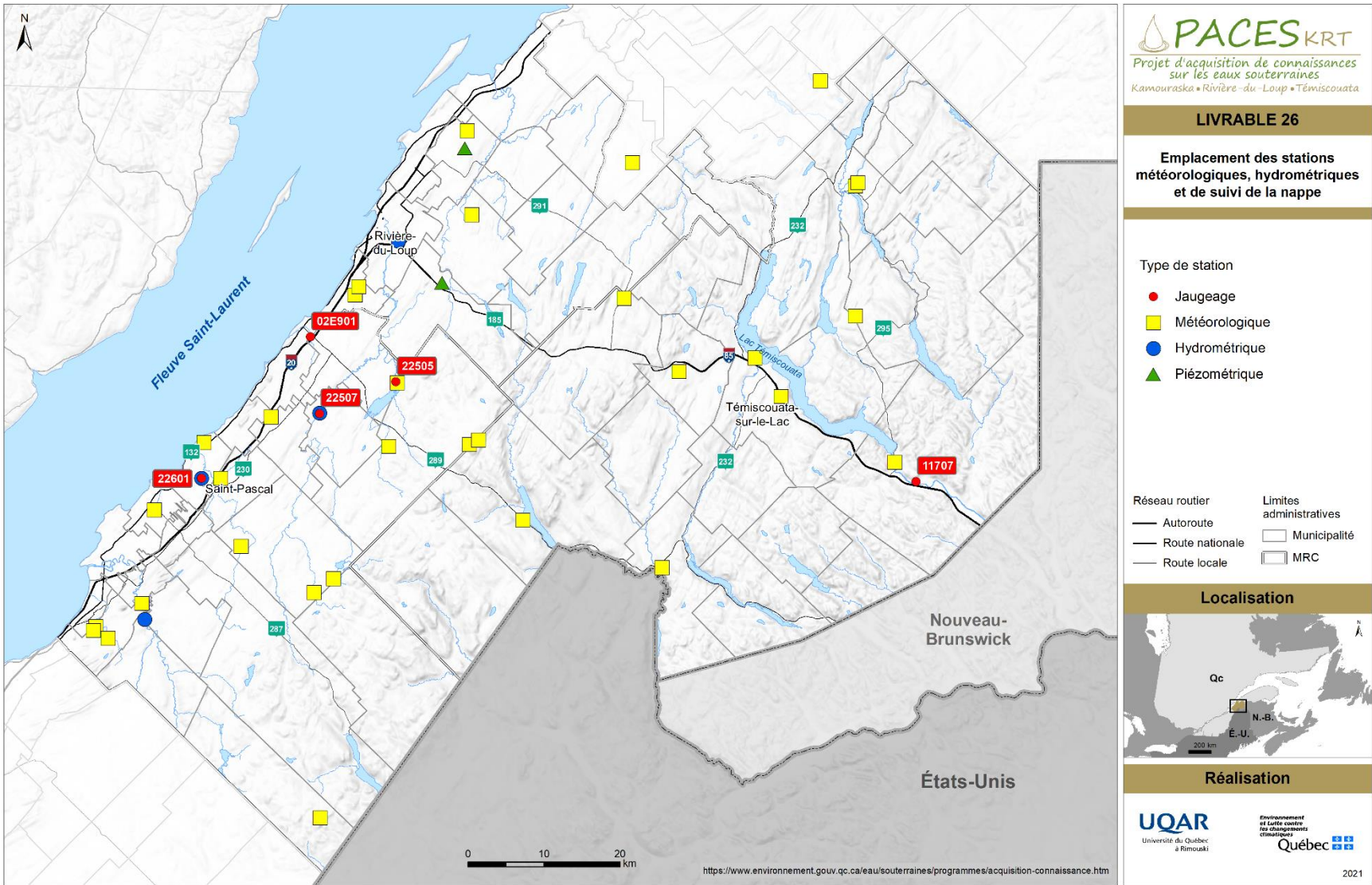


2.2.7. Réseau de surveillance météorologique, hydrométrique et piézométrique

Plusieurs stations de surveillance hydrométrique, météorologique (discuté à la section 2.2.4) et piézométrique sont réparties sur le territoire du PACES-KRT (tableau 2.3). Toutes ces stations sont entretenues par le gouvernement provincial. Pour les stations du réseau de suivi des eaux souterraines (RSES), seulement deux stations sont localisées dans la région de Rivière-du-Loup. Dix stations de surveillance climatiques sont actives sur le territoire, mais historiquement, plusieurs autres étaient présentes. Quant aux stations du Centre d'Expertise Hydrique du Québec, seuls les bassins versants des rivières Ouelle, Kamouraska et de Rivière-du-Loup sont jaugés (en rouge, livrable 26). Les stations de surveillance sont relativement bien réparties sur le territoire et seront utiles lors de la réalisation du bilan hydrique, pour le calcul de la recharge de l'aquifère rocheux à l'échelle régionale (livrable 26).

Tableau 2.3-Liste des stations de surveillance provinciales sur le territoire du PACES-KRT

No_Station	Nom	X UTM	Y UTM	Surveillance
7050388	Auclair	521969,296	5286724,400	Climatique
7050455	Barrage Morin	461720,554	5277495,430	Climatique
7053381	Kamouraska (Saint-Denis)	429875,746	5260505,350	Climatique
7055675	Notre-Dame-du-Lac	512250,924	5276067,350	Climatique
7056600	Rivière-Bleue	496766,729	5253425,570	Climatique
7056890	Saint-Arsène	470692,405	5310728,550	Climatique
7056922	Saint-Bruno-de-Kamouraska	441339,518	5255844,270	Climatique
7057024	Saint-Clément	492465,988	5306718,860	Climatique
7057720	Sainte-Rose-du-Dégelis	527292,427	5267494,930	Climatique
7058403	Témiscouata (Saint-Honoré)	491511,146	5288835,170	Climatique
22601	Kamouraska	436069,869	5264715,250	Hydrométrie
22704	Ouelle	428719,556	5246107,990	Hydrométrie
22507	Du Loup	451523,994	5273423,260	Hydrométrie
22513	Du Loup	461723,702	5296143,070	Hydrométrie
2247021	Saint-Arsène	470386,701	5308457,220	Piézométrie
2257001	Saint-Antonin	467541,947	5290702,500	Piézométrie



LIVRABLE 26

2.3. Environnement humain

2.3.1. Portrait socioéconomique

Le Bas-Saint-Laurent a une économie fortement orientée vers l'exploitation et la transformation de ses ressources naturelles. La part de l'emploi dans le secteur primaire y est 3 fois supérieure à la moyenne du Québec (7,2 % comparativement à 2,2 %). Cette dépendance aux ressources naturelles dont les valeurs sont sensibles aux fluctuations des marchés, combinée 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 (47,6 % de la population est rurale contre 18,5 % selon la moyenne québécoise) et donc par une population dispersée, résultant en une faible densité d'occupation (27,0 hab./km² pour Rivière-du-Loup, 9,6 hab./km² pour le Kamouraska et 5,3 hab./km² pour le Témiscouata).

Tableau 2.4-Croissance démographique des MRC de Rivière-du-Loup, Témiscouata et Kamouraska pour 2016*

Rang	MRC	Indice de vitalité économique	Composantes de l'indice		
			Revenu total médian des particuliers de 18 ans et plus	Taux de travailleurs des 25-64 ans	Taux d'accroissement annuel moyen de la population sur 5 ans
		n	\$	%	‰
50	Rivière-du-Loup	1,3599	32734	75,1	1,7
73	Kamouraska	-3,5664	29887	73,5	-4,9
91	Témiscouata	-9,3061	28118	67,1	-7,3

*institut de la statistique du Québec

D'après les données du tableau 2.4, seule la MRC de Rivière-du-Loup a vu sa population croître de manière constante au cours des derniers 5 ans avec un taux de 1,7 ‰. C'est d'ailleurs dans cette MRC que se trouve la plus grande ville du territoire qui regroupe plus du quart de la population du territoire (Rivière-du-Loup, 20 050 habitants) et dont la densité est la plus élevée du Bas-St-Laurent. Les MRC du Kamouraska et du Témiscouata ont subi, pour leur part, une forte décroissance de -4,9 % et -7,3 %, respectivement. Les indices de vitalité économique calculés par le MAMH en 2016 placent d'ailleurs la MRC du Témiscouata à la 91^e position, celle du Kamouraska à la 73^e position et celle de Rivière-du-Loup à la 50^e position sur les 104 MRC de la province. Cet indice est

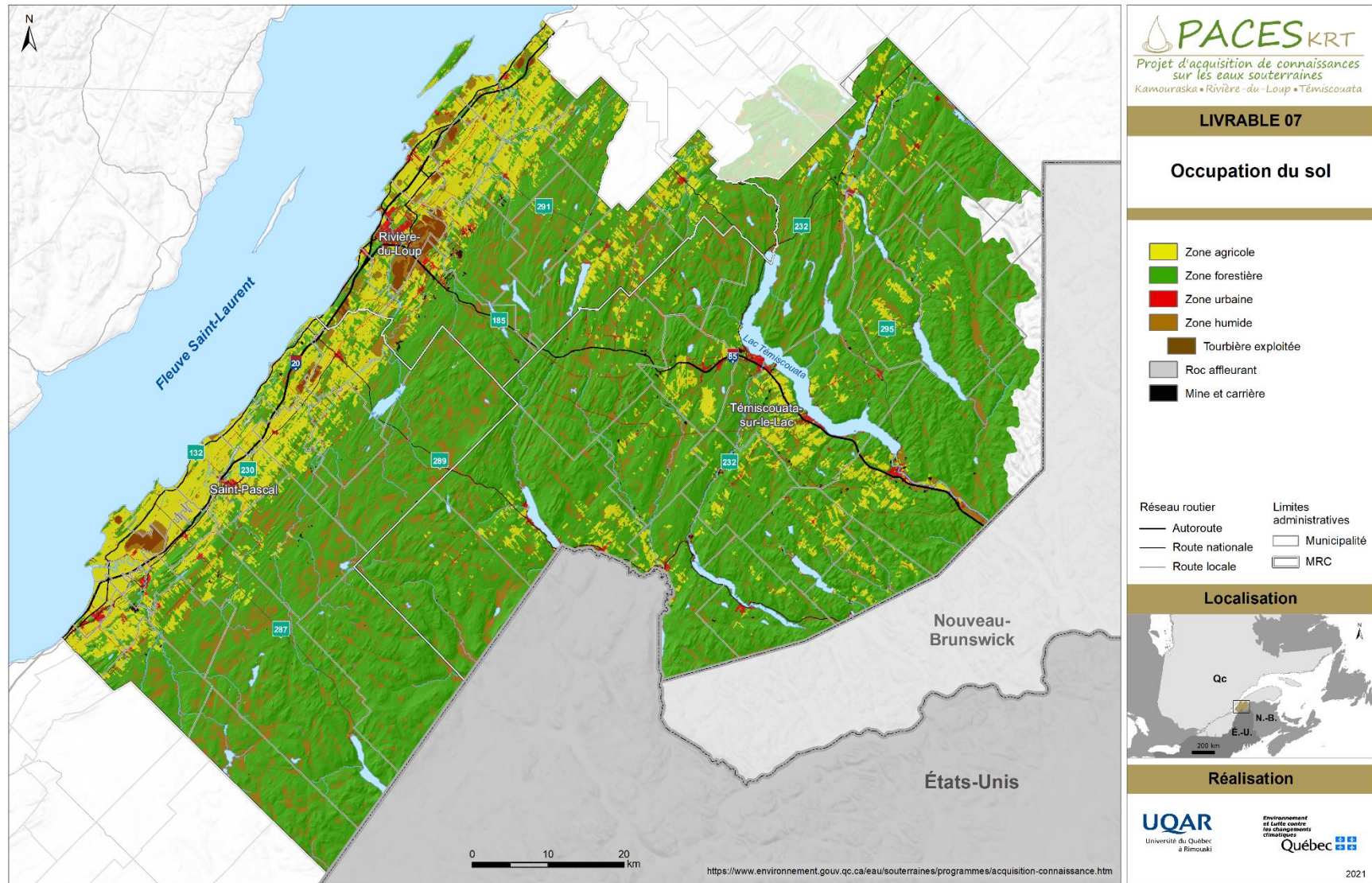
calculé à partir de la croissance démographique sur 5 ans, le niveau de vie de la population majeure, ainsi que le taux de travailleurs de 25 à 64 ans.

2.3.2. Occupation du sol

Les données utilisées afin de produire cette carte proviennent des données d'utilisation du territoire 2019 du MELCC. Le tableau 2.5 répertorie les superficies de chacune de ces catégories ainsi que le pourcentage que celle-ci représente à l'échelle du territoire. Cette occupation est également présentée au livrable 07. Bien que le territoire soit composé à plus de 60 % de forêt, la plaine côtière, elle, est majoritairement occupée par du territoire agricole. Les milieux humides sont nombreux (3291 répertoriés), mais sont généralement de faibles superficies. Quoi qu'en faible proportion sur le territoire, il semble que la plupart des périmètres urbains dans la MRC du Témiscouata se concentrent autour des grands lacs de la région, soit les lacs Témiscouata, Pohénégamook, Long, Touladi et le Grand lac Squatec. Les deux plus grands centres urbains se situent le long du fleuve avec près de 17 km² pour la ville de Rivière-du-Loup et 8,5 km² pour la ville de La Pocatière. Les autres centres urbains font tous moins de 5 km².

Tableau 2.5-Superficie des classes d'occupation du sol

	Superficie (km ²)	% du territoire
Forestier	4655,9	63,4
Agricole	2237,8	30,5
Milieu humide	266,5	3,6
Urbain	178,3	2,5



LIVRABLE 07

2.3.3. Affectation du territoire

L'affectation du territoire représente formellement l'utilisation possible du territoire et permet de la lier aux grandes orientations d'aménagement tout en répondant à un besoin de la collectivité en matière d'espace résidentielle, urbaine, industrielle, récréative, agricole, agroforestière, forestière et de conservation. Le **livrable 10** distribue cette affectation selon les grands espaces précédemment énumérés. Les données concernant l'affectation du sol proviennent essentiellement du portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT) du MAMH.

Tel que vu à la section 2.2.3 (livrable 08A), l'affectation forestière occupe la plus grande partie du territoire avec 6179,5 km² (57 %), surtout situé à l'est, près de la frontière avec le Nouveau-Brunswick ainsi que la bande centrale est sud-ouest et complètement absente de la plaine côtière. Il est à noter que les 760 km² des TNO du territoire sont complètement inclus dans cette catégorie. Le couvert forestier présent dans la plaine côtière (800 km²) et autour des lacs de la MRC de Témiscouata est à vocation agroforestière. L'agroforesterie couvre 11 % du territoire.

La seconde vocation d'importance du territoire est agricole avec une couverture de 28 %. Tel que mentionné précédemment dans la section 2.2.3, ces terres sont principalement situées dans la plaine côtière couvrant les MRC du Kamouraska et de Rivière-du-Loup. Bien que cette affectation soit bien présente dans la MRC du Témiscouata, les cultures déclarées sont de moindres importances (livrable 8b-couverture végétale agricole).

Deux aires protégées régionales d'importance sont présentes sur le territoire. La plus importante est le parc national du lac Témiscouata (zonage récréatif), dans la MRC du même nom, ayant une superficie de plus de 175 km², suivis par l'aire d'aménagement de Grande-Rivière, à cheval entre les MRC de Kamouraska et de L'Islet, qui a une superficie de 86 km². Le territoire abrite également 7 refuges biologiques : 3 habitats fauniques du rat musqué, 2 du cerf de Virginie ainsi que 4 écosystèmes forestiers

d'exceptions. La figure 2.5 distribue, en km², les différentes affectations du territoire des MRC étudiées durant le PACES-KRT.

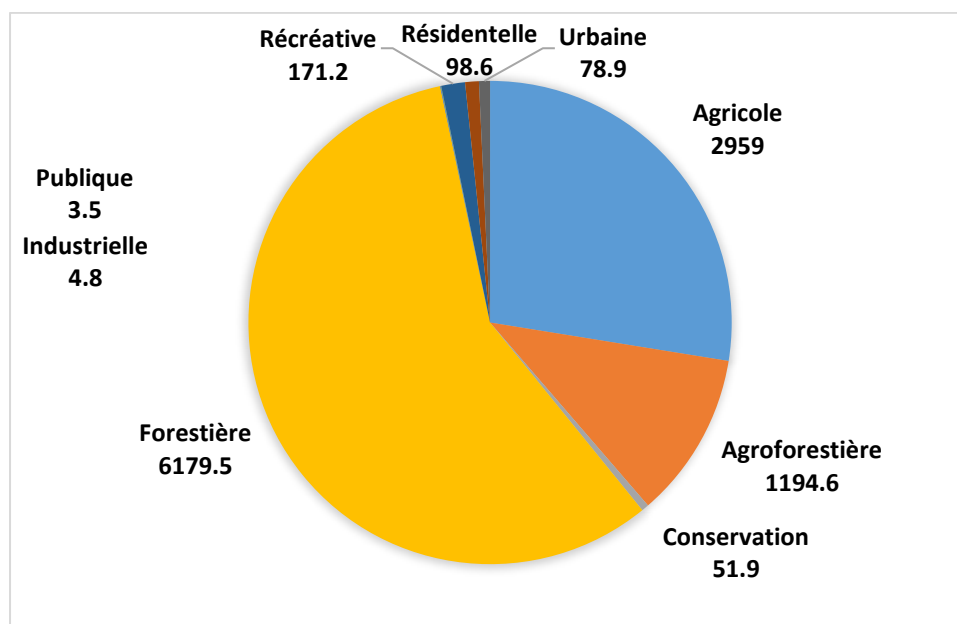
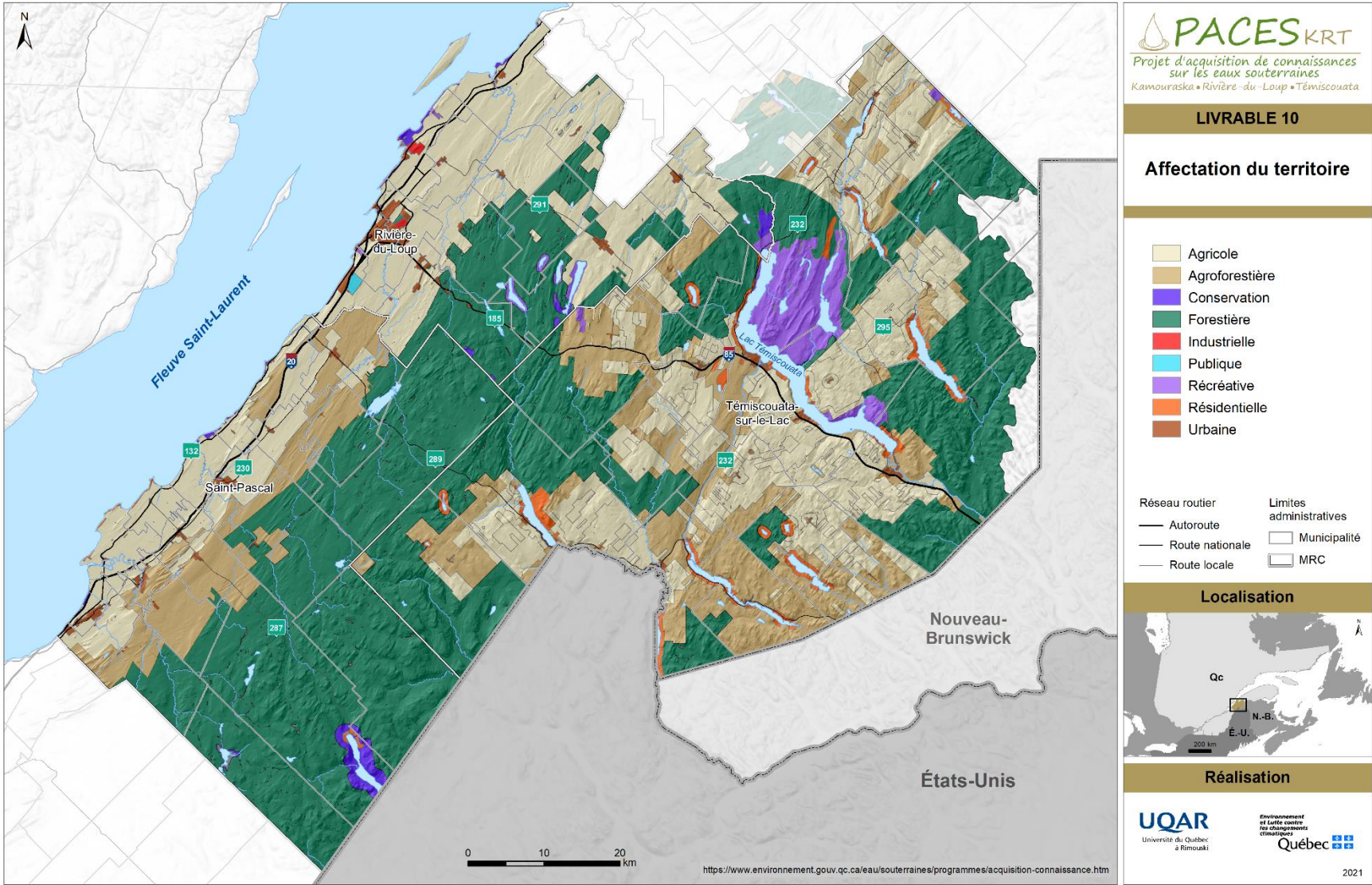


Figure 2.5-Distribution de l'affectation du territoire des MRC de Kamouraska, Rivière-du-Loup et Témiscouata; en km²



3. Acquisition de données et travaux réalisés

3.1. Compilation de l'information existante

La collecte et la compilation des données existantes sont des activités qui se réalisent tout au long des trois phases du projet, mais qui prend une place plus importante au courant de la phase I et II. Ces étapes sont primordiales pour constituer la base des connaissances hydrogéologiques et géologiques du territoire étudié dans le cadre d'une étude régionale. Cette compilation a débuté en avril 2018 et a été divisée en trois étapes : 1) l'acquisition des différentes bases de données, 2) l'acquisition de données géomatiques et 3) la saisie de données à partir des documents partagés avec les partenaires. La base de données contient près de 500 objets associés aux rapports hydrogéologiques et à la campagne terrain. Le tableau 3.1 résume les différentes sources de données utilisées.

Aux fins de ce projet, le MELCC a fourni et facilité l'obtention de bases de données pour la zone d'étude. Parmi celles-ci, on y retrouve entre autres :

- Système d'information hydrogéologique (SIH);
- Plusieurs forages géotechniques du MTMDET;
- Grilles de Climat Québec ;
- Apports verticaux préparés par le CEHQ;
- Géologie du socle rocheux (SIGEOM);
- Modèle numérique d'élévation;
- Couverture pédologique (IRDA) ;
- Base de données géochimique du Québec (BAGDEQ) ;
- Base de données de l'aménagement du territoire (BDAT) ;
- Banque de données des prélèvements d'eau souterraine ;
- Répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable ;
- Plusieurs autres.

Tableau 3.1-Source des données consultées

Thème	Source des données	Producteur des sources
Topographie	Base de données topographique au 20k du Québec (BDTQ)	MRN
Routes, limites municipales et toponymie	Adresses Québec (AQ_carto et AQ_pro)	Gouvernement du Québec
Modèle altimétrique numérique	MELCC	MELCC
Hydrographie	Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)	MERN Ressources Naturelles Canada
Limite des bassins versants	Bassins hydro multiéchelle-20k	MELCC Ressources naturelles Canada
Occupation du sol	Base de données sur l'aménagement du territoire (BDAT)	MAMH
Couverture végétale	Système d'information écoforestière (SIEF) Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD)	MFFP FADQ
Milieux humides	Milieux humides potentiels-2019 Cartographie des milieux humides du Kamouraska	MELCC Canards Illimités Canada
Affectation du territoire	Portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT)	MAMH
Pédologie	Aménagement rural et développement de l'agriculture (ARDA)	IRDA
Géologie du quaternaire	Géologie des formations superficielles du Bas-Saint-Laurent, Québec	Commission Géologique du Canada
Géologie du roc	Carte géologique du Québec	MRN
Piézométrie	Système d'information hydrogéologique (SIH)	MELCC
Propriétés hydrauliques	Rapports hydrogéologiques compilés	Consultants
Qualité eau souterraine et de surface	Banque de données géochimique du Québec (BADGEQ) Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA)	MRN MELCC
Hydrométrie	Réseau hydrométrique du Québec	CEHQ - MELCC
Météorologie	Programme de surveillance du climat	MELCC
Prélèvements eaux souterraines	Banque de données des prélèvements d'eaux souterraines	MELCC MAMH

3.1.1. Saisie de données à partir des documents existants

Une période significative de la *phase I* fut consacrée à la lecture et à la saisie des rapports hydrogéologiques numérisés dans les bureaux du MELCC en plus de ceux obtenus avec l'aide des municipalités du territoire (près de 115 rapports). Au final, 64 rapports hydrogéologiques produits par des consultants se sont avérés utiles et ont été compilés jusqu'à présent. Des lettres d'entente ont été signées avec chaque municipalité afin de pouvoir utiliser et diffuser l'information contenue dans ces rapports. Ces informations visaient:

- La localisation et la description de forages ou autres formes d'excavation;
- Les caractéristiques de puits d'observation et de piézomètres;
- La stratigraphie des dépôts;
- Les paramètres hydrogéologiques (conductivité hydraulique, transmissivité, capacité spécifique, emmagasinement);
- Les données piézométriques;
- Les données géochimiques;
- Les essais de pompage;
- La localisation d'activités potentiellement polluantes.

Pour que ces informations soient utiles à la construction de la base de données et à l'élaboration de cartes thématiques, elles doivent être accompagnées d'une localisation (coordonnées géographiques). Dans bien des cas, la localisation des forages devait être faite par imagerie aérienne (mosaïque haute définition) selon la description des emplacements ou des croquis accompagnant les rapports.

3.1.2. Intégration et validation des données existantes

Toutes les données colligées depuis le début du projet sont automatiquement intégrées dans un formulaire de saisie ACCESS de la BD fournie par le MELCC en début de projet. Le formulaire de saisie a été fait de telle sorte que toutes les informations obligatoires à la BD finale soient saisies au fur et à mesure de l'avancement du projet. En tout, 4 formulaires ont été élaborés, un pour la saisie des données des rapports

hydrogéologiques, un pour les données colligées durant les entrevues avec les propriétaires sur le terrain, un autre pour les résultats géochimiques et finalement un dernier pour la stratigraphie de chacun des puits. Chacun des puits ou forage (désignés en tant qu'« objet ») a été référencé à l'aide d'un identifiant unique sous la forme « KRT00000 ».

Tous les forages ont ensuite été validés selon les critères préétablis pour les projets PACES qui incluent :

- Géolocalisation du forage dans la Municipalité qui y est mentionnée
- Vérification de conflit avec les polygones des cours d'eau
- Confirmation de la profondeur des forages avec la somme des unités stratigraphiques qui le composent
- Validation de la profondeur du roc avec les forages adjacents (200m)
- Vérification des doublons par positionnement géographique

Chacun de ces critères est rattaché à des cotes de fiabilité qui ont servi, par la suite, à rejeter ou non l'information présente afin de produire les livrables finaux. Ces cotes sont répertoriées à la table « Validation » de la base de données. Les forages utilisés pour chacun des livrables ont ensuite été identifiés dans la table « Livrable » selon la fiabilité de chacun des forages. En tout, 6121 objets (figure 3.1) ont été intégrés à la BD du PACES-KRT. Notons que très peu de données sont disponibles pour les deux TNO de la MRC de Kamouraska et qu'elles sont plus parsemées dans la MRC de Témiscouata.

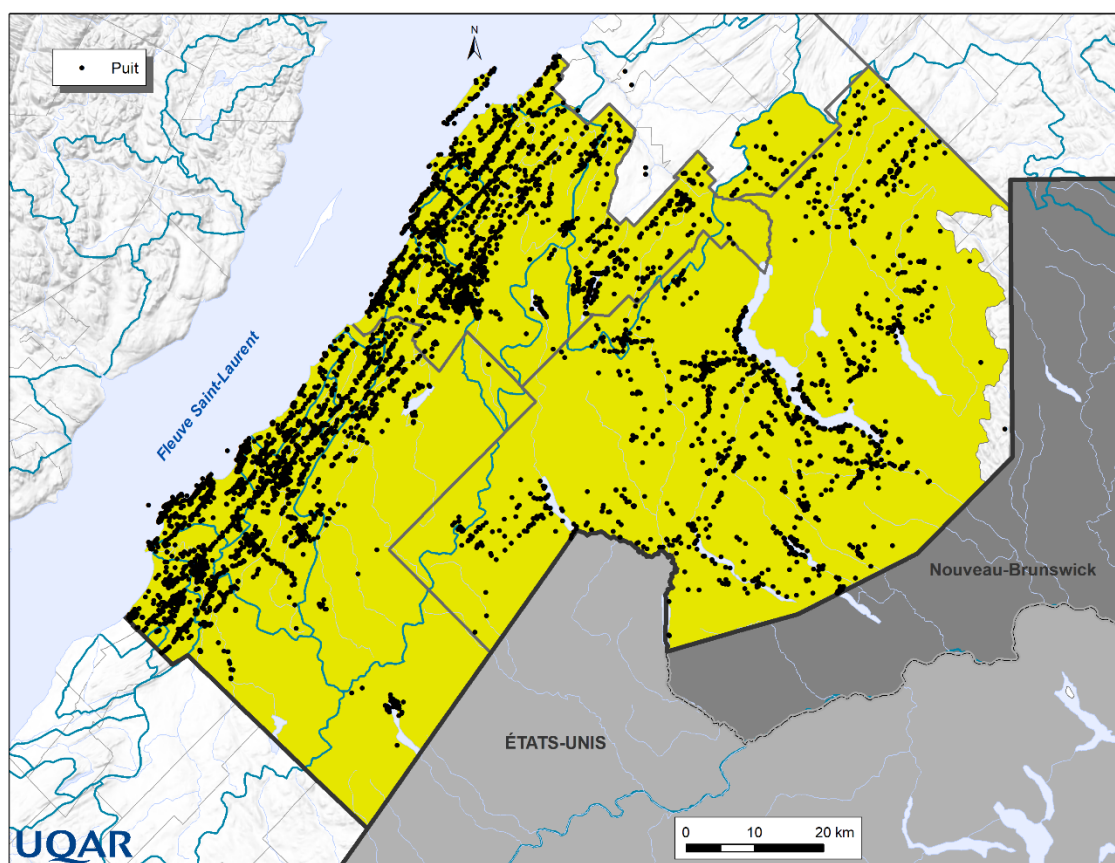


Figure 3.1-Localisation de tous les objets ayant servi à la production des livrables du PACES-KRT

3.2. Travaux de caractérisation

Les travaux terrain se sont échelonnés de juin 2019 à octobre 2020 (tableau 3.2), la campagne majeure ayant eu lieu à l'été 2019. La campagne d'échantillonnage d'eau a permis d'échantillonner 160 résidences en 2019 et 86 en 2020 (figure 3.5). Les forages dans les dépôts meubles et dans le roc ainsi que les levés géophysiques ont été réalisés avec la contribution de la compagnie de forage Puitbec inc. et l'équipe du professeur Lefebvre de l'INRS (figure 3.2). L'instrumentation de sept rivières du bassin versant de la rivière Kamouraska ainsi que les mesures de débits sur ces mêmes rivières pour constituer les courbes de tarages ont été réalisées durant l'ensemble de la période (figure 3.2). Les mesures pour estimer les propriétés hydrauliques du milieu saturé et non saturé ont aussi été réalisées sur une douzaine de sites (non présenté sur les cartes). Malgré les conditions sanitaires, les travaux terrain de l'été 2020 ont tous été réalisés, mais un peu plus tardivement dans la saison qu'initialement planifiée. Chaque équipe s'est conformée aux mesures sanitaires imposées par la Santé Publique du Bas-Saint-Laurent, mais aussi révisées par l'UQAR. Chaque déplacement a été signalé et justifié à notre administration. Le port du masque, et de gants ainsi que la désinfection des instruments ont été réalisés tels que préconisés. De plus, la distanciation sociale, aussi bien sur le terrain que dans les véhicules au cours des transports, a été respectée. Nous tenons d'ailleurs ici à remercier tous les citoyens qui nous ont accueillis sur leur terrain malgré les conditions.

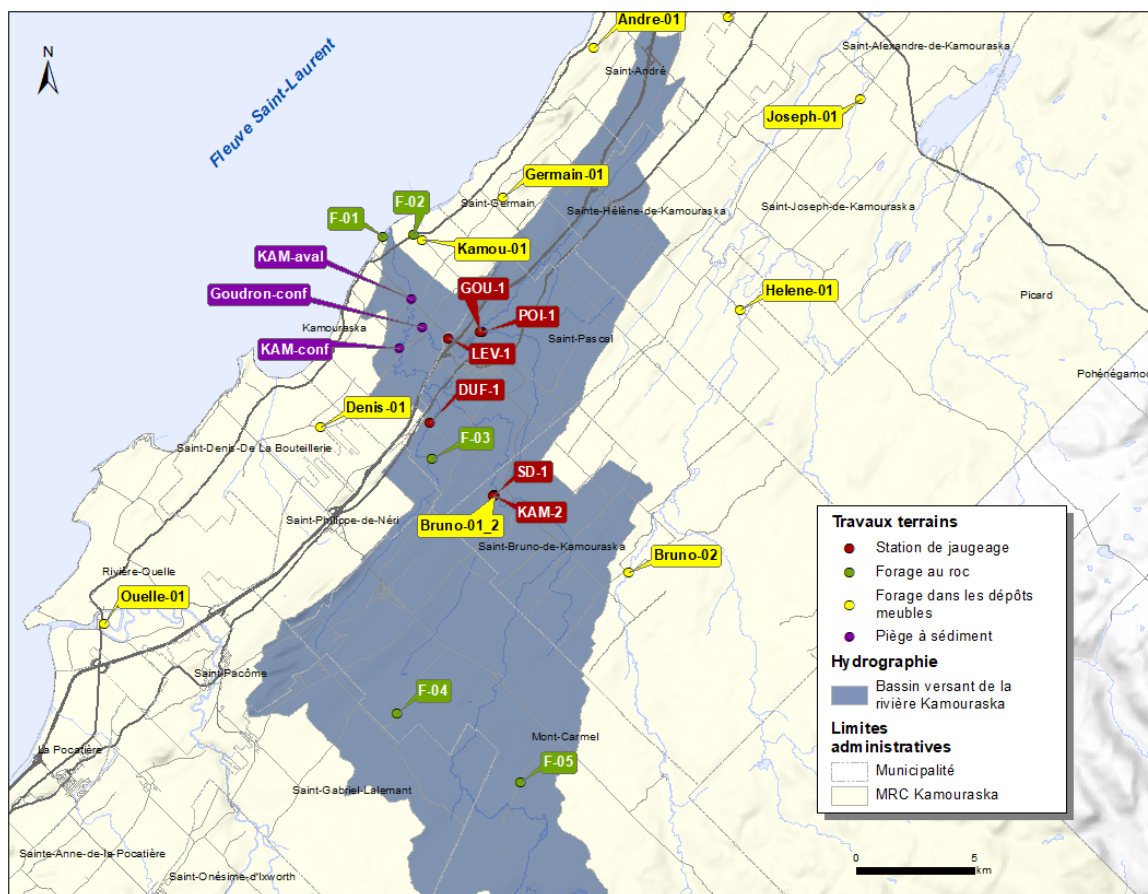


Figure 3.2-Carte de localisation des forages au roc, des stations de jaugeage et des forages dans les dépôts meubles dans le bassin versant expérimental

Tableau 3.2-Résumé des travaux terrain du PACES-KRT

Nature des travaux	Dates	Synthèse
Échantillonnage d'eau souterraine	3-28 juin 2019	Échantillonnage de 160 résidences privées
Forage dans les dépôts meubles	2-4 juillet 2019	Sondage stratigraphique de 11 sites. Aménagement de 6 piézomètres
Forage dans le roc	8-15 juillet 2019	Forages de 5 puits de 100 à 150 m dans le bassin versant de la rivière Kamouraska
Jaugeage du BV de la rivière Kamouraska	3-7 juin 2019	Pose de 5 stations de jaugeage dans la rivière Kamouraska et ses tributaires.
Échantillonnage et suivi des débits des rivières	16-19 septembre 2019	Échantillonnage des 5 sites avec stations de jaugeage. Prise des débits des rivières jaugés
Perméamètre de Guelph	3-7 juin 2019	Essai de conductivité hydraulique sur 12 sites dans le bassin versant de la rivière Kamouraska
Essais de perméabilité	16-19 septembre 2019	Slug test dans les puits au roc et les piézomètres dans les dépôts meubles.
Remise en fonction des stations de jaugeage du BV Kamouraska	1-2 septembre 2020	
Suivi des matières en suspension, installation de pièges à sédiments, turbidimètre	1 septembre au 26 octobre 2020	Échantillonnage et suivis de 3 stations dans le bassin versant de la rivière Kamouraska
Échantillonnage eau souterraine sur l'île Verte et projet résurgence (SGD)	10-14 août 2020	Échantillonnage d'eau de 23 résidences privées. Échantillonnage radon-radium plage du phare – vol de drone.
Échantillonnage eau souterraine dans zones ciblées	30 août -4 septembre 2020	Échantillonnage d'eau de 63 résidences privées
Projet résurgences eau souterraine (SGD) aux îles-de-la-Madeleine en collaboration avec U. Laval	20 septembre-4 octobre 2020	Échantillonnage radon-radium, plage de la Martinique et plage de Bassin est
Suivi courbe de tarage	Été 2020-été 2021	Faire le suivi des stations de jaugeage du BV Kamouraska
Suivi des matières en suspension, installation de pièges à sédiments, turbidimètres	Mai 2021 – en cours	Échantillonnage et suivis des stations dans le bassin versant de la rivière Kamouraska

3.2.1. Forages

Forages dans les dépôts meubles (sondages)

Les sondages stratigraphiques visent à préciser la séquence et l'épaisseur des unités stratigraphiques. Les sondages permettent également l'installation de piézomètres aux endroits où les conditions hydrogéologiques sont favorables. La localisation des sondages s'est faite de façon à bien représenter les contextes hydrostratigraphiques de la région d'étude, de permettre de combler des besoins spécifiques où l'information était insuffisante, mais aussi de valider l'interprétation des données déjà compilées dans le projet. Tous les forages ont été réalisés sur des terrains privés où les autorisations avaient été préalablement obtenues.

Les travaux se sont déroulés au cours du mois de juillet 2019 en collaboration avec l'équipe de l'INRS-ETE à l'aide d'une foreuse géotechnique multifonctionnelle (Geotech605D) (figure 3.3). Le sondage s'est fait par rotopercussion (RPSS) avec un marteau hydraulique et avec de l'air comprimé pour éjecter le matériel venant du sondage. 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 utilisés 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 » à l'installation de puits d'observation.



Figure 3.3-Foreuse de l'INRS lors des forages dans les dépôts meubles

Au total, 10 sondages ont été réalisés. Parmi les sondages stratigraphiques, 6 ont été aménagés (Joseph01, Germain01, Denis 01, Bruno01_2, Bruno02 et André02; figure 3.2) en piézomètres afin d'échantillonner l'eau souterraine, de procéder à des essais hydrauliques et de faire un suivi de la variation du niveau de la nappe. Les piézomètres sont composés d'un tube de PVC de 25,40 mm de diamètre et d'une crépine à la base où l'eau pénètre par des stries horizontales espacées de 2,50 mm ayant une ouverture de 0,15 mm. La localisation des sondages est présentée sur la figure 3.2, tandis que les descriptions stratigraphiques des sondages et les schémas de conceptions des piézomètres sont présentés à l'annexe 1.

Forages au Roc

Au Bas-Saint-Laurent, les étés 2017-2018 ont été particulièrement secs et plusieurs pénuries d'eau ont été constatées sur le territoire. Ces conditions font en sorte que les gens qui ont un puits de surface se tournent vers des puits terminés au roc (pour information : <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1139354/eau-potable-secheresse-forage-puits-artesien>). Il est donc anticipé que l'aquifère rocheux régional subira une pression supplémentaire dans un proche avenir. Jusqu'à présent, les profondeurs forées dans le roc étaient principalement de 30 à 50 m sous la surface. Le portrait de la qualité de l'eau du PACES-NEBSL, la région voisine, montrait que l'eau captée à ces profondeurs dans le roc (peu importe la nature lithologique de la roche encaissante) était généralement de bonne qualité. Par contre, il est susceptible d'observer une dégradation de la qualité de l'eau à des profondeurs supérieures (captage d'une eau plus minéralisée et plus évoluée, Chaillou *et al.*, 2018). Or, sur le territoire du KRT, des puits forés à des profondeurs supérieures à 50 m dans le roc sont peu fréquents. Il était donc nécessaire de tracer un portrait de la qualité de l'eau à une profondeur au-delà des puits existants. Cinq puits au roc profonds ont été forés (figure 3.2) sur un transect S-N, des hauts plateaux à la plaine côtière. Ces 5 puits ont tous été forés dans le bassin versant de la Kamouraska (figure 3.2), un petit bassin versant d'une superficie de 296 km² et qui s'étend sur les deux principaux contextes physiogéographiques de la région : la plaine côtière et les hauts plateaux appalachiens.

Le choix de la profondeur et de la localisation des puits s'est fait en fonction de trois objectifs : (1) mettre en place un transect de puits profonds dans un bassin versant représentatif de la région afin de mesurer un gradient amont aval de l'évolution géochimique de l'eau souterraine, (2) échantillonner de l'eau souterraine à multiples profondeurs; (3) tracer un portrait géochimique de l'eau souterraine profonde susceptible d'être soutirée dans l'avenir en raison des changements environnementaux.

En mars 2019, le MELCC a lancé un appel d'offres commun pour les besoins de forage de tous les projets PACES. Le MELCC a alors confié le contrat à la compagnie Puitbec de Victoriaville qui est venue travailler dans notre région en juillet 2019. Cinq puits ont été forés avec une foreuse conventionnelle de type rotopercussion (figure 3.4). 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 roc. Chacun des puits a été construit de la même façon avec un tubage externe d'un diamètre de 0,25 m (10 pouces) et un tubage interne de 0,15 m (6 pouces) de diamètre. Ils ont permis (1) d'analyser la qualité de l'eau souterraine profonde (2) d'effectuer des essais de pompage de courte durée pour obtenir les paramètres hydrauliques et (3) d'installer des capteurs de pression permettant de faire le suivi des variations journalières du niveau de la nappe toutes les six heures.



Figure 3.4-Forage du puits F-01 à Kamouraska avec une foreuse conventionnelle de type rotopercussion par la compagnie Puitbec

Tableau 3.3-Détail de construction des puits des forages au roc

#Puits	Profondeur du forage (m)	Longueur. tubage interne (m)	Niveau statique (m)	Débit mesuré (L/min)
F-01	152,4	6,1	5,5	26,5
F-02	97,5	6,1	3,9	56,8
F-03	121,9	20,5	4,2	3,8
F-04	97,5	6,1	2,1	87,0
F-05	103,6	10,7	2,5	3,8

3.2.2. Évaluation des paramètres hydrauliques

Essais de pompage

Les essais de pompage sont utilisés pour caractériser les propriétés hydrauliques des aquifères. Ces essais permettent d'obtenir de l'information sur toute la hauteur du réservoir, contrairement aux essais de perméabilité (essais à charge variable) qui donnent une information plus locale. Le but de ces essais de pompage est de déterminer la transmissivité et la conductivité hydraulique qui caractérisent les formations aquifères des forages au roc et dans les dépôts meubles.

Les essais de pompage ont été effectués dans 5 puits au roc et les 6 piézomètres installés en dépôt meuble en septembre 2019. Pour les puits au roc, une pompe Waterra Tornado fut utilisée. Pour les piézomètres dans les dépôts meubles, une pompe péristaltique *Spectra Field Pro* de Waterra a été utilisée. Les puits ont été pompés à des débits variant entre 4 et 36 L/min dépendamment du contexte. Pour chacun des essais de pompage, un capteur de pression (de type Hobo ou Solinst) était au préalable immergé au fond du puits et un autre laissé à l'extérieur afin de mesurer en temps réel les variations de niveau d'eau à l'intérieur du puits. Des mesures de niveau d'eau ont aussi été prises manuellement avec la sonde Héron durant le pompage et durant la remontée. Finalement, les résultats de conductivité hydraulique (K) et de transmissivité (T) ont été calculés en remontée à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob. Ces données ont permis de valider l'information présente dans le SIH.

Essai au perméamètre de Guelph

Douze relevés pour déterminer la conductivité hydraulique (K) des dépôts meubles ont été faits à l'aide d'un perméamètre de Guelph. L'obtention du K du milieu non saturé permet de caractériser la perméabilité des différents types de matériaux meubles 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 matériaux meubles de surface du bassin versant de la rivière Kamouraska à l'aide de la cartographie quaternaire de la région. Selon le type de milieu, la « single head » (SHM) ou la « double head » method (DHM) était utilisée. Ces données ont permis de valider les données de conductivités hydrauliques des sédiments de surface et ont été utilisées dans nos calculs de recharge. Ils sont présentés dans le tableau 5.3.

3.2.3. Échantillonnage d'eau

Durant le mois de juin 2019, 160 échantillons d'eau potable provenant de puits privés ont été récoltés selon une grille structurée en case de 7 km par 5 km qui exclut les territoires non organisés (TNO) (figure 3.5). Les lieux d'échantillonnage ont été déterminés en fonction des informations déjà disponibles obtenues via le SIH. L'objectif de cette stratégie d'échantillonnage était d'avoir un maximum d'informations (stratigraphie, niveau d'eau...) en un point, tout en couvrant l'ensemble du territoire. À l'été 2020, la méthodologie d'échantillonnage a été différente afin de répondre aux besoins de nos partenaires. Ainsi, 23 échantillons supplémentaires ont été prélevés sur l'île Verte (Notre-Dame-des-Sept-Douleurs) non seulement pour répondre à un projet de recherche sur les résurgences d'eau souterraine (voir section 8.2), mais également afin d'avoir une idée de la qualité de l'eau sur le seul milieu insulaire habité de notre territoire. De plus, 63 échantillons supplémentaires ont été prélevés sur le territoire du KRT en ciblant plus particulièrement les endroits où des dépassements des normes de potabilités (arsenic, fluorure, baryum et salinité) avaient été enregistrés. Cet échantillonnage ciblé nous a permis de relever des problématiques de qualité de l'eau spécifiques aux propriétés du territoire d'étude. En plus des eaux souterraines, la rivière Kamouraska et 5 de ses affluents ont été également échantillonnés (figure 3.2). Les échantillons de rivières ont été analysés de la même façon que les échantillons d'eau souterraine.

Sur chaque point d'échantillonnage, plus d'une quarantaine de paramètres chimiques et géochimiques (tableau 3.4) ont été analysés par un laboratoire certifié (Bureau Veritas, anciennement Maxxam Analytique) comme exigé par le MELCC. Ces paramètres permettent d'obtenir le « bruit de fond géochimique » des eaux souterraines du territoire. Ce « bruit de fond » informe sur la qualité et la potabilité intrinsèques de la ressource. Il évolue peu au cours du temps puisqu'il résulte principalement de la géologie régionale. En complément, des échantillons ont aussi été collectés pour des analyses bactériologiques effectuées dans un autre laboratoire certifié de la région (Agro-Enviro-Lab). Ces analyses permettent d'avoir une vue instantanée de la qualité et de la potabilité de l'eau souterraine. Ces paramètres évoluent assez rapidement, principalement en réponse aux activités de surface. D'autres échantillons ont également été prélevés afin de faire l'analyse de paramètres géochimiques plus spécifiques tels que les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), le radon (^{222}Rn), le carbone inorganique dissous (CID), la signature isotopique du CID ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) et le méthane (CH_4). Le méthane, le radon et le CID ont été analysés dans les laboratoires de l'ISMER-UQAR. Les analyses des isotopes stables de l'eau et du CID ont été effectuées dans les laboratoires du GEOTOP à l'UQAM. Ces analyses complémentaires permettent (1) d'évaluer l'âge, l'origine et les temps de résidence de l'eau dans le sous-sol et (2) d'établir si des réservoirs profonds sont connectés aux réservoirs de surface qui contiennent l'eau souterraine.

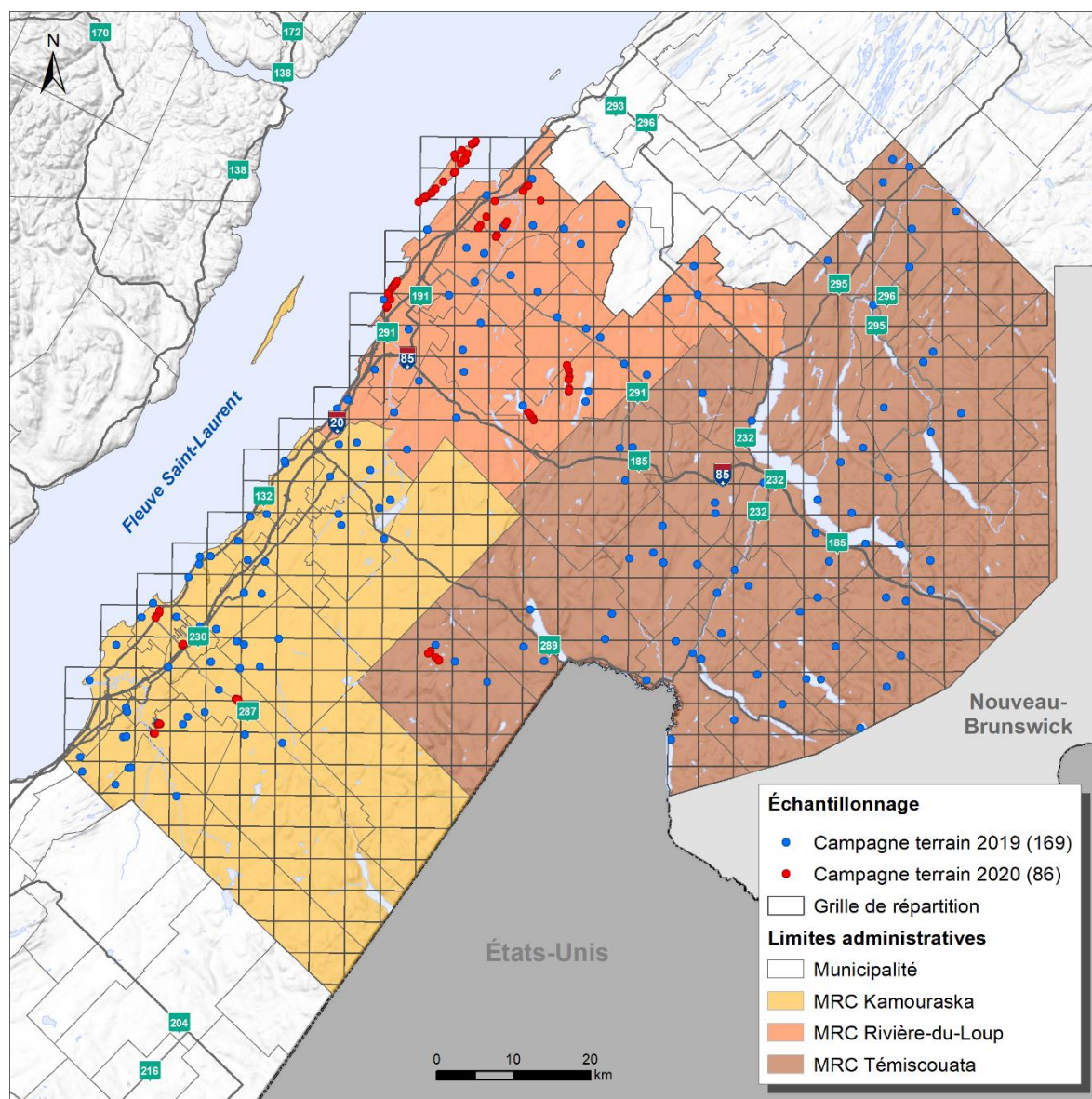


Figure 3.5-Grille d'échantillonnage pour le territoire du PACES-KRT. Les points correspondent aux puits privés échantillonnés par l'équipe de l'UQAR.

Tableau 3.4-Éléments analysés sur chaque échantillon prélevé. Les méthodes et incertitudes analytiques sont rapportées dans l'annexe 2.

Métaux		Anions	Autres
Aluminium (Al)¹	Lithium (Li) ¹	Alcalinité totale ¹	Azote ammoniacal ¹
Antimoine (Sb)¹	Magnésium (Mn) ¹	Bromures ¹	Phosphore total inorganique ¹
Argent (Ag)¹	Molybdène (Mo) ¹	Chlorures ¹	Sulfures totaux ¹
Arsenic (As)¹	Nickel (Ni) ¹	Fluorures ¹	Azote total ¹
Baryum (Ba)¹	Potassium (K) ¹	Nitrites ¹	Coliformes totaux ²
Béryllium (Be)¹	Plomb (Pb) ¹	Nitrates ¹	Bactéries atypiques ²
Bismuth (Bi)¹	Sélénium (Se) ¹	Sulfates ¹	Escherichia coli ²
Bore (B)¹	Silicium (Si) ¹		Entérocoques ²
Calcium (Ca)¹	Sodium (Na) ¹		Isotopes stables de l'eau ³
Cadmium (Cd)¹	Strontium (Sr) ¹		Isotope du radon ³
Chrome (Cr)¹	Titane (Ti) ¹		Carbone inorganique dissous ³
Cobalt (Co)¹	Uranium (U) ¹		Méthane ³
Cuivre (Cu)¹	Vanadium (V) ¹		
Étain (Sn)¹	Zinc (Zn) ¹		
Fer (Fe)¹			

¹Analyses faites dans le laboratoire certifié Bureau Veritas ; ²Analyses faites dans le laboratoire certifié Agro-Enviro-Lab; ³Analyses faites dans les laboratoires de l'UQAR

Lors de la rencontre avec le propriétaire du puits, un dépliant qui présente les grandes lignes du PACES-KRT, de l'information relative à l'eau souterraine et sur les normes de potabilité de l'eau, était remis et présenté verbalement (annexe 3). Ensuite le protocole d'échantillonnage était brièvement expliqué, puis la lettre d'entente était signée (annexe 4). Finalement quelques questions concernant la structure du puits, les activités potentiellement polluantes, la perception de la qualité de l'eau étaient posées au propriétaire du puits, afin de remplir le formulaire d'acquisition de données terrain (annexe 5).

Tous les échantillons ont été prélevés suivant le protocole élaboré pour l'ensemble des projets PACES (GRIES, 2010). La grande majorité des puits échantillonnés étaient actifs donc

fréquemment pompés, mais dans l'optique d'obtenir une eau représentative de la formation géologique dans laquelle elle circule, le puits était purgé jusqu'à la stabilisation des paramètres physico-chimiques (pH, température, salinité, conductivité et d'oxygène dissous). Ces derniers étaient mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multi paramètres YSI (modèle : 600XLM; figure 3.6)



Figure 3.6-Échantillonnage d'un puits privé dans le Témiscouata

Pour chaque échantillon, six bouteilles, fournies par le laboratoire d'analyse Bureau Véritas, étaient préidentifiées selon un numéro de séquentiel KRTXXXX, et remplies. Ces dernières étaient ensuite conservées dans une glacière puis dans un réfrigérateur jusqu'à leur envoi au laboratoire de la compagnie à Québec. Les envois ont eu lieu une fois par semaine durant toute la période d'échantillonnage. Chacun de ces échantillons était soumis à l'analyse d'une trentaine de paramètres physico-chimiques présentés dans le tableau 3.4. Une bouteille de 250 mL fournie par le laboratoire Agro-Enviro-Lab de La Pocatière était également remplie

afin de faire l'analyse bactériologique de l'eau de consommation. Ceux-ci étaient acheminés via un transporteur tous les jours au laboratoire.

Pour les analyses effectuées à l'UQAR, une bouteille de 250 mL en verre remplie par débordement a été collectée à chacune des stations afin de faire l'analyse du radon (^{222}Rn) à l'aide d'un Rad7 (). Les analyses en radon étaient faites le soir même de la récolte de l'échantillon.

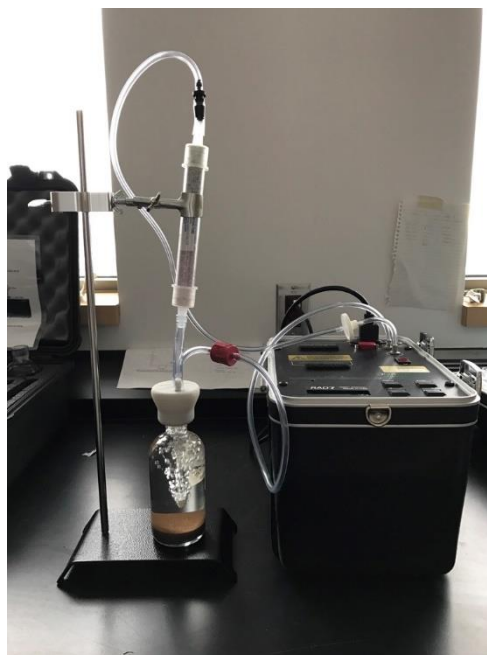


Figure 3.7-Montage de Rad7 pour l'analyse du radon dans l'eau; technique « wat-250 »

Le carbone inorganique dissous (CID) et le méthane (CH_4) sont également analysés à l'UQAR. L'échantillonnage s'est fait dans des bouteilles de 30 mL en verre, rempli par débordement puis fermé de manière hermétique avec un septum et une pince à sertir (figure 3.8). Par la suite, les échantillons étaient piégés avec une solution de chlorure mercurique (HgCl_2 ; 4 mg/L) afin de stopper toute activité biologique et ainsi d'augmenter la durée de conservation. Le CID a été analysé à l'ISMER-UQAR dans les laboratoires du CAIR par un *Total Organic Carbon-V analyzer* de type Shimadzu avec une précision de 0,1 %. Le méthane a été analysé dans le laboratoire du professeur Huixiang Xie par chromatographe en phase gazeuse couplé à un détecteur à ionisation à flamme. Celui-ci a été intégré dans la base de données, mais non exploité dans ce rapport.



Figure 3.8-Échantillonnage pour l'analyse des gaz dissous (CID, signature isotopique du CID et méthane)

Au GEOTOP, les isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) pris dans les puits, mais également ceux des pluviomètres qui ont été déployés sur le territoire, ont été analysés par spectromètre infrarouge à ratios isotopiques à double laser. Les échantillons ont tous été pris dans des vials en plastique de 30 mL puis scellés avec du parafilm. L'analyse de la signature isotopique du CID ($\delta^{13}\text{C-CID}$) a été réalisée sur les mêmes échantillons que le CID à l'aide d'un spectromètre de masse à ratios isotopique avec triples collecteurs universels (Isoprime 100 DI).

Tous les résultats des analyses de la qualité de l'eau ont été transférés aux propriétaires des puits dès réception des résultats. Les résultats des tests bactériologiques étaient ouverts dès leurs réceptions et dans le cas de tests positifs ou hors-norme, les propriétaires étaient appelés par téléphone et informés la journée même. L'envoi des résultats de chez Bureau Véritas ainsi que l'original des tests bactériologiques ont été acheminés par la poste à tous les propriétaires dans les semaines suivantes. L'annexe 6 présente une lettre type envoyé aux propriétaires.

3.2.4. Instrumentation du bassin versant de la Kamouraska

Dans le cadre du projet du bassin versant expérimental (voir section 8.1), sept (7) stations de jaugeage ont été installées en 2019 dans les différents affluents de la rivière Kamouraska pour suivre les niveaux de la rivière et plus particulièrement les niveaux d'étiage liés aux contributions de la nappe phréatique (figure 3.2). La sélection de ces sites répondait à plusieurs critères d'ordres hydrostratigraphiques, hydrologiques et d'utilisation du sol. Les stations de jaugeage sont équipées 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. Pour calculer des débits ponctuels, les vitesses d'écoulement et les sections transversales ont été mesurées à l'aide du courantomètre acoustique FlowTracker de Sontek. Ces données servent à déterminer une relation entre le niveau d'eau et le débit (Q) pour construire des séries chronologiques de débits des affluents de la rivière Kamouraska. Ces séries permettent de caractériser (1) la propagation de l'onde de crue dans le bassin versant selon la structure des précipitations et les saisons, (2) la spatialisation de la réponse hydrologique selon les sous-bassins versants et (3) la sévérité des étiages.

Afin d'étudier la réponse hydrosédimentaire de la rivière Kamouraska, des pièges à sédiments, adaptés de ceux proposés par Phillips *et al.* (2000), et un turbidimètre devaient être installés dans la rivière Kamouraska au printemps 2020. Cependant, en raison du contexte lié à la pandémie au printemps 2020, la mise en place des pièges à sédiments n'a pu se faire que tardivement au cours de l'année 2020. Ils sont installés à 3 stations (figure 3.2). Ils sont immergés dans la rivière, avec le tube d'entrée orienté directement dans la direction de l'écoulement. L'échantillonneur est installé horizontalement au milieu du chenal à environ 60 % de la profondeur moyenne d'eau. Une fois immergée, l'eau pénètre en continu dans le tube d'entrée et la vitesse d'écoulement est réduite d'un facteur 600, par rapport à celle du débit ambiant. Cette réduction de la vitesse d'écoulement induit une sédimentation des particules de sédiments en suspension lorsque l'eau se déplace à travers le cylindre vers le tube de sortie.

Les stations Goudron_conf et KAM_conf représenteront respectivement les sous-bassins versants de Goudron et Kamouraska. La station KAM_aval représentera la confluence du sous-bassin versant de Goudron et Kamouraska. Les sédiments en suspension sont collectés aux stations Goudron_conf et KAM_conf afin de créer une base de données comme contributeurs potentiels à la composition des sédiments de la rivière Kamouraska. Enfin, les sédiments en suspension sont collectés à la station KAM_aval afin d'acquérir une compréhension globale du mélange entre les sous-bassins versants de la rivière Kamouraska.



Figure 3.9-Mesure de la vitesse des courants (photo de gauche) et installation des pièges à sédiments (photo de droite) à la station Goudron.

L'échantillonnage des pièges à sédiments a été effectué tous les 15 jours du 1^{er} septembre 2020 au 26 octobre 2020 et du 1^{er} mars au 7 novembre 2021 (figure 3.9 et figure 3.10). Quatorze (14) et quarante (40) échantillons répartis sur les 3 stations ont pu être récupérés en 2020 et 2021, respectivement. Les pièges à sédiments ont été retirés en raison des conditions hivernales qui empêchent la prise d'échantillons et qui risquent les endommager. Ils seront remis en place à la fonte de la glace (fin mars-début avril 2021).

Pour étudier la réponse hydrosédimentaire de la rivière Kamouraska, des analyses granulométriques et minéralogiques ont été réalisées sur les sédiments. La granulométrie a été effectuée sur la fraction totale des sédiments à l'aide d'un analyseur granulométrique à diffraction laser Beckman Coulter LS13320 à l'ISMER-UQAR. Les analyses minéralogiques ont été réalisées par diffraction quantitative des rayons X (qXRD) avec un XRD PANalytical X'Pert Powder à l'ISMER-UQAR.



Figure 3.10-Photo de terrain lors de la prise d'échantillon des sédiments de la rivière Kamouraska. De droite à gauche sur les photos : Aude Flamand (étudiante à la maîtrise), Myriam Vallé (auxiliaire de recherche) et Charles-Edouard Deschamps (Post-doctorat).

Dans ce projet, deux capteurs de turbidité (modèle NEP-595 et OBS-3A) ont été déployés dans les rivières Kamouraska et Goudron au printemps 2021 pour déterminer la concentration de sédiment en suspension (figure 3.11). La turbidité est un indice de clarté ou d'opacité de l'eau, mesuré par le degré de diffusion de la lumière par toutes les matières en suspension (par exemple, argiles, limon, matière organique, composés organiques colorés solubles, plancton et autres micro-organismes) dans un échantillon d'eau. Une turbidité élevée peut donc être associée à une teneur élevée en matières en suspension dans la colonne d'eau et met en évidence le potentiel de changement physique de la qualité de l'eau du système. Ces données permettent le suivi de la concentration de sédiment en suspension à haute-résolution temporelle en fonction de l'hydrodynamisme de la rivière Kamouraska et permettront d'explorer le rôle des précipitations, des saisons et de la spatialisation des sources de sédiments sur la qualité de l'eau de la rivière Kamouraska.



Figure 3.11-Photo du déploiement du turbidimètre NEP595 pour un test terrain dans la rivière Goudron.

4. Contextes géologiques et hydrogéologiques

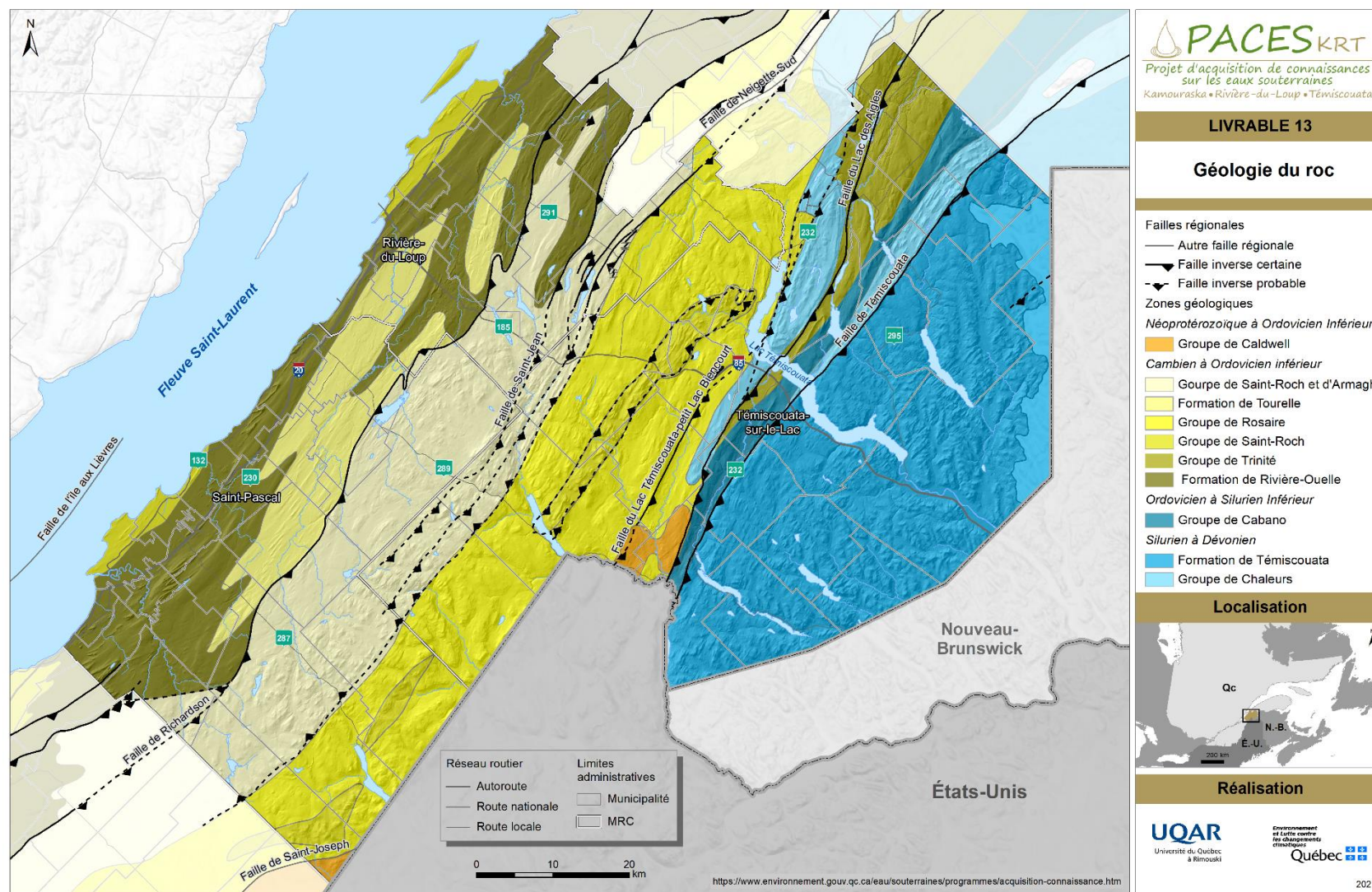
La caractérisation des eaux souterraines et des aquifères sur un territoire est intimement liée aux particularités géologiques, structurales et à l'origine des dépôts sédimentaires quaternaires. Le couplage des données spatiales sur la géologie du socle rocheux appalachien et la géologie du Quaternaire représente une approche essentielle afin de caractériser le contexte hydrogéologique régional. Elle permet notamment de comprendre la répartition spatiale de la couverture des dépôts sédimentaires en surface et d'expliquer la séquence de mise en place de ces dépôts recouvrant le substrat rocheux. En ce sens, il devient incontournable de réaliser une synthèse des connaissances sur la géologie du roc et sur les dépôts quaternaires afin de définir le contexte hydrogéologique sur le territoire du KRT. Cette reconstitution de la succession des dépôts quaternaires reposant sur un socle rocheux d'origine sédimentaire fortement tectonisé est nécessaire pour comprendre la porosité et la perméabilité des différentes couches. Ces propriétés permettent d'évaluer la présence d'eau souterraine dans les pores et ouvertures (porosité primaire et secondaire) ainsi que l'aptitude d'une couche à permettre la circulation des eaux à travers un réseau interconnecté de pores.

Ce chapitre présente les informations sur la géologie du socle rocheux et la géologie du Quaternaire sur le territoire du KRT. Dans la section 4.1, une analyse de l'histoire géologique et une description de la diversité lithologique du socle rocheux sont présentées. Les informations sur les données cartographiques concernant les formations géologiques et le contexte structural ont été fournies par la Direction générale des hydrocarbures et des biocarburants du MRN. En ce qui a trait à la géologie du Quaternaire (section 4.2), les données cartographiques utilisées sont issues de la carte des dépôts meubles au 1 : 250 000 de Veillette et *al.* (2017) publiée par la Commission Géologique du Canada (CGC). Outre la cartographie des dépôts meubles, on y retrouve également une cartographie régionale des écoulements glaciaires, des traînées de dispersion glaciaire ainsi que la compilation des datations au radiocarbone permettant d'interpréter le cadre chronologique de la déglaciation régionale et de l'évolution de la mer de Goldthwait. On y trouve également des données sur l'altitude de la limite marine. Les données présentées dans cette publication sont le résultat de la compilation des données provenant de

plusieurs travaux sur le Quaternaire régional, de la photo-interprétation des dépôts meubles sur les photographies aériennes au 1 : 40 000 et des validations sur le terrain. Cette carte présente les données les plus à jour sur les dépôts meubles quaternaires de la région du Bas-St-Laurent. Cette cartographie a été finalisée avec l'aide de l'équipe du PACES-NEBSL.

4.1. Géologie du socle rocheux

La carte géologique du socle rocheux (livrable 13) a été fournie par la Direction générale des hydrocarbures et des biocarburants du MRN. Le territoire du KRT fait partie de la province géologique des Appalaches. Formée lors de l'ère du Paléozoïque, plus précisément entre le Cambrien et le Dévonien, cette chaîne de montagnes est composée essentiellement de roches sédimentaires reposant en discordance sur les roches de la Plateforme du Saint-Laurent ou sur les roches ignées et métamorphiques du socle précambrien de la Province de Grenville. Durant les principales phases d'édification, les roches ont été affectées par les phénomènes combinés de plissements, de jeux de failles et de métamorphisme (Williams, 1995). Représenté actuellement sous la forme de ceintures continues, ce relief plissé, orienté NE-SO, a subi une longue période d'érosion continentale sous des climats variés. Il en est résulté un relief de plateau, de collines arrondies, de crêtes et de sillons parallèles à la vallée du fleuve Saint-Laurent (Veillette *et al.*, 2017; Morissette *et al.*, 2020) qui composent ce que les géomorphologues désignent sous le nom de 'relief appalachien' (Hétu, 1998). Les failles inverses du Témiscouata et de Lac-des-Aigles subdivisent le territoire en deux complexes géologiques, soit la zone de Humber et la Ceinture de Gaspé. La zone de Humber couvre principalement les régions de Rivière-du-Loup et du Kamouraska. Les formations sont d'âge cambrien et ordovicien et appartiennent au super-groupe de Québec. Les formations géologiques sont celles de Tourelle, de Caldwell, de Saint-Rosaire, de Saint-Roch, de Trinité et de Trois-Pistoles. Les lithologies comprennent des grès, des orthoquartzites, des conglomérats, des mudrocks, des calcaires et de l'ardoise. La Ceinture de Gaspé, du côté du Témiscouata, regroupe les formations géologiques de Témiscouata, Groupe de Chaleurs et Groupe de Cabano. Les mudrocks, le grès, le calcaire et le conglomérat sont les principales lithologies de ces formations.



LIVRABLE 13

4.1.1. Histoire géologique

La succession des événements tectoniques à l'origine de la formation des Appalaches dans le KRT s'amorce à la fin du Précambrien et plus précisément à la fin du Protérozoïque avec une période de rifting continental qui provoqua la fracturation du supercontinent Rodinia, lequel était constitué de plusieurs cratons précambriens, dont le Bouclier canadien reconnu alors comme étant le continent Laurentia (Brisebois et Brun, 1994) (figure 4.1). L'activité tectonique et volcanique le long du rift continental provoqua une divergence des plaques tectoniques, ce qui se traduit à terme par l'apparition d'un nouvel océan appelé Iapetus. Ce mouvement d'écartement s'est poursuivi jusqu'au Cambrien inférieur. Durant cette période, marquée par le déplacement de Laurentia vers l'équateur, on note une accumulation de sédiments d'eaux peu profondes sur le plateau continental de Laurentia et des accumulations de boue et de sable dans les zones plus profondes. Ces sédiments marins, qui feront partie de la chaîne appalachienne ultérieurement, s'accumulaient sur le talus continental et sur la plaine abyssale adjacente, composant ainsi un vaste glacis sédimentaire en bordure de la marge continentale passive. Cette sédimentation dans l'océan Iapetus s'est poursuivie dans un contexte de marge passive tout au long du Cambrien et une partie de l'Ordovicien inférieur, période au cours de laquelle on observe une inversion du sens de déplacement des plaques lithosphériques. Cette inversion a provoqué l'apparition d'une zone de subduction (marge active en compression) avec un plancher océanique plongeant vers le NO, sous la marge continentale de Laurentia, ce qui a entraîné la formation d'un arc volcanique insulaire (Tremblay et Bourque, 1991).

Éon	Ère	Période	Âge (Ma)	Événements géologiques
Phanérozoïque	Paléozoïque	Carbonifère	298,9	<u>Orogenèse alléghanienne (États-Unis)</u> et fermeture de l'océan Iapetus (formation de la chaîne de montagnes les Appalaches en Amérique du Nord)
			358,9	↑ Période d'érosion de la chaîne de montagnes et sédimentation (continentale, lagunaire, lacustre sous un climat aride/semi-aride) dans le bassin des Maritimes ↓
		Dévonien		<u>Orogenèse acadienne (Ceinture de Gaspé)</u>
			419,2	↑ Compression, soulèvement et déformation des sédiments compris dans le bassin océanique et déposés en discordance sur la chaîne taconienne
		Silurien		Convergence des plaques lithosphériques et du continent Avalonia (rétrécissement océan Iapetus)
			443,8	↓ Période d'érosion intense de la chaîne taconienne, sédimentation et activités volcaniques dans les bassins océaniques adjacents (succession de régressions et de transgressions marines)
Précambrien ↓	Protérozoïque	Ordovicien	485,4	<u>Orogenèse taconienne (Zones de Humber et Dunnage)</u>
				↑ Inversion du déplacement des plaques lithosphériques et début de la fermeture de l'océan Iapetus (marge active convergente)
		Cambrien		↓
			541	↑ Période de sédimentation en contexte de marge passive océanique (flysch, glaciaires, ...) et activité volcanique insulaire
			1000	↓ Rifting et fracturation du supercontinent Rodinia (ouverture de l'océan Iapetus)
	Néo-protérozoïque			<u>Orogenèse grenvillienne (chaînes des Laurentides du Bouclier canadien)</u> et formation du supercontinent Rodinia
	Méso-protérozoïque		1600	Déplacement et convergence de cratons précambriens (Laurentia (Bouclier canadien), Amazonia, Baltica, Groenland ...) à l'origine de la formation du supercontinent Rodinia
	Paléo-protérozoïque		2500	

Figure 4.1-Échelle des temps géologiques présentant les principaux événements géologiques à l'origine de la formation du relief des Appalaches au Québec. (Adapté de Brisebois et Brun, 1994).

Les sédiments d'origine volcanique se sont accumulés et mélangés à la sédimentation marine préexistante dans le bassin océanique jusqu'à l'Ordovicien moyen, période correspondant au début de l'orogénèse taconienne. Ces sédiments ont été compressés, plissés, faillés et soulevés durant la période de l'Ordovicien moyen à supérieur pour former la chaîne taconienne sur une partie de la plateforme de Laurentia (St-Julien et Hubert, 1975 ; Brisebois et Brun, 1994). Durant le Silurien, la chaîne taconienne a subi une érosion intense, libérant une grande quantité de sédiments qui se sont accumulés dans un bassin océanique dans lequel persiste une activité volcanique liée à la zone de subduction (Tremblay et Bourque, 1991). Il a été démontré qu'entre l'Ordovicien supérieur et le Silurien, une succession de régressions et de transgressions marines combinées à l'activité tectonique de soulèvement et de subsidence post-taconienne ont influencé l'évolution de l'environnement de sédimentation à proximité de la chaîne taconienne, passant alternativement d'une sédimentation littorale à une sédimentation de plateforme continentale ou de bassin (Bourque *et al.*, 1993; William, 1995; Lavoie, 2008). Ces événements expliquent certaines discordances que l'on retrouve sur le territoire où des roches sédimentaires plus jeunes surmontent des roches plissées plus anciennes (Brisebois et Brun, 1994). Progressivement, entre le Silurien et le Dévonien inférieur, l'océan Iapetus devenait de plus en plus étroit en raison du rapprochement des marges continentales de la plaque convergente, principalement celle du continent Avalonia. C'est au Dévonien moyen et supérieur que le bassin de sédimentation océanique compris entre la chaîne taconienne et le continent Avalonia s'est refermé définitivement lors de la collision continentale qui édifia l'orogénèse acadienne. Les sédiments compris dans ce bassin océanique ont été déformés, soulevés et déposés en discordance, sous forme de nappes de charriage, sur les roches ordoviciennes à siluriennes d'origine sédimentaire et volcanique qui s'étaient mises en place sur la croûte océanique de l'océan Iapetus. Les déformations acadiennes présentent des plis droits ouverts et des failles de chevauchement ou de coulissage (Brisebois et Brun, 1994). Cette orogénèse acadienne est la dernière ayant contribué à la formation du relief appalachien dans la région du KRT.

4.1.2. Formations géologiques générales et contexte structural

L'orogénèse des Appalaches sur le territoire du KRT se divise en deux principaux domaines tectonostratigraphiques, soit la zone de Humber externe au nord et la Ceinture de Gaspé au sud (Williams, 1979). Ces deux ceintures orogéniques possèdent des particularités lithologiques et structurales distinctes, résultants des deux phases de compression, de plissement et de soulèvement survenues, d'une part, entre l'Ordovicien moyen et supérieur (orogénèse taconienne) et, d'autre part, entre le Silurien et le Dévonien (orogénèse acadienne). Les roches sédimentaires cambro-ordoviciennes retrouvées dans la zone de Humber sont associées au bassin taconien déformé tandis que les roches sédimentaires et volcaniques silurio-dévonienues comprises dans la Ceinture de Gaspé sont propres aux bassins post-taconiens à acadiens (Lavoie, 2008). Plusieurs de ces roches d'origine sédimentaire ont subi un métamorphisme régional sous les contraintes des pressions orogéniques, lesquelles sont responsables des roches schisteuses, particulièrement abondantes dans la région (figure 4.2a). Ainsi, les reliefs intensément plissés de la zone de Humber externe font partie de l'Anticlinorium des monts Notre-Dame (figure 4.2b). Dans la Ceinture de Gaspé, les assemblages rocheux formant le relief plissé plus évasé sont associés au Synclinorium de Connecticut Valley-Gaspé. Ce dernier correspond à la portion nord de la vaste zone de la Ceinture de Gaspé. La zone de Humber externe occupe tout l'espace correspondant aux MRC de Rivière-du-Loup et de Kamouraska. En ce qui concerne le territoire de la MRC de Témiscouata, il est associé à la zone de Humber externe dans sa partie NO et à la Ceinture de Gaspé dans la partie SO. On retrouve également quelques formations géologiques étroites, incluses dans la Ceinture de Gaspé, qui sont associées à la zone de Dunnage et faisant partie de la sous-zone de Témiscouata (David *et al.*, 1985; Williams, 1995).

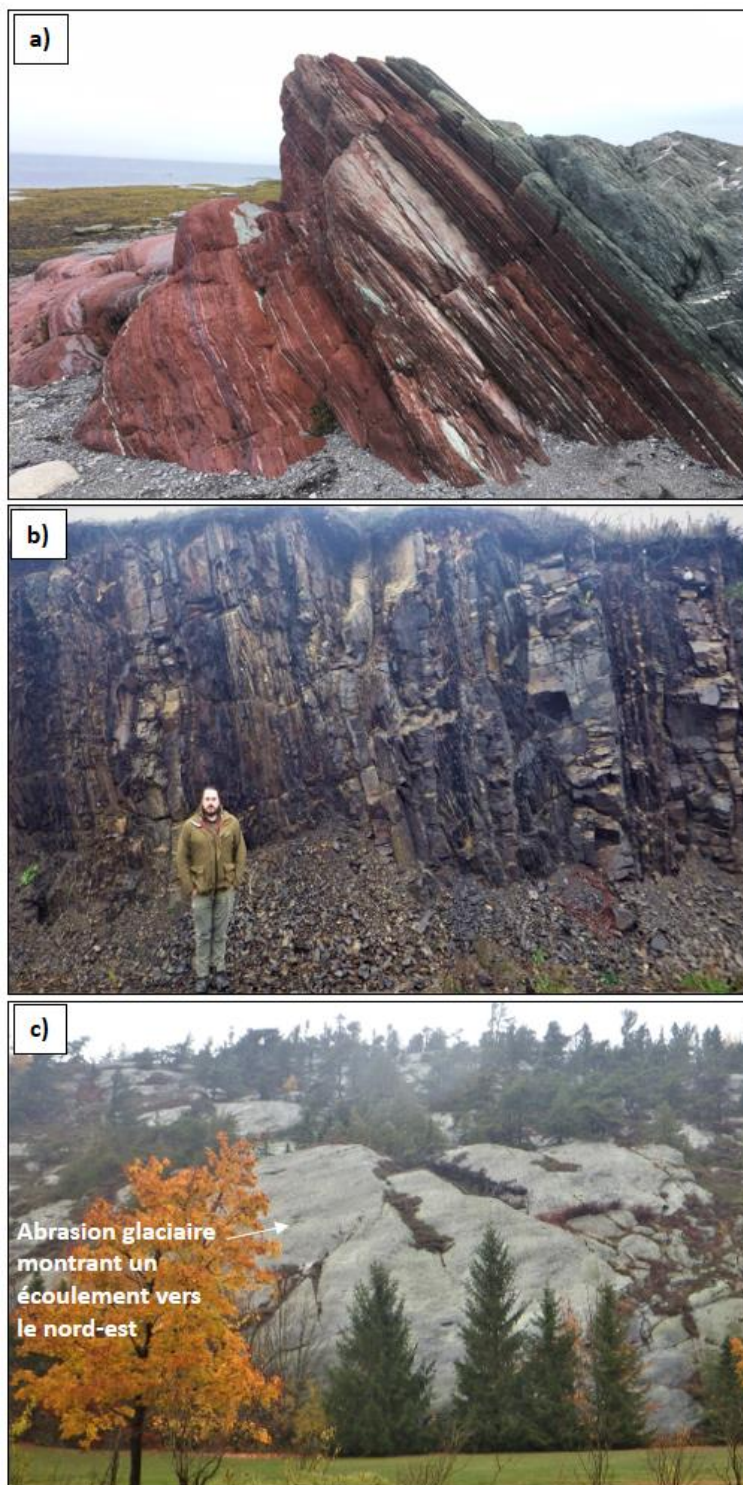


Figure 4.2-a) Schiste ardoisier rouge du Groupe de Saint-Roch à Cacouna. b) Affleurement rocheux (grès et schiste) montrant un plan de stratification verticale dans la Formation de Tourelle (Zone de Humber) à Saint-Joseph-de-Kamouraska c) Colline d'orthoquartzite de la formation de Kamouraska à Saint-Philippe-de-Néri présentant des marques d'abrasion glaciaire (cannelures). (Photos : Jérôme Dubé)

La zone de Humber externe représente la portion la plus ancienne du relief appalachien associée à l'orogénèse taconien. Le front structural taconien est situé dans l'axe de la vallée du fleuve Saint-Laurent et suit le tracé de la ligne de faille Logan (inverse). Le long de la plaine côtière, entre La Pocatière et L'Isle-Verte, on retrouve principalement trois formations géologiques, soit les Formations de St-Roch et de Trois-Pistoles ainsi que le Groupe de Tourelle qui possède des lithologies diversifiées principalement constituées de mudrock, ardoise (verte/rouge), grès, conglomérat et calcaire (Vallières, 1977). On y retrouve également certaines particularités de la géologie régionale, notamment les orthoquartzites de la formation de Kamouraska qui forment les principaux reliefs en saillie (monadnock) du Kamouraska (figure 4.2c), mais ces roches affleurent également par endroits dans le secteur de Rivière-du-Loup (Hubert, 1973). Le relief plissé de la plaine côtière se caractérise par une succession très serrée d'anticlinaux et de synclinaux droits ou déversés (figure 4.3a). Le synclinal de Saint-Modeste, dans les grès du Groupe de Tourelle, constitue un des plus beaux exemples du secteur (Vallières, 1976). Ces Formations de Saint-Roch/de Trois-Pistoles et le Groupe de Tourelle sont bordés au sud par la faille régionale inverse de Richardson. Au sud de cette faille et dans les hauts plateaux, on retrouve une lithologie composée de grès feldspathique, mudslate, ardoise, quartzite schisteux, schiste à séricite et calcaire appartenant aux Groupes de Saint-Roch/Armagh et de Rosaire. Dans cette portion de la zone Humber externe, on retrouve plusieurs failles de chevauchement et inverses assez parallèles, dont la faille régionale Saint-Jean ainsi que quelques failles senestres localement. Finalement, à proximité de la Ceinture de Gaspé, on retrouve deux failles régionales inverses rapprochées qui traversent le secteur du lac Témiscouata selon une direction NE-SO, soit la Faille du lac Témiscouata/Petit lac Biencourt passant au sud de Saint-Louis-du HA! HA! et la Faille du Lac des Aigles passant au nord de la vallée de la rivière Cabano. À l'est, ces failles longent respectivement la vallée SE du Lac Témiscouata et la vallée NO du Petit Lac Touladi avant de border la vallée du Lac des Aigles. Au sud de la Faille des Aigles, on retrouve la formation de Trinité composée d'une alternance de mudslate, siltstone, grès, calcaire et ardoise avec un peu de conglomérat calcaire. Cette formation se présente en bande étroite passant par la vallée de la rivière Cabano à l'ouest du lac Témiscouata pour finalement longer les vallées du Petit lac Touladi et du Petit lac Squatec à l'est où elle devient plus large (Lespérance et

Greiner, 1969). Au nord du lac Long et en bordure de la vallée principale de la rivière Bleue, on retrouve le Groupe de Caldwell caractérisé par des roches volcaniques mafiques, essentiellement des basaltes coussinés et des tufs volcaniques, ainsi que des roches sédimentaires telles que des ardoises, siltstone, arénite quartzitique et conglomérat (Gorman, 1961). Les roches composant le Groupe de Caldwell se sont formées au Cambrien.

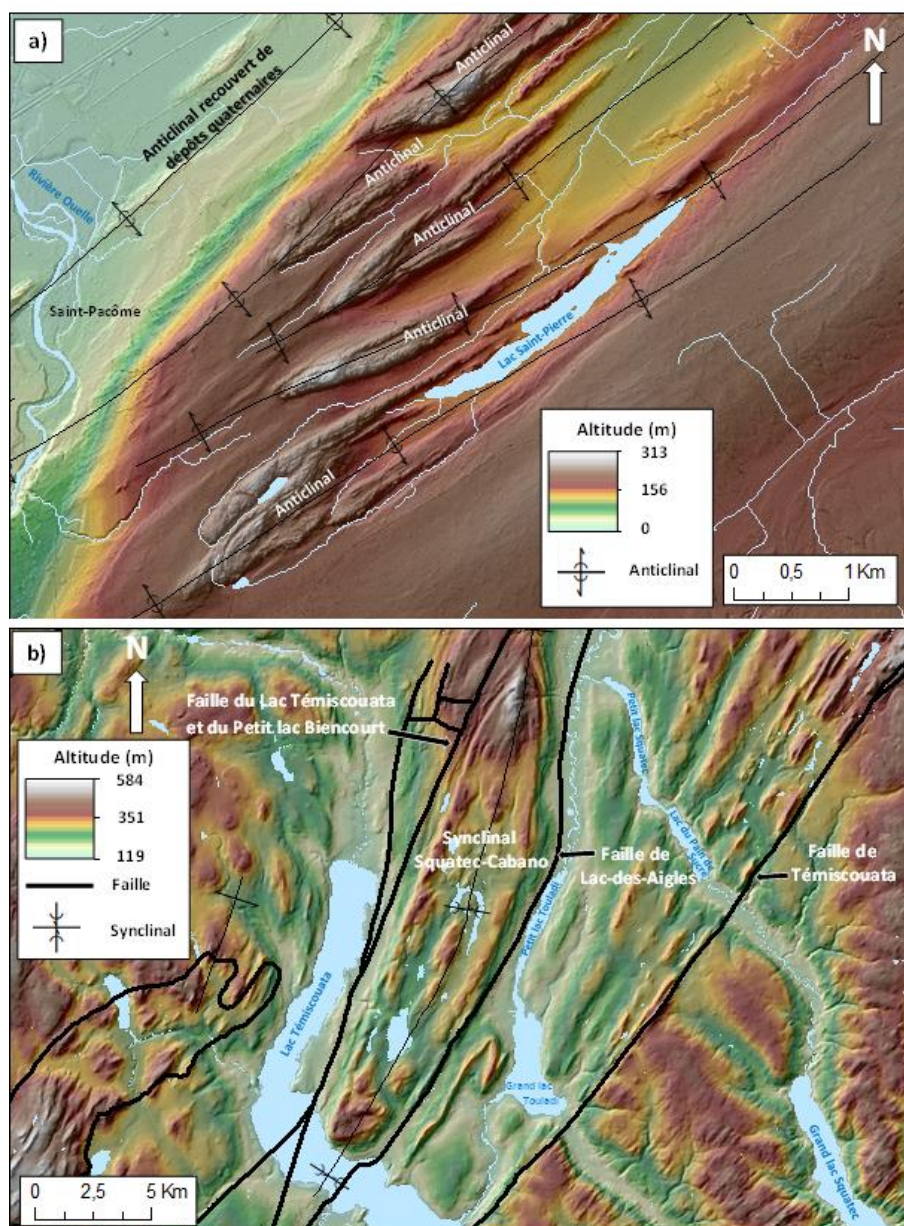


Figure 4.3 a) Succession de 6 plis anticlinaux serrés et droits sur une distance de 3 km localisée dans le Groupe de Trois-Pistoles (Zone de Humber) à l'est de la rivière Ouella (Saint-Pacôme). B) Synclinal droit de Squatec-Cabano formé dans le Groupe de Chaleurs (Ceinture de Gaspé) bordé par la Faille du Lac Témiscouata/Petit lac Biencourt au nord-ouest et la Faille du Lac-des-Aigles au sud-est.

Appartenant aux bassins post-taconien à acadien, la Ceinture de Gaspé se compose essentiellement de roches d'origine sédimentaire et métamorphique plus jeunes associées à l'orogénèse acadienne. Le front structural de la chaîne acadienne correspond à la ligne Brompton/Baie-Verte qui est l'expression en surface de la suture taconienne (Malo *et al.*, 1992). Cette ligne correspond à la zone de Dunnage qui se compose de mélanges de roches d'origine magmatique et sédimentaire (tuf lithique et à lapilli, conglomérat et grès volcanique) retrouvées, entre autres, dans la Formation de Pointe-aux-Trembles, elle-même comprise dans le Groupe des Chaleurs et faisant partie de la sous-zone de Témiscouata (Williams, 1995). Cette sous-zone est délimitée au nord par la Faille du Lac-des-Aigles qui est considérée comme étant la ligne Brompton/Baie-Verte dans la région (Malo *et al.*, 1992; Williams, 1995). D'un point de vue architectural, cette sous-zone de Témiscouata est comprise dans la zone tectonostratigraphique de la Ceinture de Gaspé, dans laquelle on retrouve trois formations géologiques, soit les Groupes de Cabano (Ordovicien supérieur à Silurien inférieur), de Chaleurs (Silurien à Dévonien inférieur) ainsi que la Formation de Témiscouata (Dévonien inférieur). On y retrouve essentiellement des roches d'origine sédimentaire semblables lithologiquement : mudstone, mudrock, grès, calcaire et conglomérat. C'est d'ailleurs à Saint-Marc-du-Lac-Long, dans la formation du Témiscouata (Groupe de Fortin), que l'on retrouve le gisement d'ardoise gris foncé qui est considéré comme étant d'une qualité exceptionnelle de par son faible degré de schistosité retrouvé (Gorman, 1961). Les principaux éléments structuraux tels les plis (anticlinaux et synclinaux) sont situés dans les roches sédimentaires des Groupes de Cabano et de Chaleurs et sont considérés comme plus évasés et droits. Le plus bel exemple est le synclinal droit de Squatec-Cabano situé à l'est du lac Témiscouata (figure 4.3b). Le contact lithologique entre la Formation de Témiscouata et le Groupe des Chaleurs est marqué par la Faille inverse de Témiscouata. Cette faille régionale est la plus au sud sur le territoire de la MRC du Témiscouata.

Les particularités géologiques et structurales retrouvées dans les deux zones tectonostratigraphiques sur le territoire du KRT montrent qu'il existe une variabilité spatiale des propriétés hydrauliques associées notamment à la lithologie (porosité primaire) ainsi qu'aux effets des compressions tectoniques et du métamorphisme de pression pouvant affecter les espaces ouverts dans la roche (porosité secondaire). Outre la porosité, les caractéristiques de la

géologie du roc aideront à mieux comprendre les propriétés de perméabilité, de la conductivité hydraulique, des coefficients d'emménagement et de transmissivité.

4.2. Géologie du Quaternaire

4.2.1. Introduction

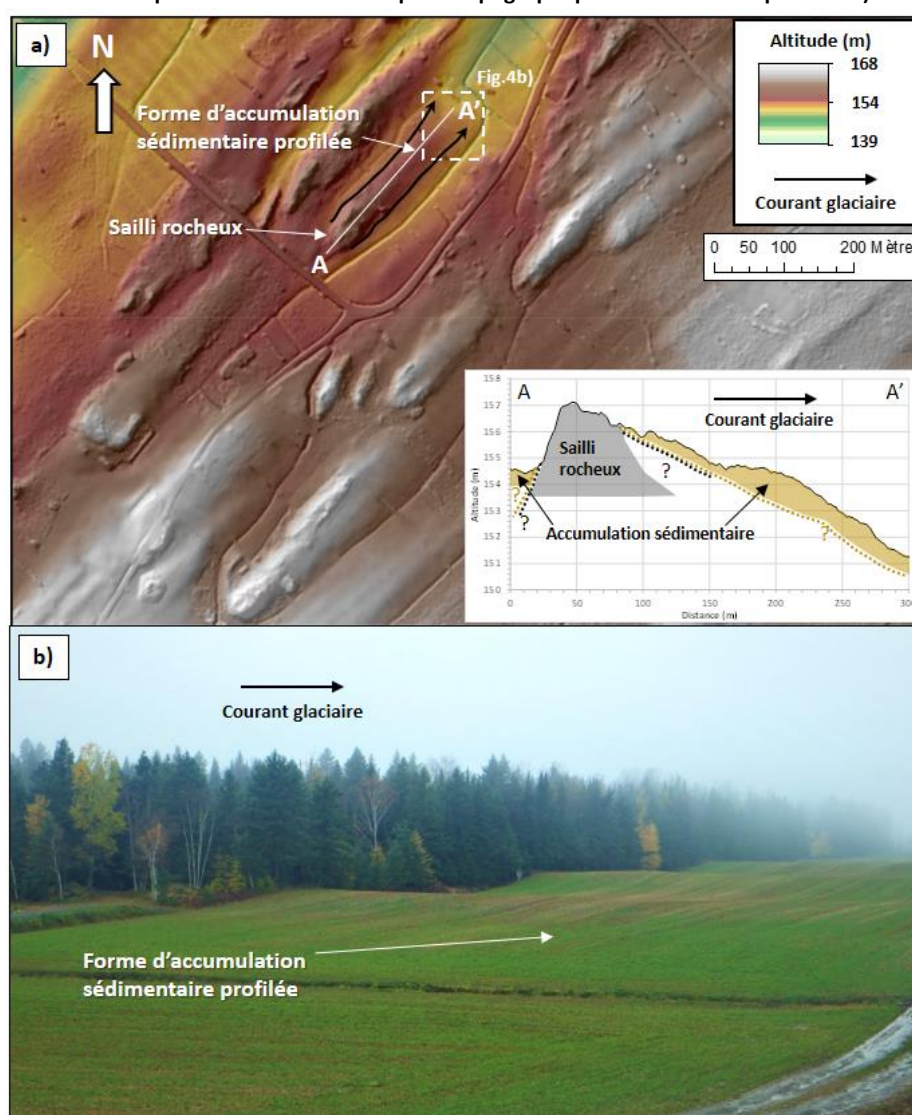
Depuis le début de la période du Quaternaire ($\approx 2,6$ Ma), des successions d'avancées (glaciations) et de reculs (interglaciaires) des glaciers sur le territoire canadien ont grandement contribué à éroder et à remodeler les reliefs. Durant la dernière période glaciaire wisconsinienne (≈ 75 ka à 11,6 ka), l'Inlandsis laurentidien a recouvert toute la région du KRT. Au maximum glaciaire, la glace s'écoulait vers le sud-est à partir d'un centre de dispersion localisé dans la région de la baie de James (Veillette *et al.*, 1999). Le processus de déglaciation a débuté durant le Wisconsinien supérieur (≈ 22 ka). Étant relativement complexe, il se décline en plusieurs phases décrites ci-dessous. Jusqu'à preuve du contraire, on estime que tous les dépôts meubles de la région du KRT appartiennent au dernier cycle glaciaire. La plupart ont été mis en place durant les dernières phases de ce cycle, c'est-à-dire pendant la déglaciation et la phase d'inondation de la plaine côtière par la mer de Goldthwait. Sur le territoire du KRT, ces dépôts meubles sont diversifiés et ils résultent d'une succession d'événements complexes.

4.2.2. Histoire des événements du Quaternaire

La vallée du Saint-Laurent a été déglacée bien avant les hautes terres adjacentes. L'événement déterminant a été l'ouverture d'une baie de vêlage qui a remonté le Saint-Laurent à partir du talus continental (Shaw *et al.*, 2006; Dalton *et al.*, 2020). Le fond de cette baie de vêlage aurait atteint Rimouski vers 15 000 ans BP, Rivière-du-Loup vers 14 300 ans BP et Québec vers 13 700 ans BP (Chauvin *et al.*, 1985; Rappol, 1993; Hétu, 1998). Juste avant la déglaciation, la vallée du Saint-Laurent était occupée par un important courant de glace qui se dirigeait vers le NE. Sur le territoire du KRT, quelques évidences du passage de ce courant de glace sont perceptibles à plusieurs endroits, notamment au niveau de la forme profilée des collines d'orthoquartzite dans la région de Kamouraska (figure 4.2c) et des orientations de stries dans le Kamouraska et autour de Rivière-du-Loup (Martineau, 1977, 1979; Dionne, 2001). Les figure 4.4a et b montrent un bel

exemple d'une mégaforme d'abrasion glaciaire associée à un courant de glace se dirigeant vers le nord-est à Saint-Joseph-de-Kamouraska. Progressivement, il y a eu développement d'une baie de vêlage dans la vallée du Saint-Laurent qui a favorisé l'apparition d'une calotte appalachienne indépendante au sud du Saint-Laurent (Morissette *et al.*, 2020). On assiste alors à une inversion du sens de l'écoulement glaciaire au Bas-St-Laurent et une la portion nord de la péninsule Gaspésienne. Sur le territoire du KRT, il a été déterminé que l'écoulement glaciaire provenant de la calotte appalachienne s'écoulait désormais vers le nord-nord-ouest (Veillette *et al.*, 2017).

Figure 4.4-a) Mégaformes d'abrasion glaciaire profilée (de type *crag-and-tail*) montant la direction d'un courant glaciaire vers le nord-est à Saint-Joseph-de-Kamouraska et le profil topographique associé à la coupe A-A'. b) Photo montrant la



portion aval de l'accumulation sédimentaire profilée (Jérôme Dubé).

Peu après l'ouverture de la baie de vêlage, la marge glaciaire appalachienne était ancrée sur les premiers hauts reliefs qui bordaient la mer de Goldthwait au sud. C'est contre cette marge glaciaire que s'est édifiée la moraine frontale de Saint-Antonin vers 14 300 BP (Martineau, 1977; Martineau et Corbeil 1983; Dumont, 2019; Morissette *et al.*, 2020). Le travail de Dumont (2019) dans le cadre du PACES-KRT a permis de préciser l'étendue de cette moraine dans la région de Kamouraska. Toujours dans ce contexte, des deltas de contact glaciaire se sont édifiés sur le territoire permettant d'avoir une estimation de la limite marine maximale qui a été fixée à environ 160 m de Trois-Pistoles à Rivière-Ouelle (Veillette, *et al.*, 2017). Le retrait de la marge glaciaire vers le sud marqua la fin de la phase glaciomarine et le début de la phase marine principale de l'épisode goldthwaitien. Durant cette phase marine, les eaux de fonte glaciaire chargée de sédiments de toutes tailles ont contribué à la formation de complexes deltaïques et à la sédimentation argileuse d'eaux profondes. C'est vers 13 000 ans BP que débuta la phase régressive principale sous l'influence du relèvement glacio-isostatique, ce qui a provoqué l'incision des dépôts dans les vallées fluviales, la mise en place de deltas étagés, de terrasses marines et de belles séries de plages/cordons littoraux soulevés (Hétu, 1998, Dionne, 2002) (figure 4.5). Lors de cette régression marine, le niveau marin s'est abaissé au moins 5 mètres sous le niveau actuel entre 7 000 et 6 000 ans BP (Dionne, 2002). Il est ensuite remonté jusqu'à la cote d'environ +10 m (Transgression Laurentienne) vers 4 000 ans BP pour ensuite redescendre jusqu'au niveau actuel. Le niveau de la terrasse sablonneuse de Mitis (environ 6 m) s'est formé vers 1950 ans BP (Dionne, 2002).

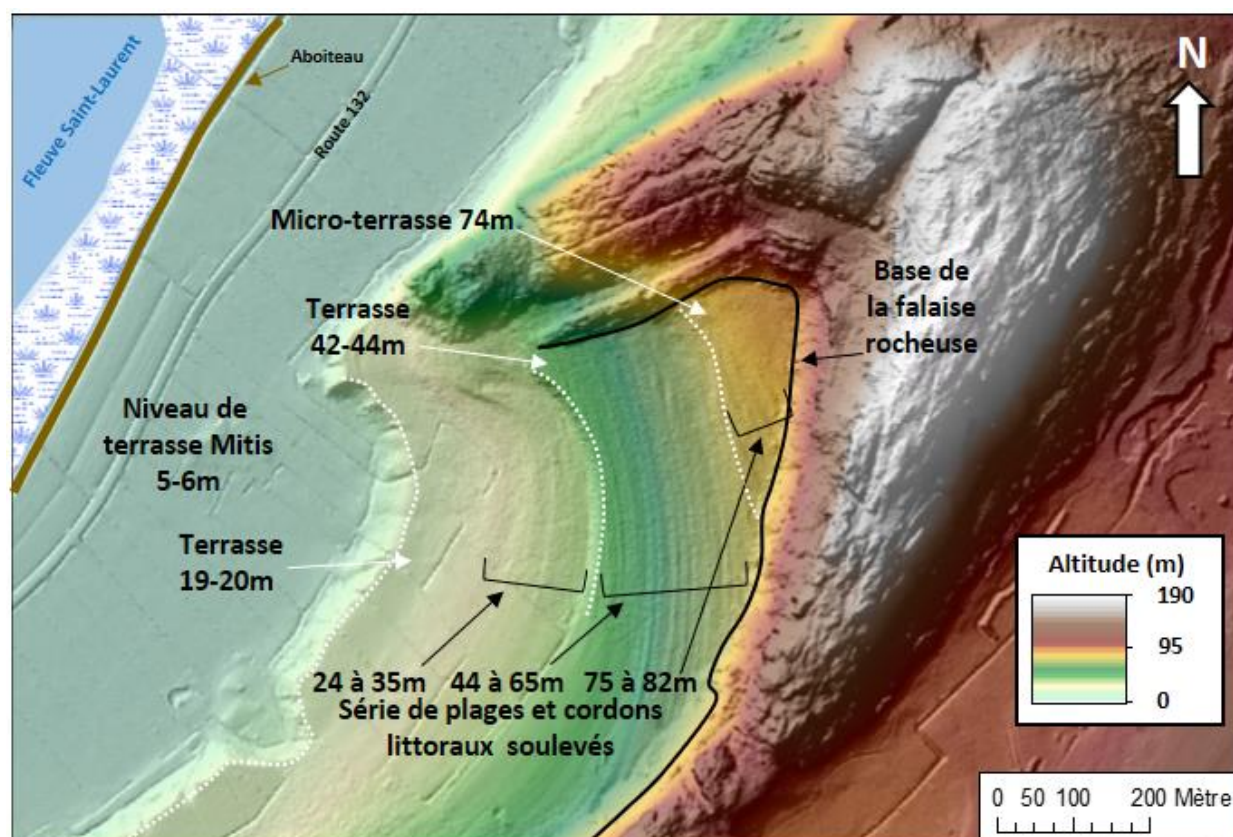


Figure 4.5-Successions de plages/cordons littoraux soulevés et de différents niveaux de terrasses d'origine marine retrouvés dans une ancienne baie rocheuse à l'ouest de Saint-André-de-Kamouraska.

Les études portant sur les étapes du retrait final de la marge glaciaire dans les hauts plateaux restent encore fragmentaires, notamment par manque de repères chronologiques. Il a été récemment démontré qu'il existait deux calottes glaciaires locales, soit celle de Lejeune et de Pohénégamook (Morissette *et al.*, 2020). Cela permet de mieux comprendre les mouvements glaciaires tardifs dans la région du Témiscouata et de mieux interpréter la complexité des dépôts glaciaires et fluvioglaciaires de ce secteur.

Plusieurs études portent sur la formation et l'étendue du lac glaciaire Madawaska qui recouvrait le territoire comprenant les lacs des Aigles, Squatec, Touladi, Témiscouata ainsi que les vallées de la rivière Madawaska et de la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick (de Jonge, 1951; Lee, 1959; Martineau, 1979; Kite, 1983; Kite et Stuckenrath, 1989; Dumais *et al.*, 1998; Morissette *et al.*, 2020) (figure 4.6). Ce lac était contenu par un dépôt morainique obstruant la vallée principale de la rivière Saint-Jean à Grand-Sault au Nouveau-Brunswick (de Jonge, 1951;

Lee 1955). La formation de ce lac aurait débuté dans la vallée de la rivière Saint-Jean vers 11 900 ans BP (Morissette *et al.*, 2020) tandis que sa vidange finale vers sud, via la vallée dans la rivière Saint-Jean, se serait produite peu avant 10 000 ans BP d'après la datation ^{14}C des bases de tourbières qui se sont développées sur les argiles lacustres après la vidange du lac (Kite et Stuckenrath, 1989). Mais ces datations sont probablement trop vieilles. Lee (1959) a découvert des morceaux de bois dans certains dépôts glaciolacustres silto-argileux localisés dans deux affluents de la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick et qui ont révélés des âges non calibrés de $8\,200 \pm 300$ BP (*Grand River*) et $8\,250 \pm 200$ BP (*Quisibis River*). La figure 4.12a, montre un échantillon de bois daté à $8\,235 \pm 30$ BP non calibré à une altitude de 140 m qui a été trouvé dans un dépôt glaciolacustre similaire à ceux de Lee (1959). En années calibrées (CALIB 8,20), ces datations s'échelonnent dans une fourchette comprise entre 8 400 et 9 800 ans BP (2 sigma). Selon les interprétations de Lee (1959), ces dépôts glaciolacustres relativement jeunes pourraient être associés à un stade tardif du paléo-lac Madawaska. Toute la sédimentation apportée par les affluents dans le lac Madawaska pendant environ 2 000 ans permet expliquer les dépôts glaciolacustres d'eau profonde ainsi que les terrasses lacustres et les deltas perchés dans la région du Témiscouata.

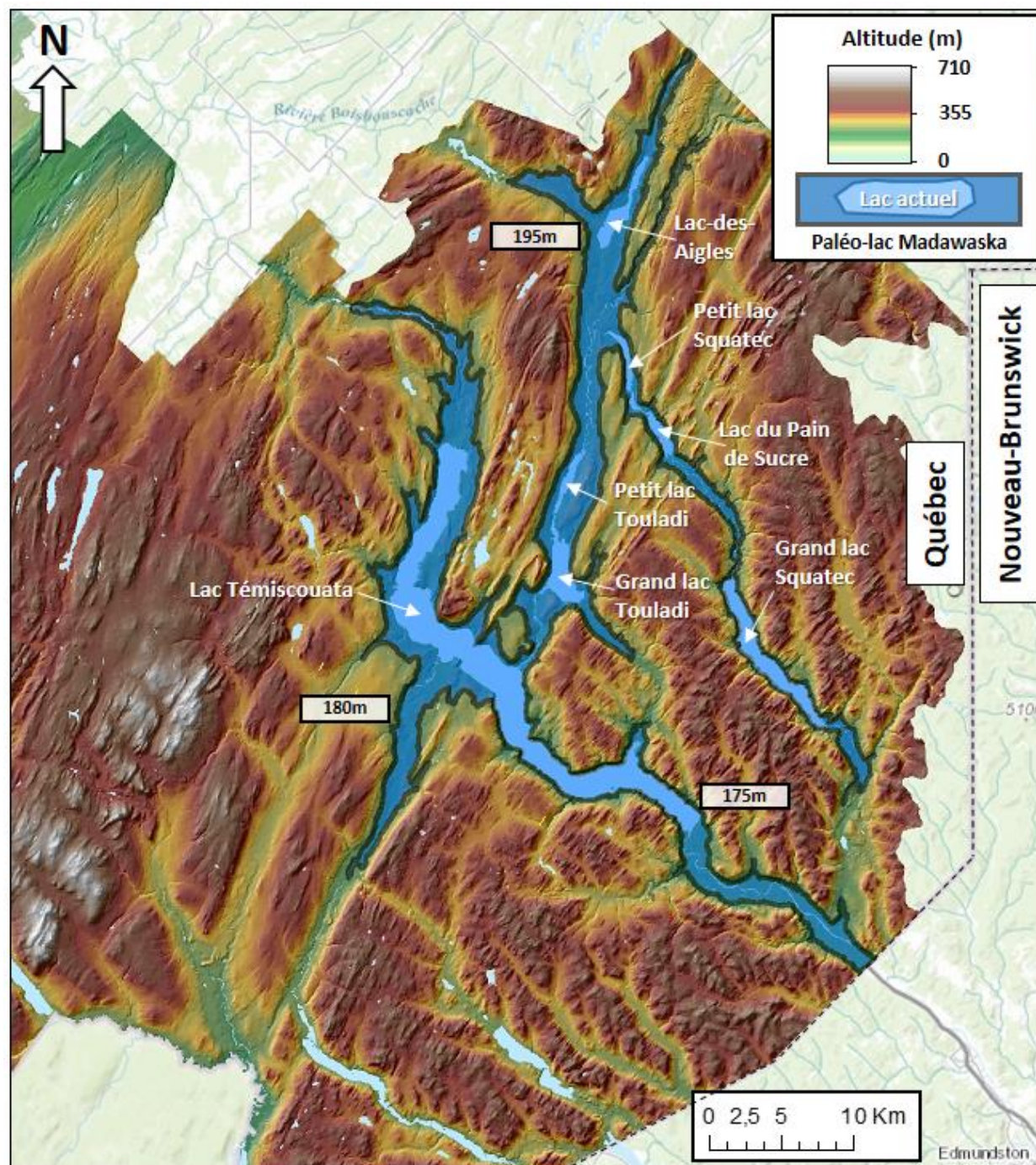


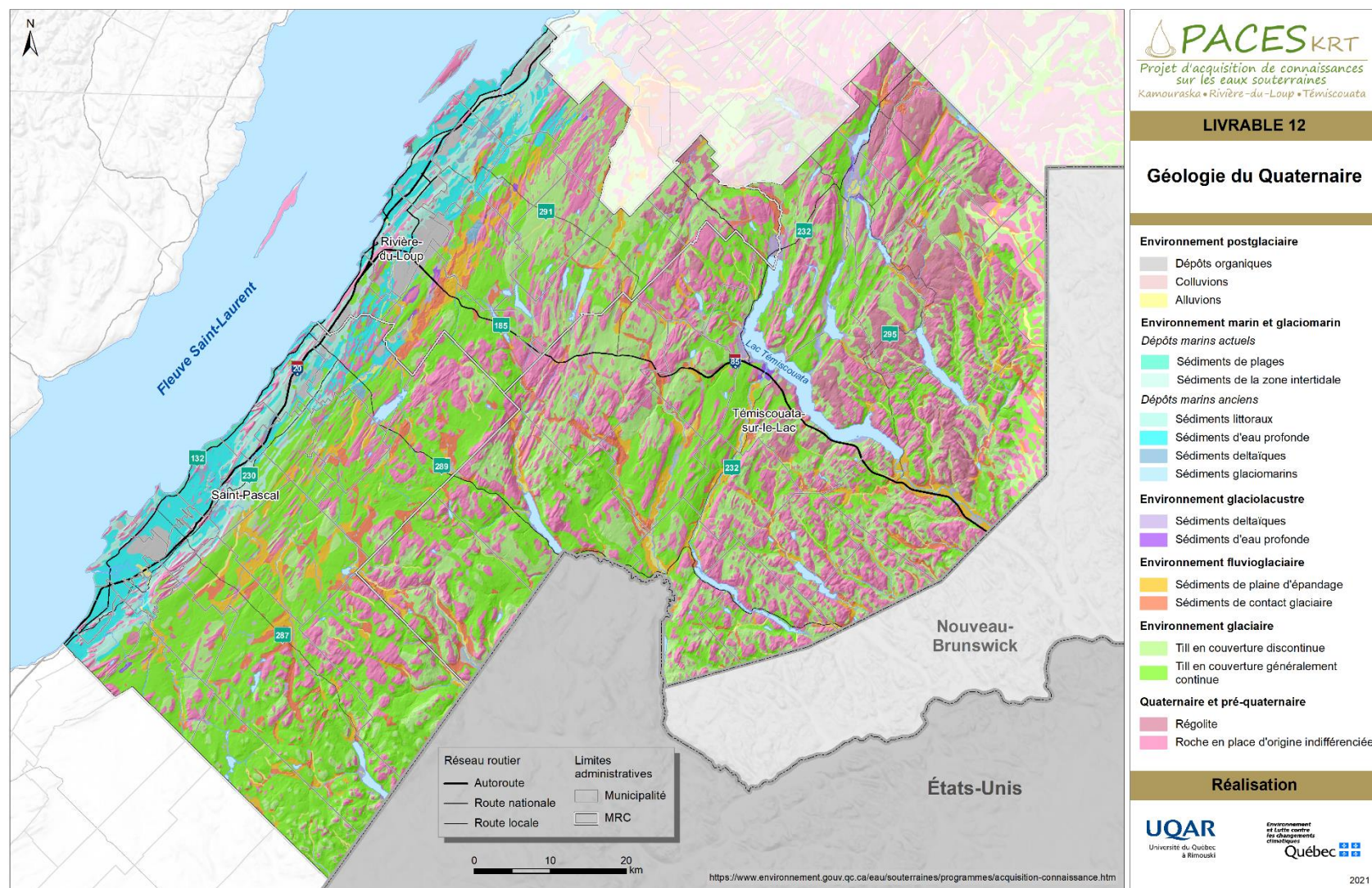
Figure 4.6- Représentation approximative des limites du paléo-lac Madawaska dans la MRC de Témiscouata selon la variabilité spatiale des altitudes des plus hautes terrasses lacustres documentées par Martineau (1979) dans le secteur de Squatec/Lac-des-Aigles (195 m) et par de Jonge (1951) entre Cabano (180 m) et Dégelis (175m).

4.2.3. Nature et distribution des dépôts meubles

Considérant l'histoire de la géologie du Quaternaire sur le territoire du KRT, la couverture de surface des dépôts meubles est très diversifiée spatialement. La carte de la géologie du Quaternaire (livrable 12) correspond à celle de Veillette *et al.* (2017) de la CGC au 1 : 250 000 et représente la couverture sédimentaire de surface la plus à jour sur le territoire. Cette carte est le résultat de la compilation de plusieurs sources, de photo-interprétation au 1 : 40 000 et des validations terrain. Elle a été finalisée avec l'aide de l'équipe du PACES-NEBSL. Elle permet d'identifier plusieurs groupes et sous-groupes : (1) roc (R) et altérites indifférenciées (Wb et Wv), (2) dépôts glaciaires (Tb et Tv), (3) dépôts fluvioglaciaires (GFc et GFp), (4) dépôts glaciolacustres (GLo et GLd), (5) dépôts marins anciens (GMn, GMd, Mo et Mn), (6) dépôts marins actuels (Mi et Mr), (7) dépôts postglaciaires (Ap, C, O).

Période d'activité		Origine des dépôts	Taille des sédiments
<u>Post glaciaire</u>		Alluvial / colluvion / altérite / organique	Sable / gravier / organique
Dernière déglaciation	<u>Exondation</u>	Littoral	Sable / gravier
	<u>Submersion</u>	Mer ou lac de contact ou post-glaciaire	Argile / silt
	<u>Retrait glaciaire</u>	Fluvio-glaciaire	Sable / gravier
	<u>Avancé ou retrait glaciaire</u>	Dépôt glaciaire (till)	Sable / gravier / galet
<u>Géologique</u>		Paléo environnements	Roc

Figure 4.7-Représentation stratigraphique simplifiée de la succession des dépôts meubles pouvant se retrouver sur le territoire du KRT à suite du dernier retrait glaciaire. Il est à noter que selon les secteurs, certains dépôts peuvent être absents ou avoir été érodé (adapté de RQES : Projet PACES-AT1).



LIVRABLE 12

Cette subdivision permet notamment de comprendre la mise en place des dépôts en plusieurs phases, soit par ordre chronologique : le recul de la marge glaciaire depuis la côte vers les hauts plateaux appalachiens, la submersion de la plaine côtière par les eaux de la mer de Goldthwait, l'évacuation des eaux de fonte glaciaire vers le nord, la mise en place de lacs proglaciaires, la régression marine et l'établissement du drainage fluvial actuel (figure 4.7).

Roc (R) et altérite indifférenciés (Wb et Wv)

La présence de roc à nu ou recouverte d'une mince couche de dépôts (R) couvre une superficie non négligeable sur l'ensemble du territoire du KRT (Veillette *et al.* 2017). Ces affleurements rocheux en surface se localisent principalement dans le sud du territoire et de manière générale au-dessus de la limite marine. Dans le sud des MRCs de Rivière-du-Loup et de Kamouraska, ces reliefs rocheux sont essentiellement des crêtes appalachiennes étroites orientées NE-SO ainsi que des basses collines ou plateaux arrondis montrant un remodelage glaciaire évident vers le NE. Sous la limite marine, ces affleurements de roches dures se présentent soit sous la forme de collines d'orthoquartzite perçant la plaine argileuse côtière (Saint-Denis/Kamouraska) (figure 4.8a) ou bien de crêtes allongées continues formées de conglomérat et de brèche (Saint-Pacôme/Mont-Carmel/Saint-Alexandre/Rivière-du-Loup/Saint-Modeste). Dans la MRC de Témiscouata, le roc affleurant couvre une portion très importante du territoire. Il apparaît sous la forme de plateaux de faible superficie et de collines arrondies (figure 4.8b). Considérant que le relief plissé et faillé est orienté NE-SO au nord de la Faille de Témiscouata, ces reliefs rocheux s'orientent principalement dans la même direction que le contexte structural. Cependant, au sud de la Faille de Témiscouata, les plateaux et collines rocheuses, majoritairement orientés NO-SE suivant l'axe des principales vallées, sont moins influencés par la trame structurale. Concernant les nappes d'altérites (Wb et Wv), elles sont essentiellement minces (Wv) et constituées d'une couche résiduelle, discontinue, de fragments rocheux anguleux à sub-anguleux issus de l'altération *in situ* du substrat (figure 4.8c). Elles sont plus fréquentes dans les secteurs où affleurent les roches les plus tendres, plus sensibles aux processus d'altération (Veillette *et al.* 2017). Ces débris sont contenus dans une matrice silto-sableuse mal triée. Les altérites sont particulièrement abondantes au sud de la Faille de Témiscouata ainsi qu'entre les localités de Saint-Pierre-Lamy et de Saint-Cyprien.

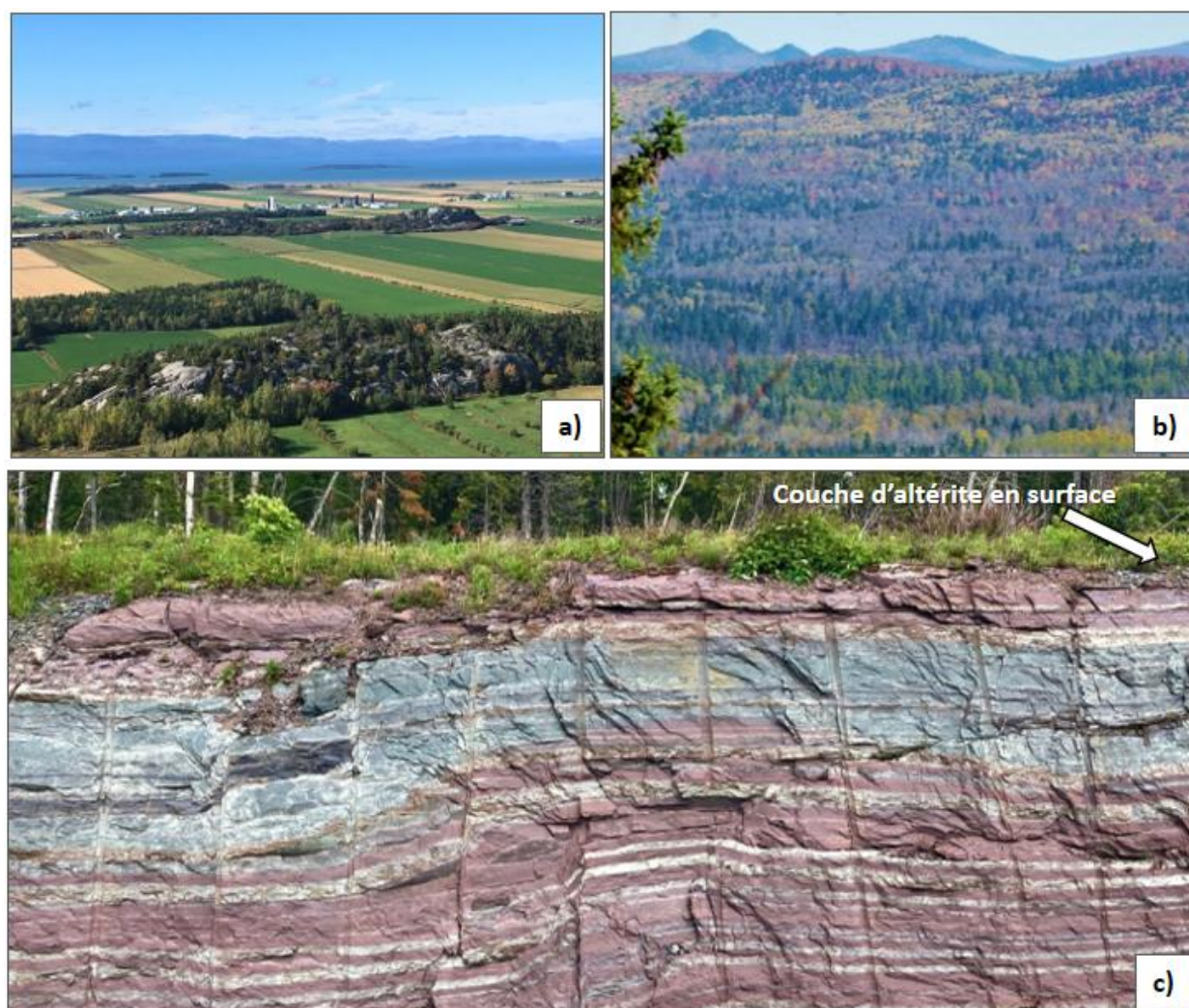


Figure 4.8-. a) Collines d'orthoquartzite dans la plaine argileuse côtière (relief de monadnocks) à partir de la montagne à Cotton (Saint-Pascal). b) Collines ondulées en avant-plan et hauts sommets effilés en arrière-plan dans le Parc national du Lac-Témiscouata. c) Mince couche d'altération au sommet d'un affleurement rocheux composé de schiste ardoisier à hématite (rougeâtre) et à chlorite (verdâtre) près de L'Isle-Verte. (Photos : Jérôme Dubé)

Dépôts glaciaires (Tb et Tv)

Les tills sont des dépôts glaciaires composés de sédiments de taille granulométrique variée déposés directement par la glace sans intervention notable de l'eau de fonte. Veillette *et al.* (2017) les regroupent en deux classes d'épaisseur : le till épais en couverture continue de plus de 1 m d'épaisseur (Tb) et le till mince en placages discontinus de moins de 0,5 m d'épaisseur (Tv). Sur le territoire du KRT, le till régional se compose de fragments de la taille des graviers et des galets avec une faible teneur en blocs, le tout compris dans une matrice sablo-silteuse légèrement carbonatée (figure 4.9a et b). Dans la MRC de Kamouraska, le till épais est très abondant en surface au-dessus de la limite marine et même à certains endroits sous la limite marine, notamment à Sainte-Hélène, Saint-Joseph-de-Kamouraska et au SE de Saint-Alexandre dans la vallée de la Rivière-du-Loup. Pour sa part, le till mince est beaucoup moins abondant et surtout localisé sur les interfluves et le long de quelques flancs de vallées. Sur le territoire de la MRC de Rivière-du-Loup, les deux classes de till – épais et mince – sont très abondantes, couvrant de grandes superficies en continu au-dessus de la limite marine. Un vaste dépôt de till épais est situé au NO des lacs Saint-François et Chouinard. Sous la limite marine, un autre dépôt de till épais se localise le long d'un tracé linéaire reliant Saint-Antonin / Saint-Modeste / Saint-Épiphanie. Dans le Témiscouata, les dépôts de till sont très abondants sur les interfluves, moins dans les vallées où ils sont masqués par des dépôts lacustres, fluvioglaciaires et fluviaux. Le till épais se localise majoritairement sur un axe NE-SO passant par le lac Pohénégamook, la vallée de la rivière Cabano, Lac-des-Aigles et Squatec. On retrouve une importante couverture de till mince dans le secteur situé entre Saint-Pierre-Lamy, Saint-Louis-du-Ha! Ha!, Saint-Elzéar et Saint-Honoré. Au sud de la faille de Témiscouata, les dépôts de till épais sont beaucoup moins abondants. On en retrouve des petites étendues sur les flancs de vallées adjacentes à la rivière Madawaska. Ce secteur est dominé par les couvertures de till mince, principalement sur les interfluves ainsi qu'à la base de ces mêmes flancs de vallées.

Pour sa part, le till de fond se retrouve très rarement en surface dans la région et les coupes ouvertes permettant de les observer sont peu nombreuses. Martineau (1979) mentionne qu'il n'existe dans la région du Témiscouata qu'un seul till de fond que l'on retrouve partout et qu'il reflète assez bien la composition du substrat rocheux sous-jacent. Il mentionne que les

faciès peuvent varier localement, mais de manière générale ce till est plutôt compact, caillouteux, non-calcareux, gris ou brunâtre lorsqu'il est oxydé et d'aspect granuleux lorsqu'il est altéré. Ce dernier faciès est observable entre Biencourt et Dégelis. Une variante plutôt brun-rouge et non calcaireuse a été retrouvée dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rivière-Bleue (Martineau, 1979).

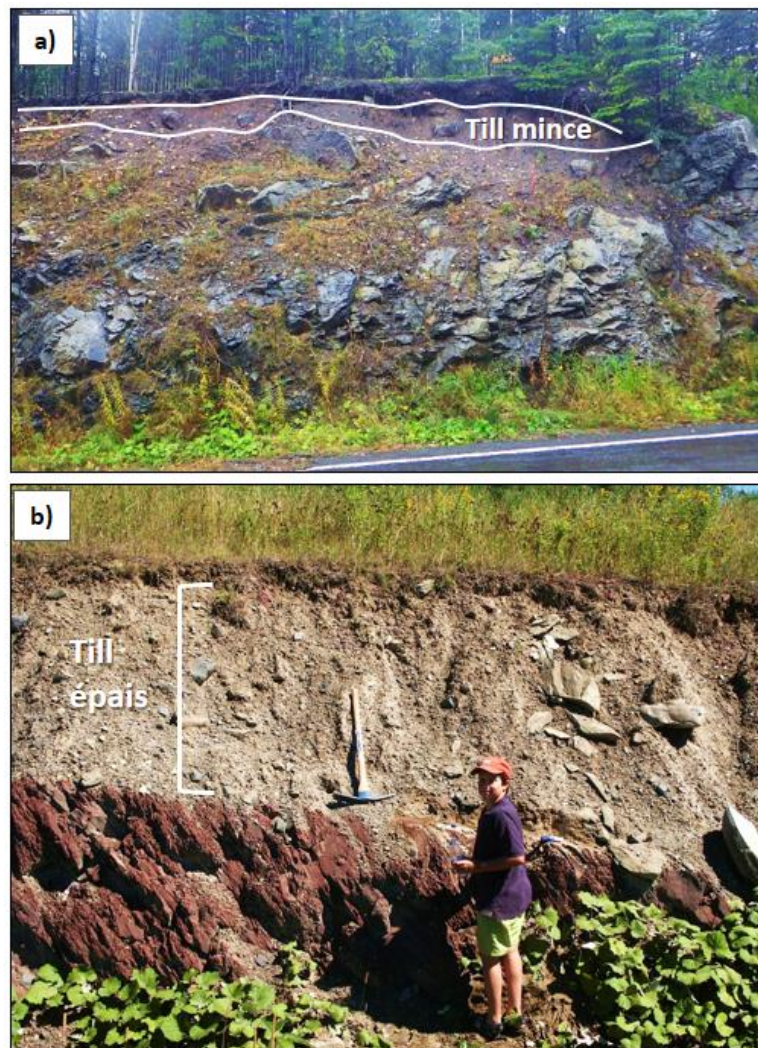


Figure 4.9-a) Till d'ablation mince (<0,5m) retrouvé au nord de Mont-Carmel (Photo Jérôme Dubé) et b) till de fond épais (<1m) à Transfiguration (Photo Bernard Héту).

Dépôts fluvioglaciaires (GFc et GFp)

Les dépôts fluvioglaciaires affleurent sur l'ensemble du territoire, principalement dans les fonds et les flancs des vallées. Dans la plaine côtière, on retrouve peu de dépôts fluvioglaciaires en surface. Veillette *et al.* (2017) distinguent les sédiments de contact glaciaire (GFc) et les sédiments de plaine d'épandage (GFp). Les sédiments de contact glaciaire (GFc) regroupent les formes retrouvées dans les fonds et sur les flancs des vallées : eskers / kame / terrasses de kame / constructions morainiques par les eaux de fonte (figure 4.10a et b). Les eskers sont assez abondants dans la MRC de Témiscouata. Localisés dans le fond des vallées, ils forment des crêtes allongées sinueuses discontinues. Composés pour l'essentiel de sables et de graviers stratifiés mal triés, ils montrent un écoulement généralisé vers le nord (Veillette *et al.*, 2017). Dans les vallées plus larges ou entre les sillons appalachiens, on retrouve occasionnellement des dépôts de kame et des terrasses de kame qui témoignent de la fonte sur place d'une masse de glace stagnante (Hétu, 1998). Il est également fréquent de retrouver des dépressions plus ou moins circulaires nommées kettles dans lesquelles l'eau peut s'accumuler, formant des lacs de petites dimensions. La vallée de la rivière Ashberish dans le secteur des Sept Lacs, au nord du lac Témiscouata, en contient quelques-uns.

La moraine de Saint-Antonin, près de Rivière-du-Loup (secteur Saint-Modeste/Saint-Antonin), représente le principal dépôt fluvioglaciaire de contact. Formé entre la marge glaciaire et la mer de Goldthwait, cet imposant dépôt fut construit principalement par les eaux de fonte glaciaire provenant du sud (Martineau, 1977; Lasalle *et al.*, 1977; Martineau et Corbeil, 1983) (figure 4.11a). Martineau (1977) précise que la composition sédimentaire de cette moraine varie énormément suivant les secteurs. On y observe des unités d'argile massive recouverte de graviers grossiers, des zones de stratifications silteuses et sableuses en alternance, des bancs massifs de galets grossiers et de blocs métriques ou encore des faciès deltaïques composés de couches de sables et graviers fortement inclinés. L'épaisseur des dépôts de la moraine peut varier de quelques mètres à 60 m (Martineau, 1977). Dans le cadre de ce PACES-KRT, les travaux de Dumont (2019) a permis de cartographier à l'aide des imageries Lidar, la continuité du dépôt morainique sur le territoire de Kamouraska et d'y décrire les principales particularités sédimentologiques (figure 4.11b).

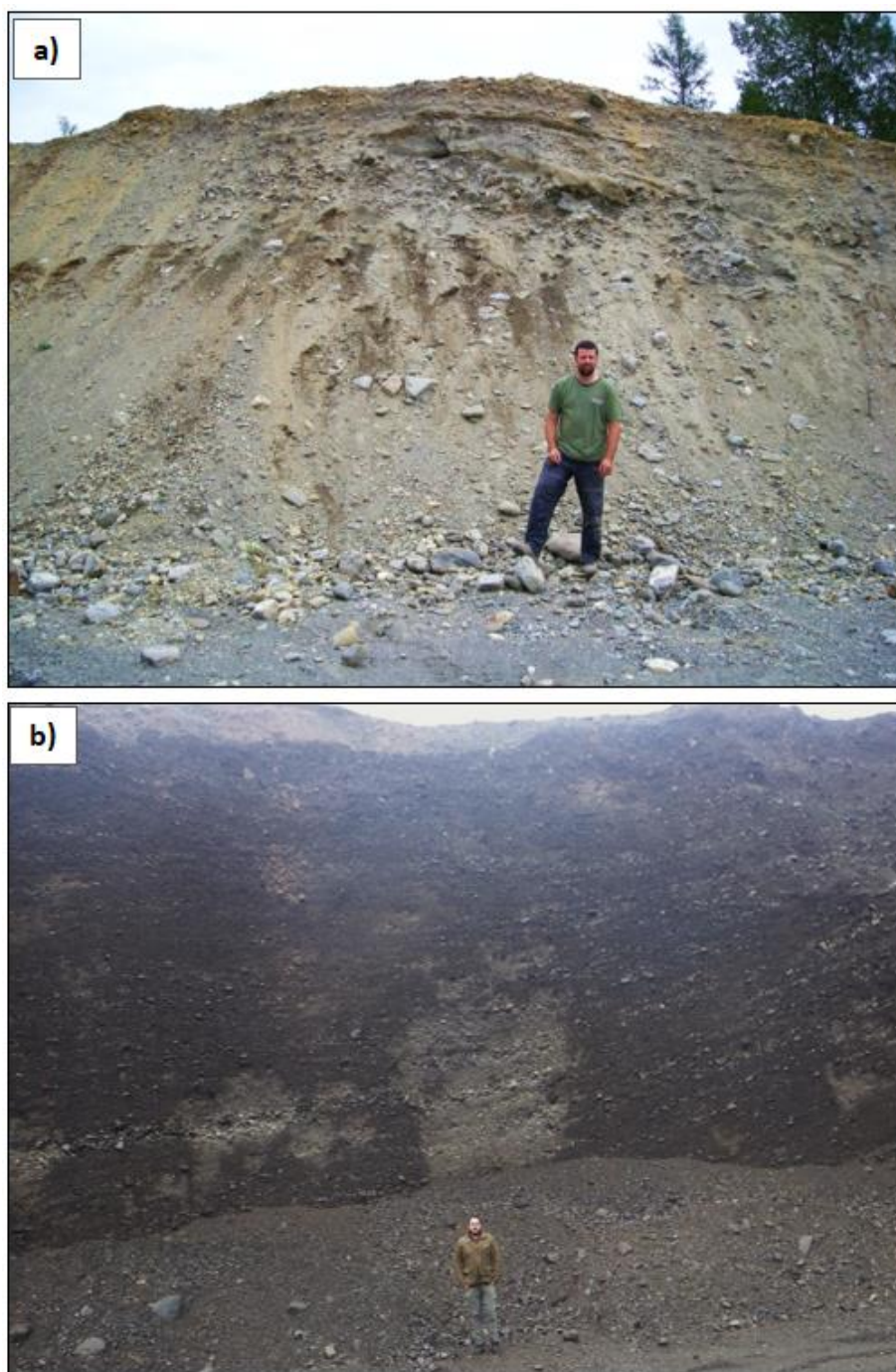


Figure 4.10-a) Dépôt de sable et graviers composant l'esker situé nord-est du Lac de la Grande-Fourche (Photo Bernard Hétu). b) Coupe dans une gravière située au sud-est de Quartier Saint-Thomas montrant l'important dépôt de sable et graviers stratifiés d'origine fluvioglaciaire de contact glaciaire (Photo Jérôme Dubé).

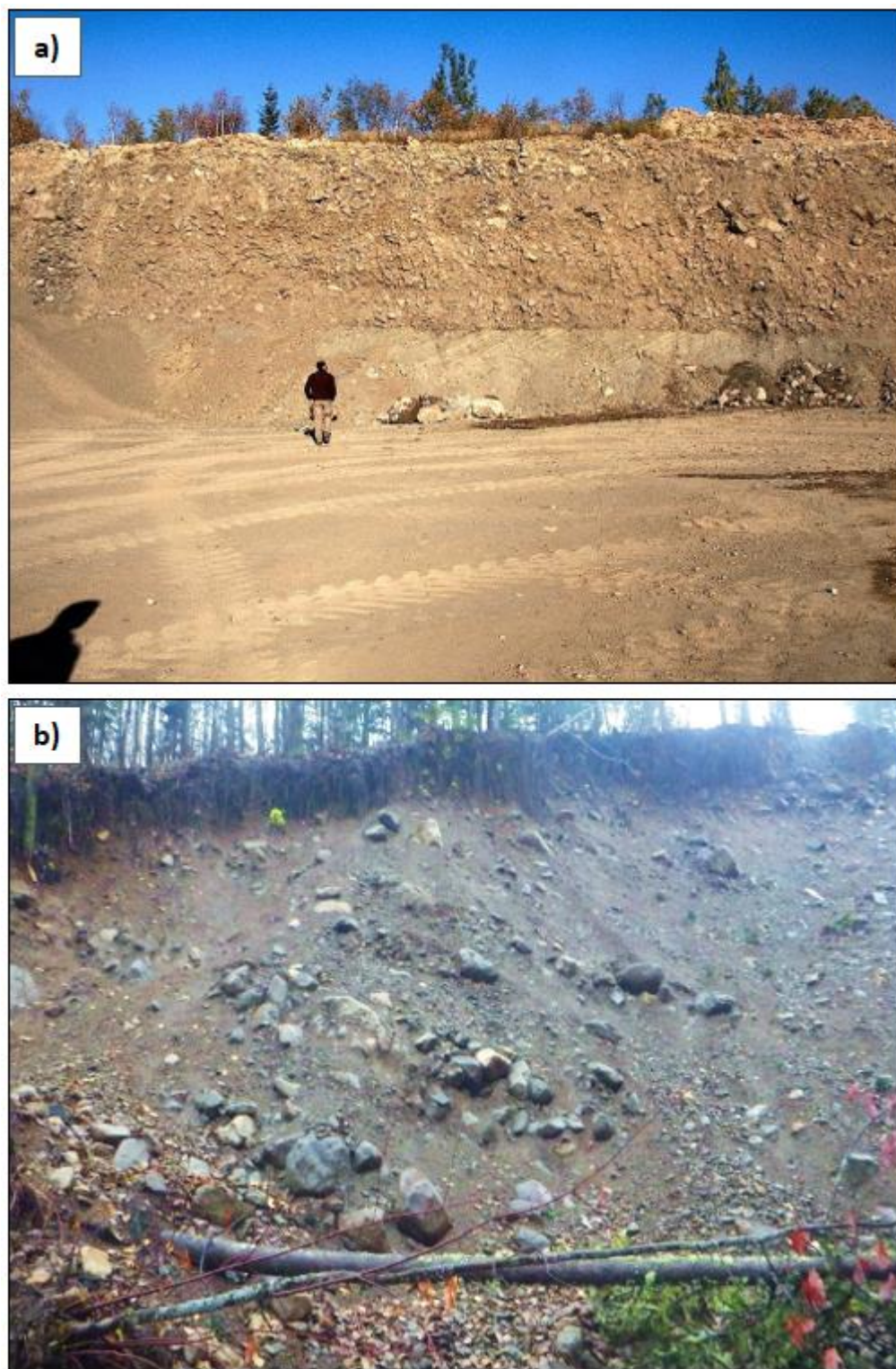


Figure 4.11-a) Dépôt fluvio-glaciaire au sein de la Moraine de Saint-Antonin déposé par les eaux de fonte glaciaire en bordure de la mer de Goldthwait (Photo Bernard Hétu). b) Dépôt morainique à granulométrie hétérogène localisé au sud-est de Saint-Onésime dans la vallée de la rivière Ouelle (Photo Jérôme Dubé).

Veillette *et al.* (2017) caractérisent les sédiments d'épandage (GFp) comme étant des formes sédimentaires étalées issues des eaux de fonte à proximité du glacier. Ces plaines d'épandage se localisent dans les vallées larges et parfois dans les sillons appalachiens. Les vallées de Kamouraska, de Saint-Denis, de Cabano et de Madawaska contiennent de beaux exemples de ces dépôts.

Dépôts glaciolacustres (GLo et GLd)

Les sédiments glaciolacustres se subdivisent en deux catégories, les dépôts à grains fins d'eau profonde (GLo) et les sables et graviers deltaïques (GLd) (Veillette *et al.* 2017). Ces dépôts impliquent un apport sédimentaire venant des eaux de fonte glaciaire qui contribuaient à la sédimentation lacustre. Ces lacs inondèrent les dépressions situées à la marge glaciaire durant la déglaciation. On distingue plusieurs phases lacustres très complexes dont les littoraux sont généralement inclinés vers le sud (Morissette *et al.*, 2020). Deux types de sédiments lacustres s'y sont accumulés : des sédiments fins déposés par décantation dans les zones les plus profondes (GLo) (figure 4.12a) alors que la zone littorale accumulait surtout des sédiments grossiers (sable et gravier) sous la forme de deltas (figure 4.12b) et de série de plages ou terrasses (GLd) (figure 4.12c). Les sédiments fins sont surtout représentés par des dépôts silto-argileux organisés en grandes strates horizontales nommées rythmites ou varves selon que la sédimentation se fait ou non suivant un cycle annuel. Ces dépôts affleurent en surface à quelques endroits en bordure du lac Témiscouata, près de Cabano, ainsi que dans la vallée de Squatec. L'une des plus belles séquences est située sur les berges de la rivière Horton, juste au nord du village de Squatec. Ces dépôts glaciolacustres de rythmites et de varves silto-argileuses sont relativement abondants sur le territoire étant l'étendue du lac glaciaire Madawaska (de Jonge, 1951), l'un des plus vastes des Appalaches québécoises. Martineau (1979) mentionne que ces silts et argiles se retrouvent principalement le long des vallées majeures comme celle de la rivière Madawaska et celles des lacs Touladi et des Aigles. Morissette *et al.* (2020) ont localisé plusieurs coupes stratigraphiques exposant les rythmites dans cette région. On retrouve également ces dépôts lacustres près du lac Pohénégamook et le long de la rivière Bleue, près de Biencourt ainsi qu'en bordure du lac Saint-François, dans la MRC de Rivière-du-Loup (Martineau, 1979; Morin, 1985). Dans les vallées, ces sédiments glaciolacustres d'eau profonde se retrouvent généralement sous les graviers

d'origine fluviale. Pour ce qui est des dépôts de sables et graviers deltaïques (GLd), ils affleurent sensiblement dans les mêmes secteurs, mais ils sont plus répandus et couvrent une plus grande superficie. Ces dépôts peuvent se retrouver perchés sur les flancs des vallées, car les niveaux du lac Madawaska étaient beaucoup plus élevés que les lacs actuels. On retrouve également plusieurs terrasses lacustres qui ont permis notamment de reconstituer l'étendue de ce lac (de Jonge, 1951; Kite et Stuckenrath, 1989).

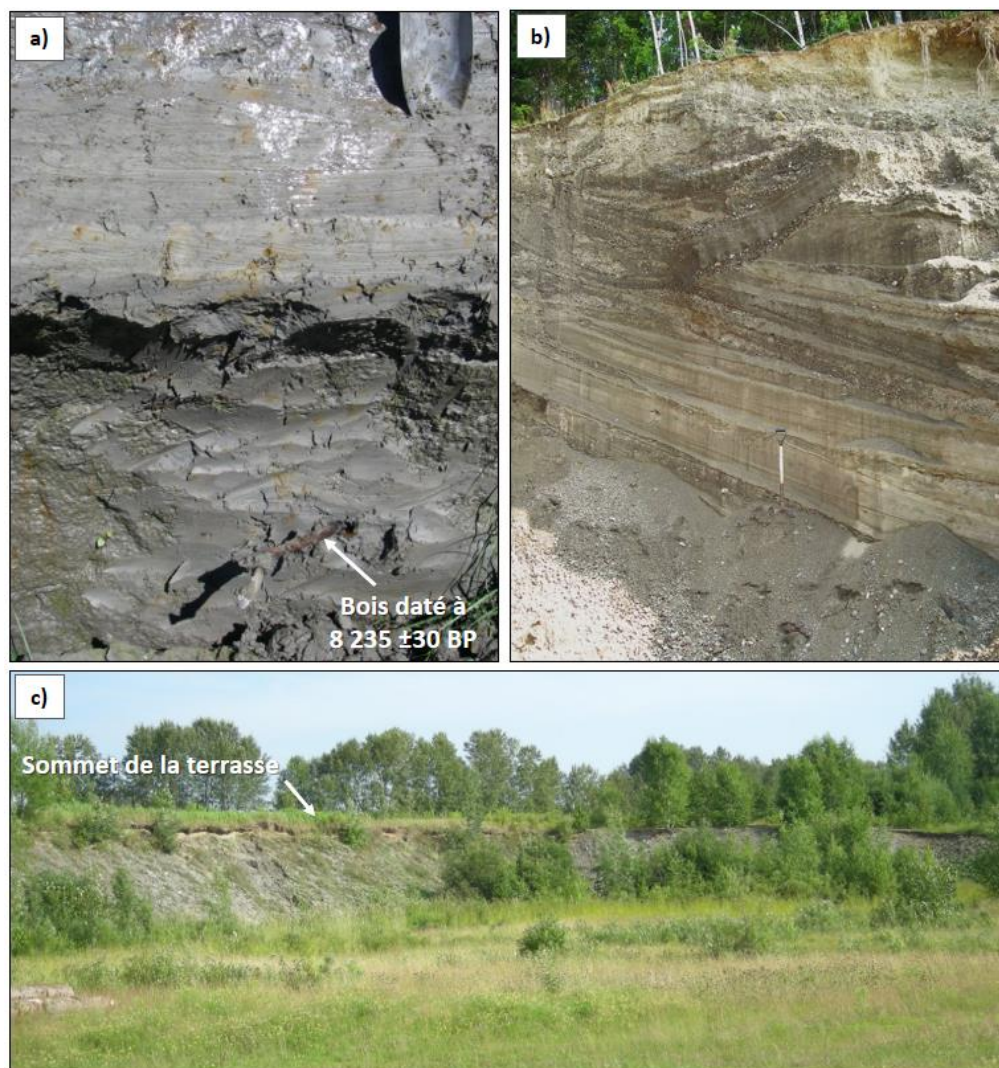


Figure 4.12-a) Rythmites silto-argileuses lacustres du paléo-lac Madawaska, vallée de la rivière Saint-Jean au Nouveau-Brunswick. Une branche de bois récoltée dans ce dépôt à une altitude de 140 m a donné un âge radiocarbone non calibré de $8\,235 \pm 30$ BP (ULA-3939) (Hétu et Dubé, inédit). b) Dépôt de sables et graviers montrant des structures d'écoulement associé à la formation d'un delta dans le paléo-lac Madawaska à une altitude de 170 m à Dégelis (Photo Bernard Hétu). c) Terrasse lacustre correspondant à un ancien niveau du paléo-lac Madawaska à une altitude de 170 m à Dégelis (Photo Jérôme Dubé).

Dépôts marins anciens (GMn, GMd, Mo et Mn)

Confinés dans la plaine côtière de la vallée du Saint-Laurent, les dépôts liés aux environnements marins anciens ont été subdivisés en quatre catégories selon le milieu de sédimentation : les sédiments glaciomarins (GMn), les sédiments marins d'eau profonde (Mo), les sédiments deltaïques (Gmd) et les sédiments littoraux (Mo) (Veillette *et al.* 2017). Ces dépôts sont présentés dans l'ordre chronologique de mise en place.

Les sédiments glaciomarins (GMn) se sont mis en place dans la mer de Goldthwait, au début de l'invasion marine, alors que la marge glaciaire était située à proximité, au droit des premières barres appalachiennes, qui lui servaient de zone d'ancrage. La marge glaciaire est restée en contact avec la mer pendant plusieurs siècles, y apportant des sédiments de tailles variées (argile à blocs) soit directement, par le biais des nombreux chenaux fluvioglaciaires qui s'y déversaient, ou indirectement, par le biais des icebergs (blocs défectés). Ces dépôts hétérogènes se présentent actuellement comme des diamictons gris, argileux, compacts, parfois fossilifères, à forte charge caillouteuse. Sur le territoire du KRT, aucun dépôt glaciomarin n'a été cartographié en surface, car ils ont été enfouis sous des sédiments d'origine variée pendant et après la régression marine.

Les sédiments marins d'eau profonde (Mo) sont représentés par une argile-silteuse grise contenant peu de cailloux qui s'est accumulée dans la mer de Goldthwait dès le recul de la calotte appalachienne vers le sud. Ce recul glaciaire marque la transition entre les phases glaciomarine et marine. Les données compilées dans l'étude de Veillette *et al.* (2017) montre que les dépôts argileux d'eau profonde affleurent entre 90 et 140 m d'altitude, essentiellement dans la plaine côtière. Cette couche argileuse occupe la plus grande place en surface dans la MRC de Kamouraska; elle couvre également une vaste superficie dans les secteurs de La Pocatière/Rivière-Ouelle/Saint-Denis/Kamouraska (figure 4.13a). Elle apparaît en bande continue orientée NE-SO dans le secteur de Saint-Alexandre/Notre-Dame-du-Portage. Elle domine le secteur allant de Rivière-du-Loup/Cacouna/Isle Verte/vallée de la rivière Verte.

Les sédiments deltaïques anciens (GMD) soulignent les principaux points d'entrée des eaux de fonte dans la mer de Goldthwait. Ils sont surtout localisés près de l'embouchure des

principales vallées où ils ont été découpés en terrasses durant la régression marine. Ces eaux de fonte ont apporté une de grandes quantités de sédiments sablonneux et graveleux qui se sont déposés près des paléo-lignes de rivages. La cartographie des plus hauts complexes deltaïques a permis de délimiter la limite marine maximale. Elle a été estimée à environ 160 m à Rivière-Ouelle et à 140 m à Trois-Pistoles (Veillette *et al.* 2017). À partir de ce moment, le niveau marin a débuté une phase régressive au rythme du relèvement glacio-isostatique, permettant l'édification de différents niveaux de deltas dans certaines vallées.

Les sédiments littoraux anciens (Mn) comprennent toutes les formes littorales qui se sont développées à différentes altitudes durant la phase régressive de la mer de Goldthwait. Ces dépôts, représentés par des crêtes de plage, des tombolos, des flèches littorales ou des cordons littoraux, sont composés de sables et de graviers stratifiés, bien triés et arrondis, qui reposent sur les dépôts argileux de la phase marine principale (figure 4.13b).

Dépôts marins actuels (Mi et Mr)

Les dépôts marins actuels ont été cartographiés selon deux environnements de sédimentation différents : les sédiments intertidaux (Mi) et les sédiments littoraux (Mr) (Veillette *et al.* 2017). Les sédiments de la zone intertidale (Mi) correspondent à une mince couche de vases sablonneuses recouvrant essentiellement la surface d'érosion d'argile profonde de la mer de Goldthwait (Dionne 1977). Outre ces vases, on retrouve des cailloux et des blocs d'origine précambrienne et appalachienne ayant été transportés et déposés sur les argiles marines profondes lors du dernier retrait glaciaire (Dionne, 2007). À marée basse, il est possible de voir des dallages et des cordons glaciels. Les estrans intertidaux les plus larges sont localisés dans la MRC de Rivière-du-Loup, principalement les secteurs de l'Anse au Persil, près du rocher de Gros-Cacouna, dans le secteur de L'Isle-Verte jusqu'à l'anse de Saint-Éloi. Les sédiments littoraux (Mr) sont constitués de sables et de graviers formant principalement des plages aux embouchures des rivières (Rivière-Ouelle/Kamouraska/Verte), dans certaines baies (Kamouraska) et anses (Verte), mais aussi quelques rares tombolos observés surtout dans la MRC de Kamouraska (Pointe Saint-André) (figure 4.14).

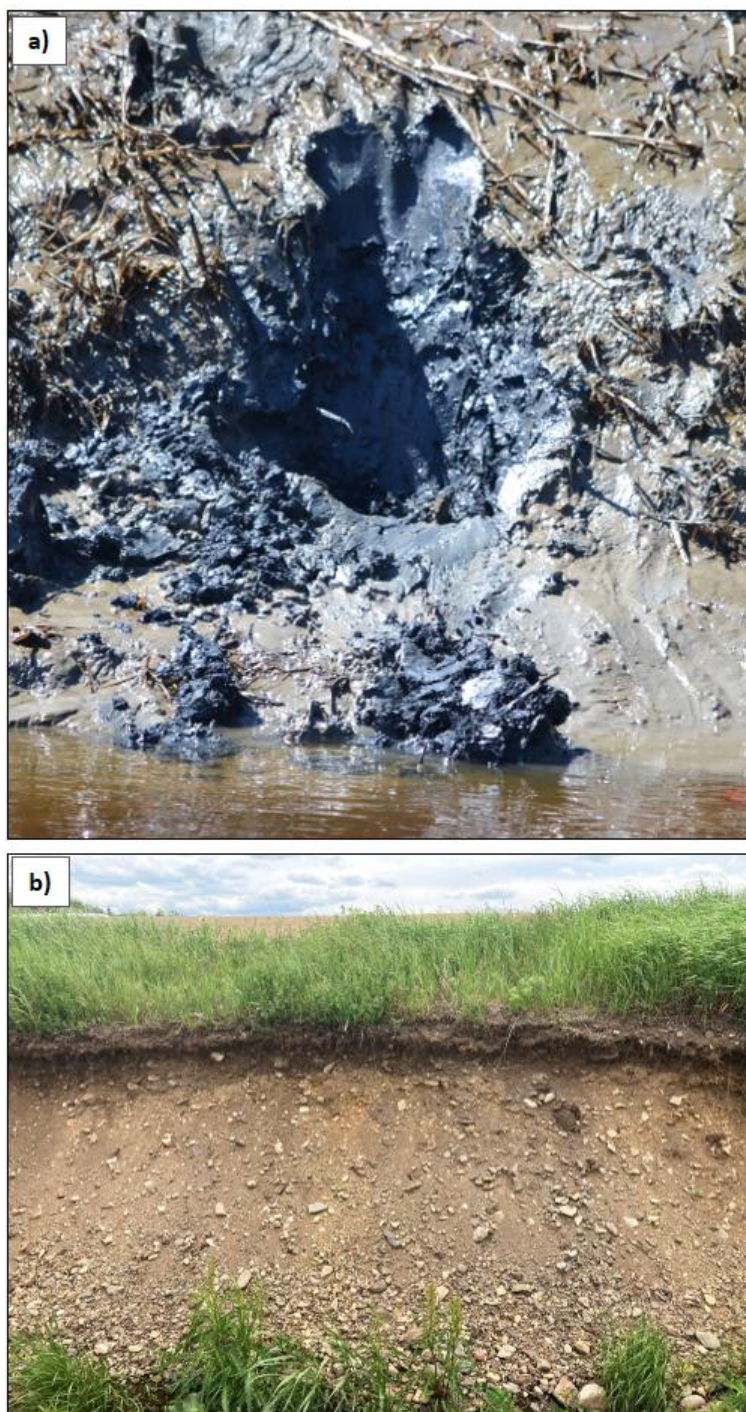


Figure 4.13-a) Argile silteuse grise de la mer de Goldthwait retrouvée le long d'une berge de la rivière Kamouraska (Photo Charles-Édouard Deschamps). b) Dépôt sablo-graveleux d'origine littorale (plage soulevée) à 123 m d'altitude à Saint-Alexandre-de-Kamouraska (Photo Jérôme Dubé).



Figure 4.14-Photo montrant la diversité de la sédimentation retrouvée en milieu intertidal et littoral en bordure du fleuve Saint-Laurent à Notre-Dame-du-Portage (Photo Jérôme Dubé).

Dépôts postglaciaires (Ap, C, O)

Les dépôts alluviaux (Ap) comprennent à la fois les plaines alluviales, qui se déploient au fond des vallées les plus larges, et les cônes alluviaux, construits à l'embouchure des torrents et petites vallées affluentes (Veillette *et al.* 2017). Étant les plus répandues, les plaines alluviales se sont formées par l'accumulation de sédiments déposés par les rivières (alluvions) dans les vallées lors des inondations. Les changements dans le régime hydrologique combiné au relèvement glacio-isostatique ont provoqué l'abaissement du niveau de base et l'incision des rivières dans les dépôts quaternaires. Des terrasses fluviales étagées soulignent les étapes de l'encaissement. Sur le territoire du KRT, les plaines alluviales sont principalement composées de sables et de graviers très bien triés contenant des lentilles de silts déposées lors événements des débordements (Martineau, 1977; Martineau 1979) (figure 4.15a). Martineau 1979 mentionne que le long des vallées des rivières Madawaska, Cabano, Bleue, Sainte-Françoise, Touladi et des Aigles, les terrasses fluviales se composent de sables et graviers arrondis à granulométrie plus fine que les sédiments fluvio-glaciaires. Dans Kamouraska et Rivière-du-Loup, les plaines alluviales sont assez bien développées dans certaines sections des rivières Kamouraska, Rivière-du-Loup et Verte. Pour leur part, les cônes alluviaux sont des formes en éventails mises en place à une rupture de pente entre un cours d'eau à forte pente et une vallée suffisamment large pour permettre leur développement (Buffin-Bélanger et Héту, 2008; Héту, 2008). Malgré que ces formes d'accumulations soient peu abondantes sur le territoire du KRT, les études de Buffin-Bélanger et Héту (2008) et Héту (2008) décrivent la mise en place de deux cônes alluviaux qui se sont mis en place dans des contextes différents et possédant une granulométrie contrastée : le cône à granulométrie grossière de Saint-Pacôme mis en place dans la plaine côtière argileuse et le cône limoneux de Squatec formé sur le fond de l'ancien lac glaciaire Madawaska. Construits depuis quelques milliers d'années, ces cônes sont souvent associés à de petits bassins à pente raide possédant un régime hydrologique torrentiel comme le ruisseau Théberge ou la rivière Boucané situé à l'ouest du lac Pohénégamook ou bien le cône alluvial de la rivière des Pointes qui se construit dans le lac de l'Est (figure 4.15b).

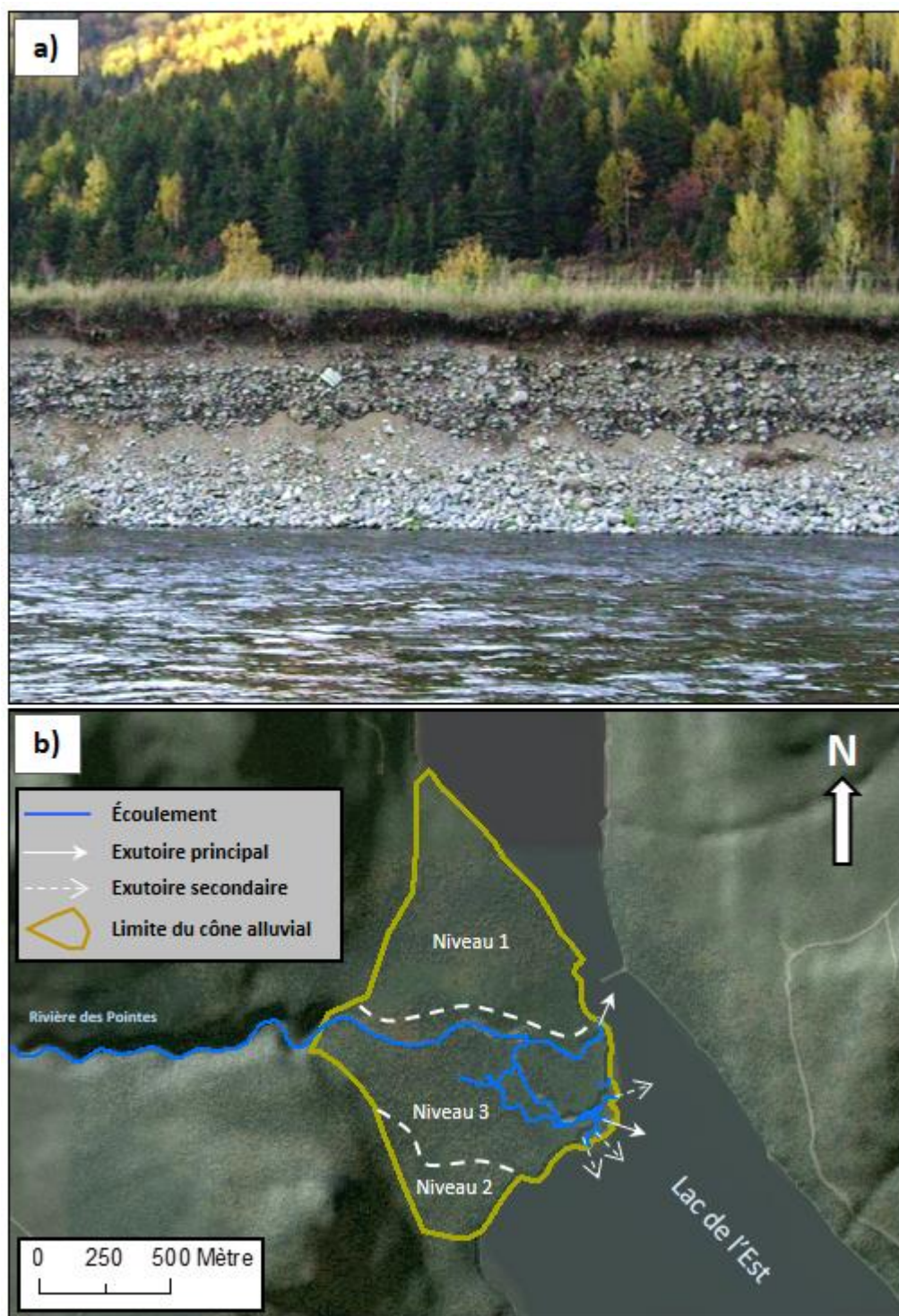


Figure 4.15-a) Plaine alluviale en érosion composée de sables, de graviers et de galets imbriqués (rivière Nouvelle, Gaspésie) montrant la composition sédimentologique de plusieurs rivières graveleuses retrouvées sur le territoire du KRT (Photo Jérôme Dubé). b) Limite du cône alluvial dans le lac de l'est incluant la localisation des chenaux d'écoulement, des exutoires principaux et secondaires ainsi que l'identification de 3 niveaux distincts de la surface du cône (1 = plus haut et 3 = plus bas).

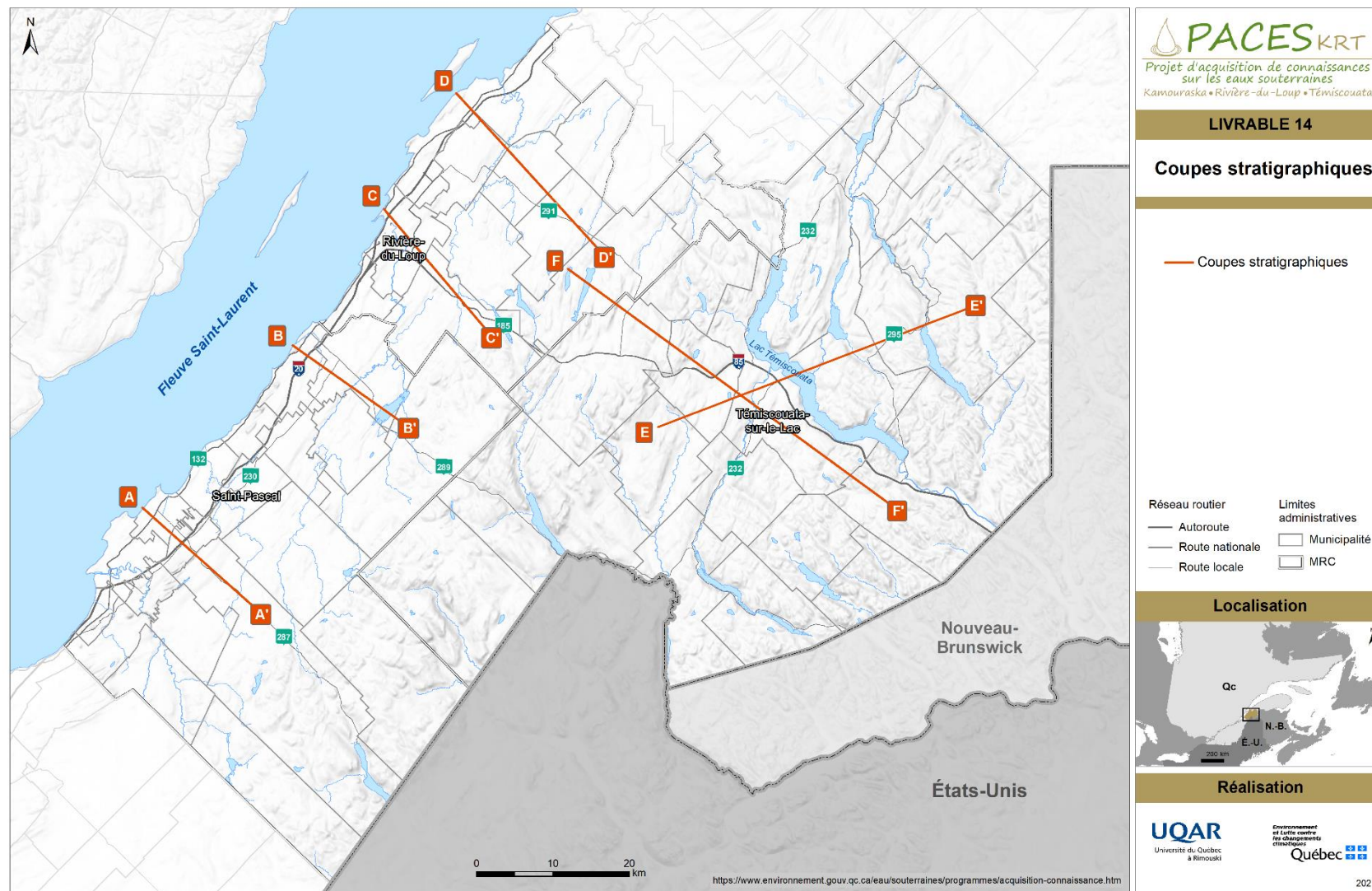
Les colluvions (C) sont des dépôts de versant composés de graviers et de cailloutis anguleux que l'on retrouve sur les versants des vallées et les interfluves. Outre les dépôts de plus importants retrouvés de part et d'autre de la vallée escarpée de la rivière Noire dans la portion SO de la MRC de Kamouraska, ces dépôts sont quasi-absents de la cartographie de Veillette *et al.* (2017). Cependant, ces derniers sont très abondants lorsque cartographiés à une plus grande échelle, car ils se localisent très près des flancs de vallées.

Les sédiments organiques (O) ont été subdivisés en deux grandes catégories sur le territoire : les vastes tourbières de la plaine côtière et les cédrières et mélézins tourbeuses des hauts plateaux appalachiens (Veillette *et al.* 2017). Dans la plaine côtière, les tourbières occupent de grandes superficies. Elles se concentrent principalement dans le secteur de Rivière-Ouelle et entre Saint-Alexandre et Rivière-du-Loup (Martineau, 1977). Buteau (1986) mentionne que la tourbière de Rivière-du-Loup est de loin la plus grande de la région avec une superficie d'environ 31,5 km² et une profondeur moyenne de 2,6 m. La tourbière de Rivière-Ouelle, qui couvre une superficie 15,35 km² sur une profondeur moyenne de plus de 3 m, est la deuxième plus importante dans le KRT. Les autres tourbières, comme celles de Saint-Alexandre, Notre-Dame-du-Portage, Saint-Arsène, Cacouna et L'Isle-Verte, ont de plus petites superficies, étant inférieures à 7 km², mais leur épaisseur moyenne est comparable. Concernant les cédrières et mélézins tourbeuses, elles sont de plus petites dimensions, nettement plus minces (moins de 1,5m) et beaucoup plus jeunes (Hétu, 2008). Elles se sont développées dans des dépressions du socle et dans les zones mal drainées dans les vallées.

4.3. Coupes stratigraphiques

La couverture et la répartition spatiale des dépôts superficiels sur le territoire du KRT sont étroitement liées aux différentes étapes du dernier retrait glaciaire et du contexte géologique. La stratigraphie des dépôts meubles varie d'abord en fonction de la submersion marine de la mer de Goldthwait, de l'étendue des lacs proglaciaires et du trajet des eaux de fonte à la suite du retrait de la marge glaciaire vers le sud. Cette succession de paléoenvironnements est survenue sur un relief appalachien possédant des caractéristiques morphostruturales complexes qui ont affecté la distribution des dépôts à différents moments lors du dernier retrait glaciaire. Considérant la diversité du contexte stratigraphique sur le territoire et les particularités physio-géographiques, il est possible de distinguer cinq principaux environnements dans lesquels se sont déposés les dépôts meubles : (1) la basse plaine côtière, (2) les sillons appalachiens et vallées fluviales en dessous de la limite marine, (3) les sillons appalachiens et vallées fluviales au-dessus de la limite marine, (4) les vallées fluviales au-dessus de la limite marine et ayant été recouverts sporadiquement par des lacs proglaciaires ou postglaciaires et (5) les hauts plateaux et collines arrondies situés au-dessus de la limite marine. Considérant l'hétérogénéité des données et de l'étendue des forages au roc sur le territoire du KRT, six coupes stratigraphiques ont été générées afin d'illustrer la diversité régionale des dépôts meubles retrouvés sur le territoire (livrable 14).

Ces coupes stratigraphiques générées comprennent à la fois les informations sur les particularités géologiques (formations géologiques/plis/failles principales) issues des données sur la géologie générale du ministère de l'énergie et des ressources naturelles du Québec, la topographie de surface obtenue des modèles numériques de terrain (Lidar et 1 : 20 000 lorsque les données Lidar étaient non disponibles) et la caractérisation des dépôts granulaires obtenue grâce aux forages au roc situés à proximité des coupes stratigraphiques choisies.

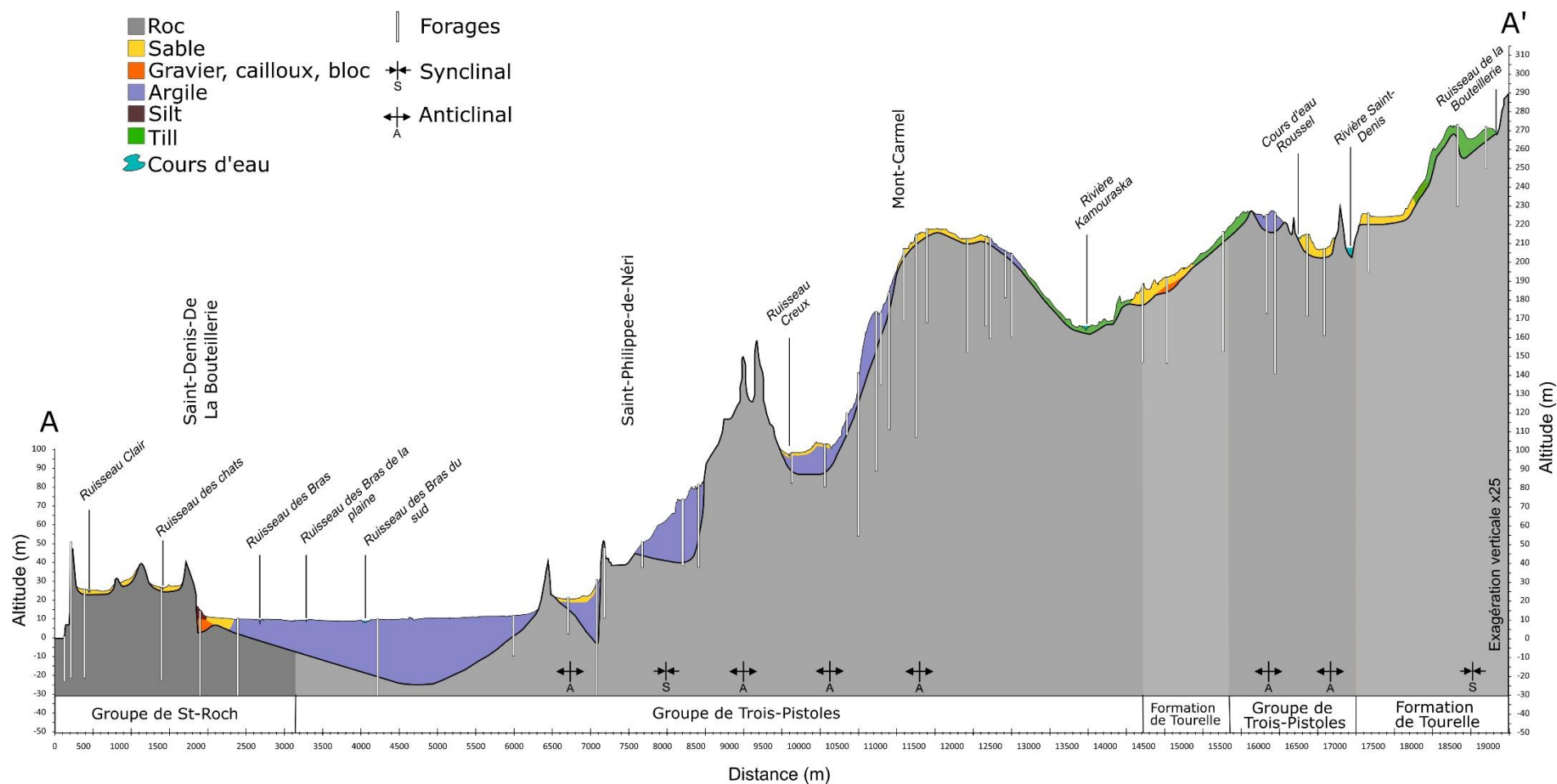


LIVRABLE 14

Coupe A : Saint-Denis-De La Bouteillerie / Saint-Philippe-de-Néri / Mont-Carmel

Située dans la partie ouest de la MRC de Kamouraska, la coupe stratigraphique A-A' possède une orientation NO-SE recoupant perpendiculairement les crêtes et sillons appalachiens à partir de la côte, et ce, sur une distance de 19 km. Trente-huit (38) forages au roc ont été utilisés afin de construire cette coupe. On retrouve le long de la coupe A-A', trois formations géologiques : le Groupe de St-Roch, le Groupe de Trois-Pistoles et la formation de Tourelle. Les principaux centres des plis appalachiens (anticlinaux et synclinaux) en surface sont principalement situés dans les roches du Groupe de Trois-Pistoles entre Saint-Philippe-de-Néri et Mont-Carmel. On retrouve des accumulations sédimentaires dans trois principaux types de relief le long de la coupe, c'est-à-dire dans les sillons appalachiens larges et évasés (plaine côtière et les vallées du ruisseau Creux et de la rivière Kamouraska), dans les sillons appalachiens étroits (environ 0,5 et 2 km de largeur) ainsi que sur les plateaux et les flancs de vallée à pente modérée.

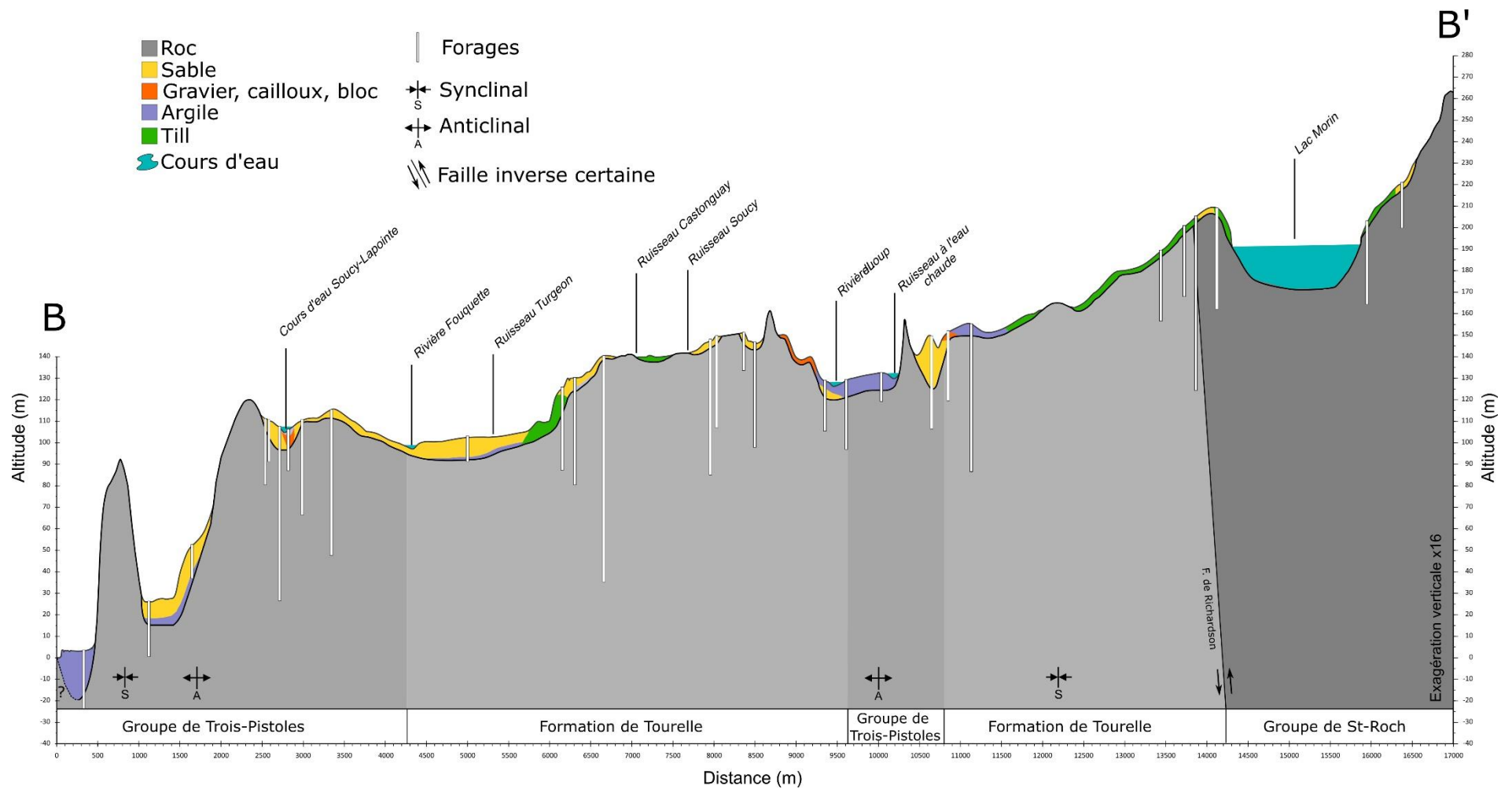
Dans cette partie du territoire, la limite marine maximale a été fixée à environ 165 m d'altitude correspondant au paléodelta perché de la rivière Ouelle. Ainsi, les argiles d'eau profonde se localisent dans la plaine côtière, reposant directement sur le roc, et pouvant atteindre des épaisseurs de 10 et 35 m comme par exemple dans la basse plaine côtière entre Saint-Denis-de-Kamouraska et Saint-Philippe-de-Néri. Des dépôts sablonneux de faible épaisseur (<3 m) et d'origine littorale se sont accumulés à l'occasion sur les dépôts argileux ou dans les sillons perchés près de la côte. Seul un étroit dépôt granulaire localisé au pied d'une crête appalachienne dans la basse plaine côtière près de Saint-Denis-De-La-Bouteillerie peut être considéré comme un potentiel d'aquifère. Au-dessus de la limite marine maximale, on retrouve essentiellement des dépôts d'origine glaciaire (till) et des dépôts sablonneux et graveleux d'origine fluvio-glaciaire (contact et épandage) comme retrouvée à proximité des vallées de la rivière Kamouraska et de Saint-Denis. Reposant directement sur le roc, ces dépôts granulaires peuvent avoir entre 5 et 15 m d'épais et peuvent être considérés comme des aquifères. Fait à noter, la présence de dépôts argileux à plus de 200 m d'altitude, notamment près de Mont-Carmel, est difficilement interprétable.



Coupe B : Saint-André-de-Kamouraska / Saint-Alexandre-de-Kamouraska / Lac Morin

La coupe B-B', d'une distance de 17 km, a été réalisée dans la partie est de la MRC de Kamouraska et est orientée NO-SE, perpendiculaire aux crêtes et sillons appalachiens. La représentation de la nature des sédiments et de l'épaisseur des dépôts meubles est basée sur 29 forages au roc situés à proximité du tracé. Sur une distance d'environ 13,5 km à partir de la côte, on retrouve une succession de deux formations géologiques, le Groupe de Trois-Pistoles et la Formation de Tourelle. Le contact géologique entre la Formation de Tourelle et le Groupe de St-Roch, au NO du lac Morin, correspond à la faille régionale inverse Richardson. La présence de crêtes appalachiennes de hautes altitudes à proximité de la côte cause une répartition différente des dépôts meubles dans la plaine côtière par rapport à la coupe A. Cela explique notamment la faible largeur de la basse plaine côtière (<30 m d'altitude). Ainsi, les principaux dépôts meubles se sont déposés à des altitudes allant de 90 à 170 m dans des sillons appalachiens larges (rivière Fouquette/ruisseau Turgeon et rivière du Loup), dans des sillons plus étroits (environ 0,5 à 2 km de largeur) ou bien sur les plateaux et les flancs de vallée à pente modérée.

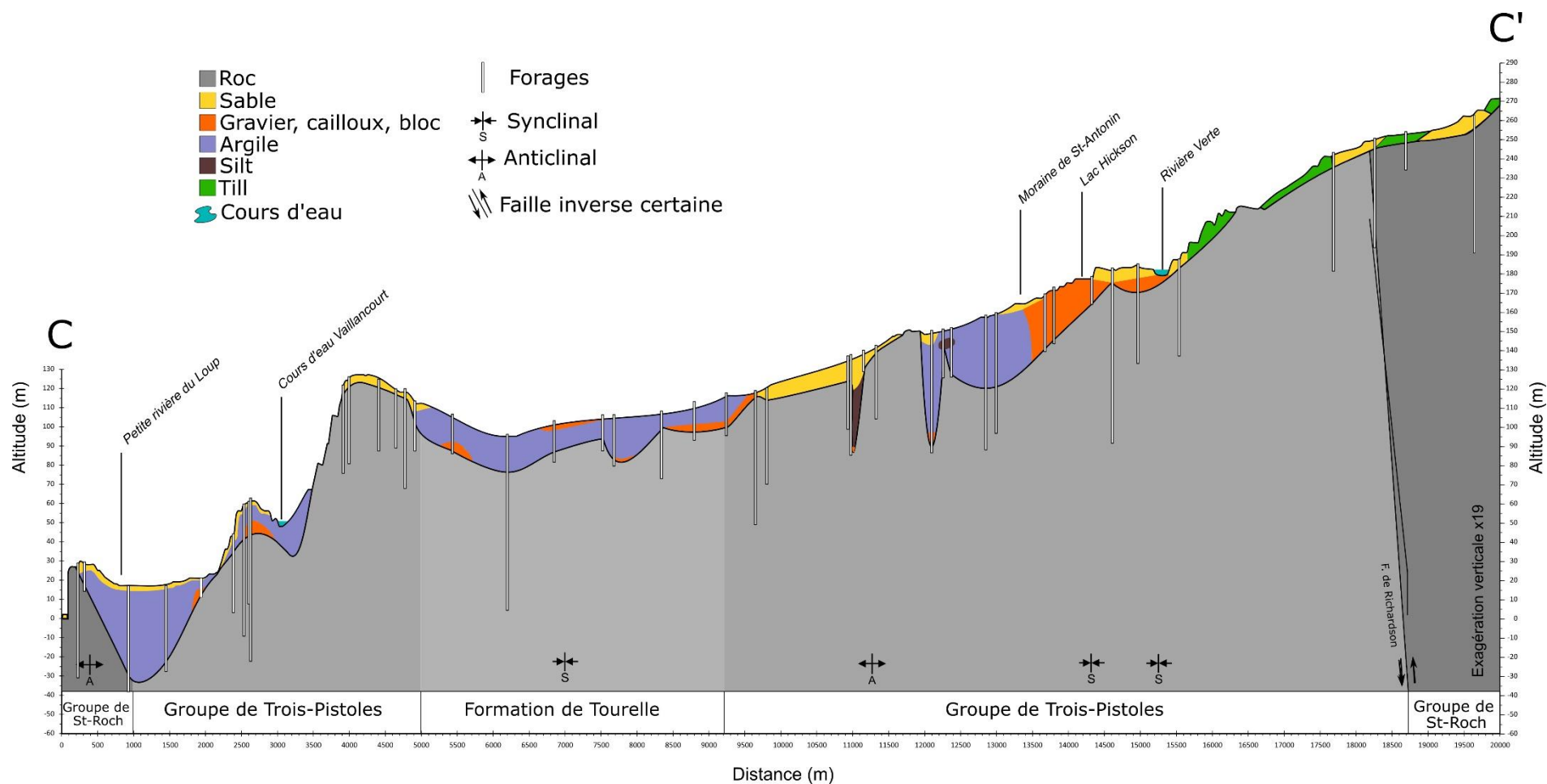
Les dépôts argileux dominent la plaine côtière (sous l'altitude marine maximale de 163 m) et tapissent le fond des sillons appalachiens principalement dans la basse plaine côtière à Saint-André-de-Kamouraska ainsi que dans les sillons bordés par de hautes crêtes rocheuses près de la côte. Ces argiles se sont également accumulées dans les sillons de plus hautes altitudes (> 80 m), comme par exemple dans les vallées du ruisseau Turgeon et de la rivière du Loup. Les données de forages montrent peu ou pas de dépôts granulaires sous les argiles marines. Mis à part dans la basse plaine côtière et dans la vallée de la rivière du Loup où l'argile affleure en surface, on retrouve généralement une unité sablonneuse littorale de faibles épaisseurs au sommet (< 6 m). On note également la présence de quelques dépôts sablonneux et graveleux ayant des épaisseurs significatives (10 à 25 m) qui pourrait être considérés comme des aquifères de surface, comme celui situé au SO de la vallée de la rivière du Loup. Ce dernier correspond à une plaine d'épandage fluvio-glaciaire comblant un étroit sillon appalachien à proximité d'un dépôt glaciomarin d'origine deltaïque situé à la limite marine maximale. Au-dessus de cette limite, le roc est essentiellement recouvert de dépôts de tills (mince et épais).



Coupe C : Rivière-du-Loup / Saint-Antonin

Localisée dans la MRC de Rivière-du-Loup, la coupe C-C' a été réalisée afin de documenter la variabilité des dépôts meubles allant de la côte vers l'intérieur des terres tout en recoupant la moraine de St-Antonin. Perpendiculaire à l'orientation du relief plissé, cette coupe de 20 km, orientée NO-SE, documente les données sur la nature et l'épaisseur des sédiments pour 44 forages au roc. Ces dépôts meubles recouvrent trois formations géologiques soit le Groupe de St-Roch, le Groupe de Trois-Pistoles, et la formation de Tourelle. Les principaux centres des plis appalachiens (anticlinaux et synclinaux) en surface sont situés dans les roches du Groupe de Trois-Pistoles. Le contact géologique entre la formation de Trois-Pistoles et du Groupe de St-Roch, à 18 km sur la coupe, correspond à la localisation de la faille régionale inverse Richardson. Concernant la structure du relief, on remarque seulement quelques affleurements rocheux en surface montrant ainsi une couverture sédimentaire significative sur toute la coupe.

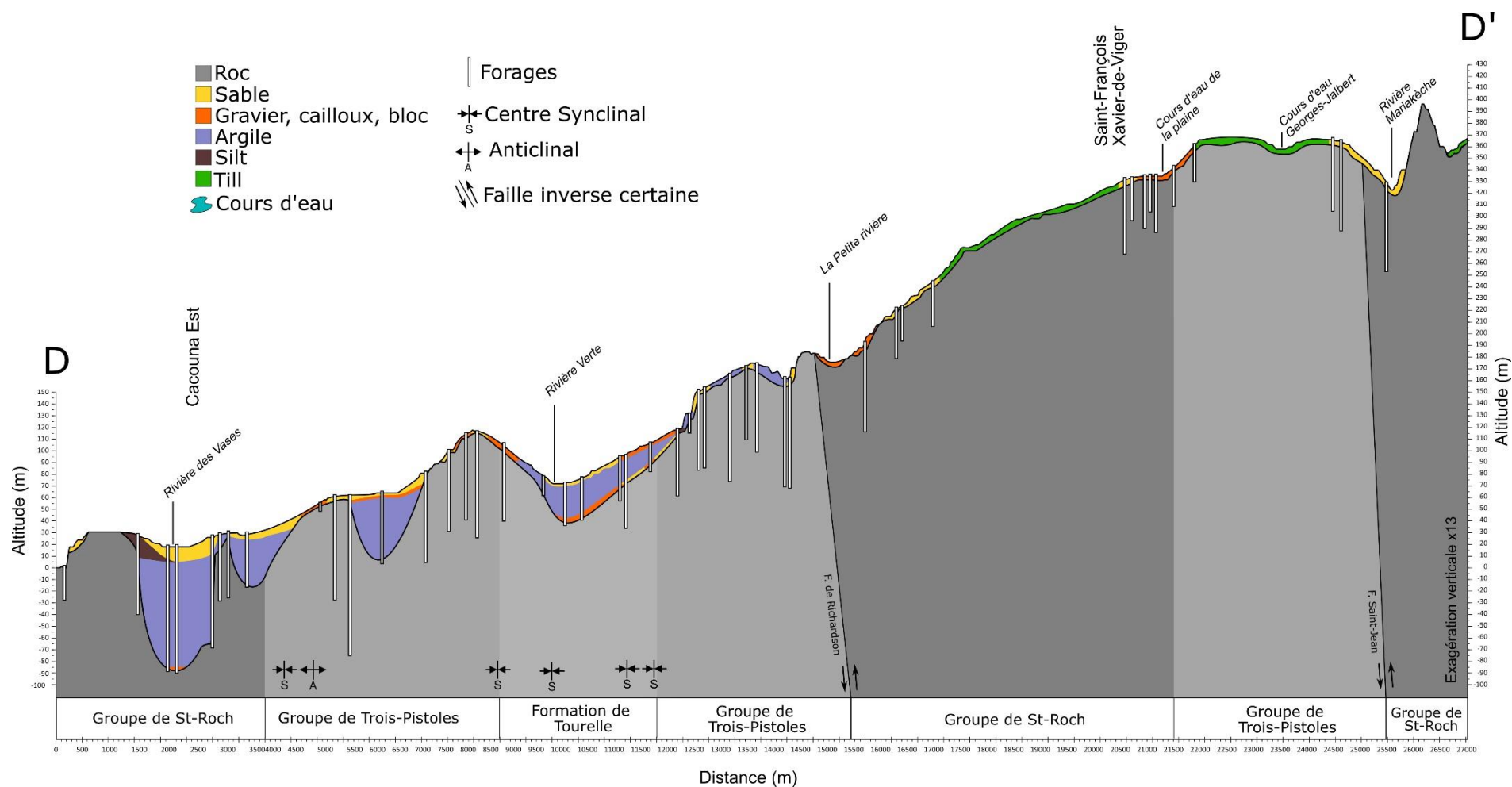
La couverture sédimentaire argileuse d'origine marine constitue le type de dépôt dominant pour les altitudes inférieures à environ 163 m, altitude de la limite marine maximale et plus spécifiquement à l'altitude du paléodelta de St-Modeste. Variant de 10 à 60 m d'épaisseur, ces dépôts d'argile peuvent soit affleurer en surface ou bien être recouverts d'une mince couche sablonneuse d'origine littorale (<2 m d'épais) ou de dépôts organiques tourbeux (<3 m d'épais) notamment entre 7 et 9 km sur la coupe. Il est observé sporadiquement que ces argiles (aquitarde) surmontent des sédiments graveleux (aquifère) parfois d'une épaisseur significative (10 à 20 m). Dans cette situation, cela correspondrait à la présence d'aquifères confinés. À la limite marine maximale (163 m), on retrouve la moraine de Saint-Antonin qui constitue une accumulation sédimentaire majeure dans la région. Ce corps sédimentaire se localise entre 160 et 180 m d'altitude et se caractérise par un important dépôt argileux (aquitarde) au SO duquel on retrouve une accumulation de sables et graviers (aquifère) pouvant avoir plus de 20 m d'épais. Ces dépôts se sont accumulés contre une crête rocheuse. Cette configuration stratigraphique rehausse l'importance de cet aquifère dans ce secteur. Finalement, sur les hauts plateaux situés au-dessus de la limite marine maximale, on retrouve essentiellement des dépôts de till épais (<3 m) et localement quelques dépôts fluvioglaciers de contact glaciaire.



Coupe D : Cacouna-Est / Rivière Verte / Saint-François-Xavier-de-Viger

La coupe stratigraphique D-D' a été réalisée dans la portion est de la MRC de Rivière-du-Loup et plus précisément de Cacouna-Est à Saint-François-Xavier-de-Viger en passant perpendiculairement à l'orientation de la vallée de la rivière Verte. Orienté NO-SE, cette coupe d'une longueur de 27 km documente la nature et l'épaisseur des sédiments ayant été caractérisé lors de 46 forages au roc à proximité du tracé. Similaire aux coupes A, B et C, les formations géologiques retrouvées sont celles du Groupe de Trois-Pistoles (mudrock, grès, conglomérat, arénite quartzitique et calcaire), de la Formation de Tourelle (grès, wacke, mudrock et calcaire) et du Groupe de St-Rock (mudrock, ardoise verte et rouge, grès et calcaire). Deux failles régionales inverses, soit Richardson et Saint-Jean, sont retrouvées au lieu de contact entre le Groupe de Trois-Pistoles et le Groupe de St-Rock. En ce qui concerne le centre des principaux plis appalachiens en surface (anticlinaux et synclinaux), ils se situent essentiellement au NO de la faille Richardson.

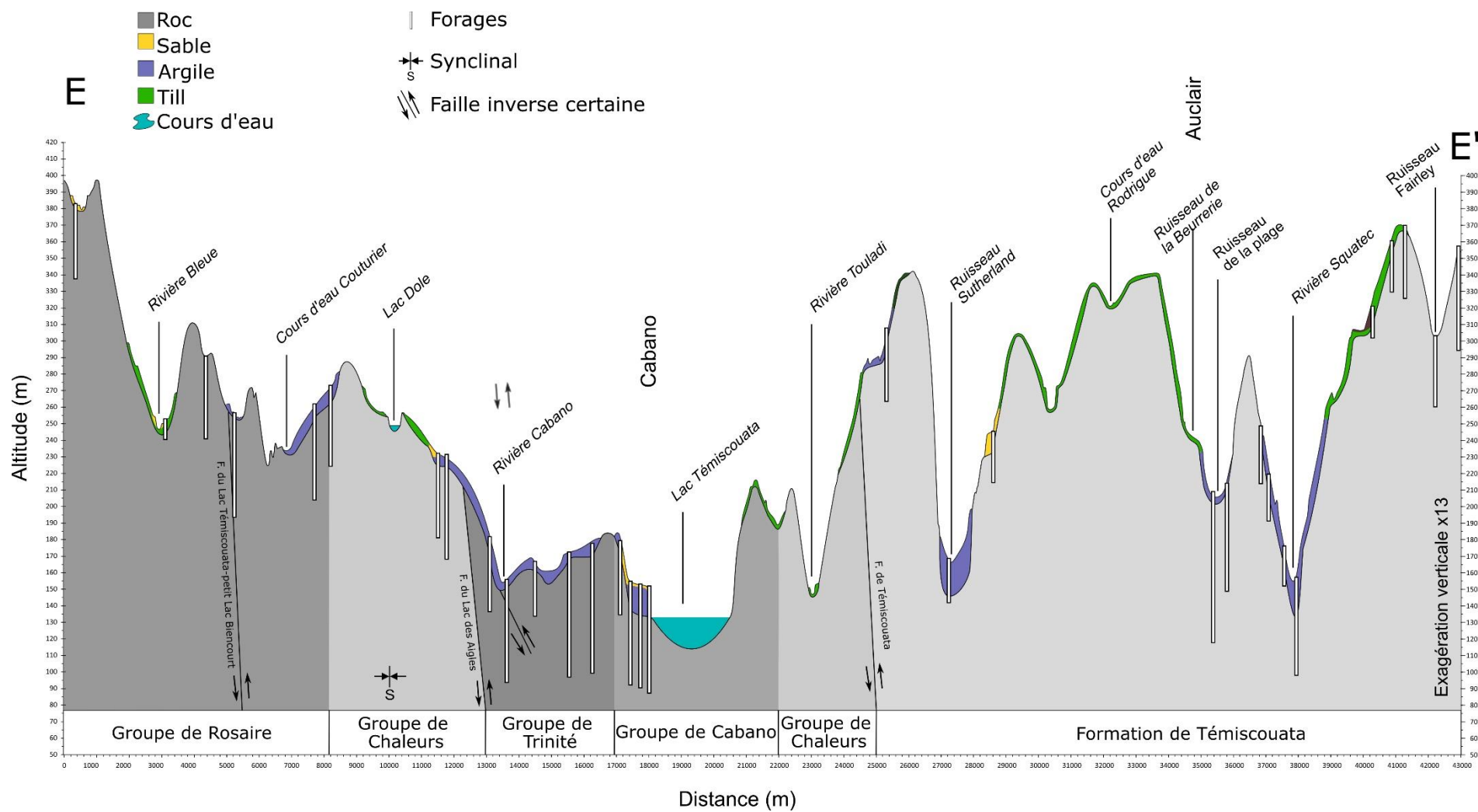
Il est observé que l'accumulation des dépôts meubles se concentre majoritairement dans de larges sillons appalachiens situés sous la limite marine maximale estimée à 163 m. Ces sillons sont principalement comblés de dépôts argileux d'origine marine pouvant atteindre des épaisseurs très importantes comme par exemple dans la vallée de la rivière des Vases où les épaisseurs atteignent près de 95 m. De manière générale, ces argiles sont recouvertes de dépôts sablonneux ou graveleux de faible épaisseur (<5 m). En outre, les données des forages révèlent la présence de dépôts <5 m d'épais composés de sables et graviers sous les argiles (aquitard). Cette même séquence est observée dans la plaine argileuse de la rivière des Vases, mais très localisée et où les épaisseurs des sables et graviers ne dépassent pas 2 m. Il est à noter que les dépôts argileux retrouvés au-dessus de la limite maximale et recouvrant un relief positif entre 13 et 14 km, sont difficilement interprétables et discutables. Au-dessus de la limite marine, on retrouve des dépôts de plus faibles épaisseurs reposant sur le roc, plus précisément des tills (mince et épais).



Coupe E : Rivières Bleue et Cabano / Lac Témiscouata / Rivières Touladi, Sutherland et Squatec

La coupe stratigraphique E-E' a été réalisée dans la MRC du Témiscouata sur une distance de 43 km. L'orientation de cette coupe est du SO (E) vers le NE (E') et traverse de manière oblique les vallées des rivières Bleue et Cabano, le lac Témiscouata ainsi que les vallées des rivières Touladi, Sutherland et Squatec. Le choix de l'orientation de cette coupe est basé sur l'optimisation de la couverture du territoire par les données de forage du roc et de l'intérêt qu'on ces vallées pour la documentation de la stratigraphie des dépôts meubles sur le territoire. Ainsi, la représentation de l'épaisseur et la nature des sédiments caractérisant les dépôts meubles proviennent des données de 33 forages au roc. On retrouve cinq formations géologiques le long de la coupe : le Groupe de Rosaire, le Groupe de Chaleurs, le Groupe de Trinité, le Groupe de Cabano et la Formation de Témiscouata. On y dénombre également quatre failles inverses dont celles du Lac Témiscouata-Petit Lac Biencourt, du Lac-des-Aigles et de Témiscouata.

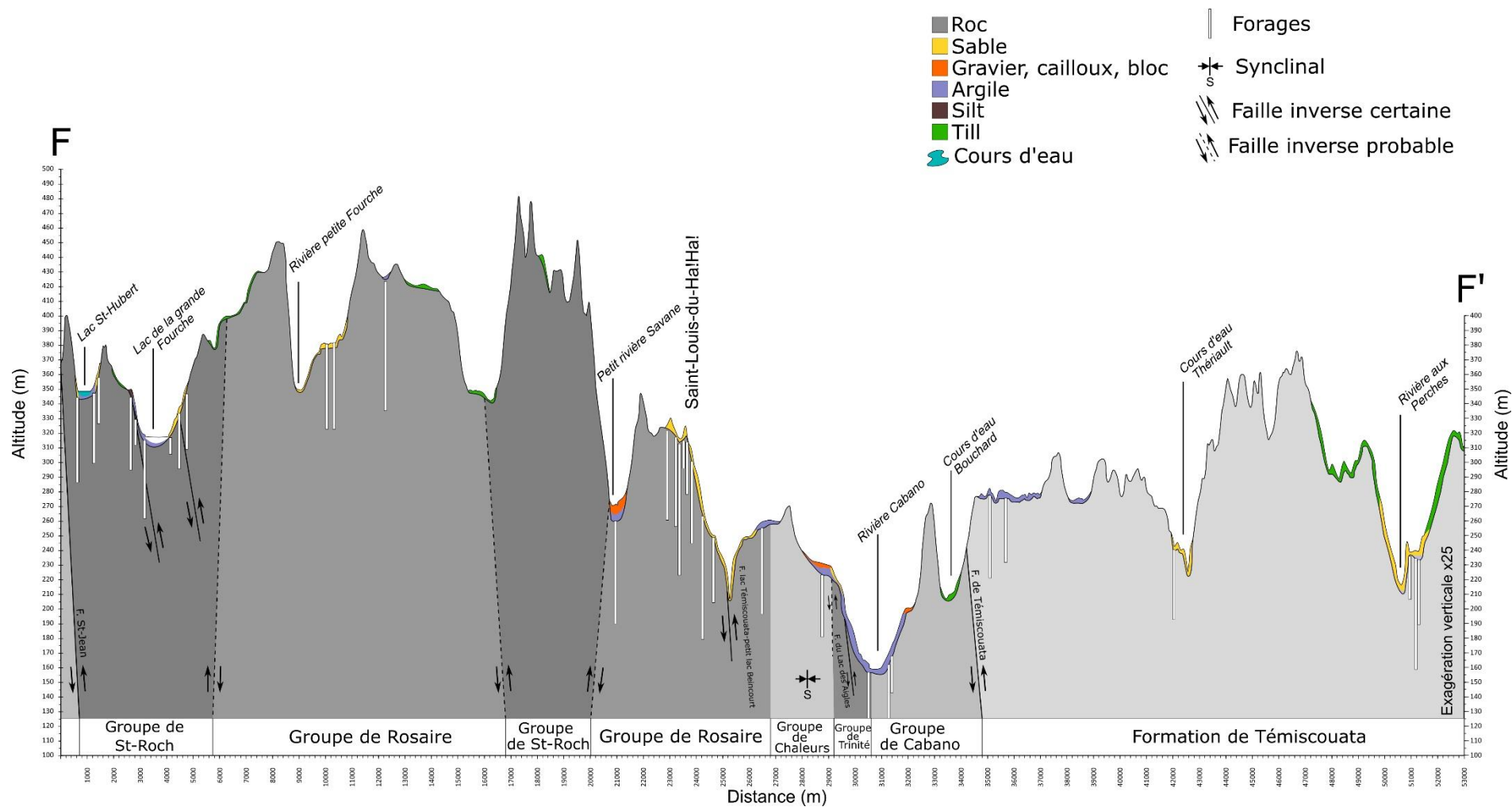
L'accumulation des dépôts meubles s'est principalement réalisée sur les flancs et le fond des principales vallées et sur les hauts plateaux et collines arrondis. Il est d'abord remarqué dans les principales vallées (Cabano, Témiscouata, Sutherland et Squatec) que les dépôts meubles se caractérisent par des sédiments argileux d'origine glaciolacustre (aquitard). Les épaisseurs de ces argiles peuvent varier d'une vallée à une autre, mais de manière générale, elles dépassent que très rarement 20 m (flanc ouest de la vallée du lac Témiscouata et vallée du ruisseau Sutherland). Considérant que l'altitude documentée des plus hautes terrasses sablonneuses d'origine lacustres du lac glaciaire Madawaska est d'environ 185 m dans ce secteur, les argiles retrouvées à des altitudes plus élevées dans les vallées ayant été submergées par ce lac (rivières Cabano et Squatec), sont surprenantes. De plus, aucun dépôt granulaire (aquifère) n'a été caractérisé sous ces argiles glaciolacustres. Les autres dépôts retrouvés sont essentiellement composés de sables et graviers associés à des tills (épais et mince) reposant directement sur le roc.



Coupe F : Lacs Saint-Hubert et Grande-Fourche / Saint-Louis-du-Ha! Ha! / Notre-Dame-du-Lac et Dégelis

D'une longueur de 53 km, la coupe stratigraphique F-F' constitue la continuité de la coupe D-D' (Cacouna-Est /rivière Verte/ Saint-François-Xavier-de-Viger) dans les hautes terres appalachiennes. Conservant une orientation NE-SO, cette coupe présente la répartition stratigraphique des dépôts meubles issue des données de 32 forages au roc. On retrouve six formations géologiques, dont celles du Groupe de St-Rock, le Groupe de Rosaire, le Groupe de Chaleurs, le Groupe de Trinité, le Groupe de Cabano et la Formation de Témiscouata. Plusieurs failles inverses sont répertoriées le long de la coupe dont notamment celles de St-Jean, du Lac Témiscouata-Petit Lac Biencourt, du Lac des Aigles et de Témiscouata.

La répartition des dépôts meubles montre que les épaisseurs sont peu importantes et que la nature des sédiments est variable spatialement. D'abord, on retrouve des dépôts d'argile de faible épaisseur (<8 m) surtout au fond des vallées des rivières Savane et Cabano ainsi qu'au sommet des plateaux situés de part et d'autre de la vallée de la rivière Cabano. Ensuite, certaines accumulations superficielles de dépôts sablonneux et graveleux sont observées sur les flancs et le fond de certaines vallées, comme par exemple les dépôts fluvioglaciaires de plaine d'épandage peu épais (<3 m) dans les vallées de la rivière Petite Fourche et aux Perches ou bien dans le secteur de Saint-Louis-du-Ha! Ha! Mis à part ces quelques dépôts, on constate que ce sont les dépôts de till (mince et épais) et le substrat rocheux affleurant qui sont le plus fréquemment observés et qui caractérisent de manière générale le contexte stratigraphique des hautes terres appalachiennes.



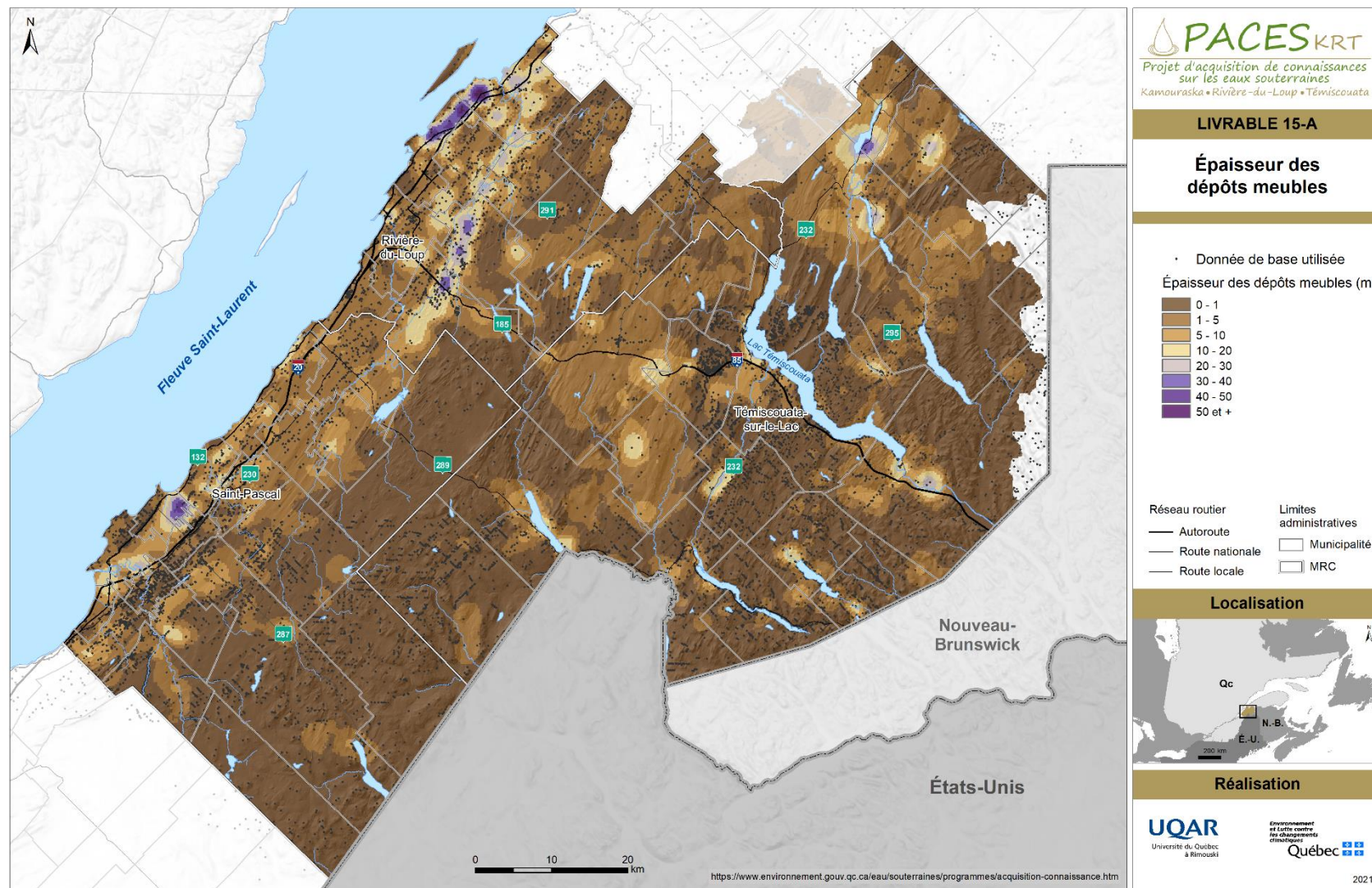
4.4. Épaisseur des dépôts meubles

L'épaisseur et la nature des dépôts meubles recouvrant le roc influenceront l'hydrogéologie à l'échelle régionale. Lorsque les dépôts meubles sont grossiers (sable et gravier) et que leurs épaisseurs sont suffisamment importantes et continues dans l'espace, ils peuvent potentiellement devenir des aquifères exploitables. À l'inverse, si les dépôts meubles sont fins (argile et limon), ils seront peu perméables et formeront une barrière à l'infiltration de l'eau (ou aquitard) qui limitera la recharge des aquifères. Le tableau 4.1 présente les correspondances entre les caractéristiques sédimentologiques et la perméabilité des dépôts meubles sur le territoire du KRT. À partir de ces connaissances, une carte isopaque (ou carte de l'épaisseur totale des dépôts meubles) a été préparée. Cette carte est une donnée essentielle à la connaissance des systèmes aquifères et des aquitards, car elle permet d'orienter rapidement les recherches en eau. Pour plus d'information sur la nature et la distribution de ces dépôts, la section 4.2.3 s'y attarde plus en profondeur.

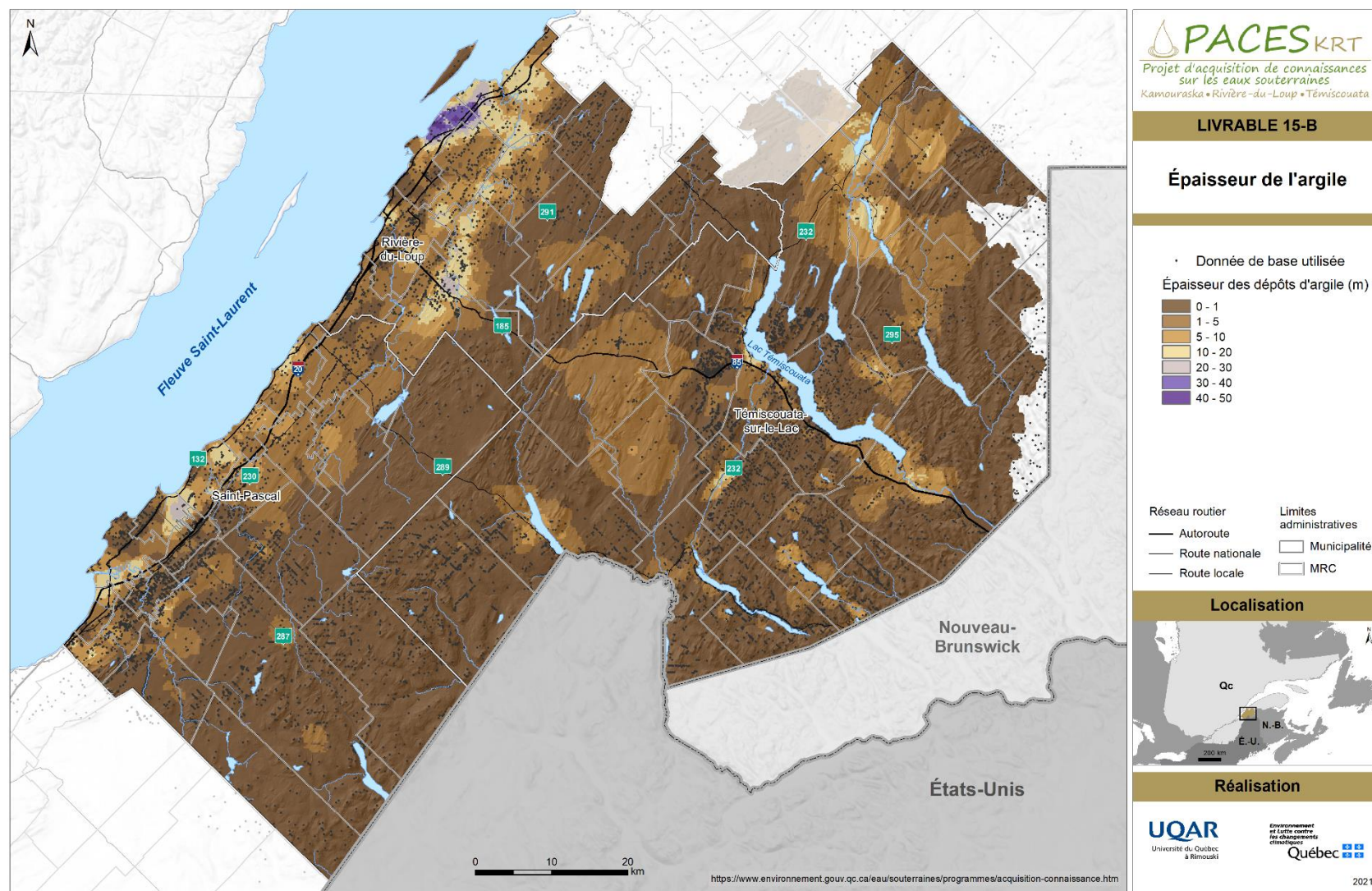
L'épaisseur totale de dépôts meubles a été estimée en interpolant les données compilées dans le projet, incluant les forages (rapports hydrogéologiques, MTQ, PACES, SIH), les affleurements rocheux compilés dans la couverture de l'IRDA, ainsi qu'en utilisant les données de la carte du Quaternaire (Veillette *et al.* 2017) pour les secteurs des hauts plateaux où l'on ne retrouve quasiment pas de données de forages, mais où nous savons que les épaisseurs de dépôts sont faibles. Les épaisseurs des différentes unités hydrostratigraphiques ont été additionnées et les épaisseurs totales ont été directement interpolées par krigeage ordinaire (livrable 15a). Comme vu précédemment, les dépôts quaternaires du territoire sont dominés par les argiles d'eau profonde de la mer de Goldthwait, mais aussi d'argile glacio-lacustre du paléolac Madawaska. Le livrable 15b montre la répartition de l'épaisseur d'argile sur le territoire.

Tableau 4.1-Correspondance entre les caractéristiques sédimentologiques des dépôts meubles et leur perméabilité sur le territoire du KRT (adapté de Veillette et al., 2017)

Environnement postglaciaire	Dépôts organiques	O	tourbe, débris végétaux de 0,5 à 5m d'épaisseur	Imperméable
	Colluvions	C	fragments rocheux, graviers, sable et silt de 1 à 10 m ou plus d'épaisseur	Perméable
	Alluvions	Ap	sable, gravier, silt et blocs de 1 à quelques dizaines de m d'épaisseur	Perméable
Dépôts marins actuels	Sédiments de plages	Mr	sable, graviers et blocs de 1 à 5 m ou plus d'épaisseur	Perméable
	Sédiments de la zone intertidale	Mi	silt, sable, débris organiques de 1 à 5 m d'épaisseur	Perméable
Dépôts marins anciens	Sédiments littoraux	Mn	sable, gravier et blocs de 1 à 10 m d'épaisseur	Perméable
	Sédiments d'eau profonde	Mo	silt et silt argileux avec des lits sablonneux de 1 à 10 m d'épaisseur	Imperméable
	Sédiments deltaïques	GMd	sable, gravier, silt et blocs de 1 à 30 m d'épaisseur	Perméable
	Sédiments glaciomarins	GMn	diamicton silto-argileux, argiles rougeâtres ou grises caillouteuses	Imperméable
Dépôts glaciolacustres	Sédiments deltaïques	GLd	sable, silt, gravier de 1 à 5 m ou plus d'épaisseur	Perméable
	Sédiments d'eau profonde	Glo	rythmites de silt et argiles de 1 à 3 m d'épaisseur	Imperméable
Dépôts fluvioglaciaires	Sédiments de plaine d'épandage	Gfp	sable et gravier de 1 à 30 m d'épaisseur	Perméable
	Sédiments de contact glaciaire	Gfc	gravier, sable, blocs de 1 à 25 m d'épaisseur	Perméable
Dépôts glaciaires	Till en couverture discontinue	Tv	gravier, galet, quelques blocs dans une matrice sablo-silteuse <0,5 m d'épaisseur	Semi-perméable
	Till en couverture généralement continue	Tb	gravier, galet, quelques blocs dans une matrice sablo-silteuse >1 m d'épaisseur	Imperméable
Quaternaire et pré-quaternaire	Régolite	Wv / Wb	fragments rocheux anguleux et altérites d'épaisseur moyenne de <1m pouvant être à 2m par endroits	Imperméable / perméable
	Roche en place d'origine indifférenciée	R	Roc à nu ou couverture sédimentaire mince (<0,5 m)	Imperméable / perméable



LIVRABLE 15A

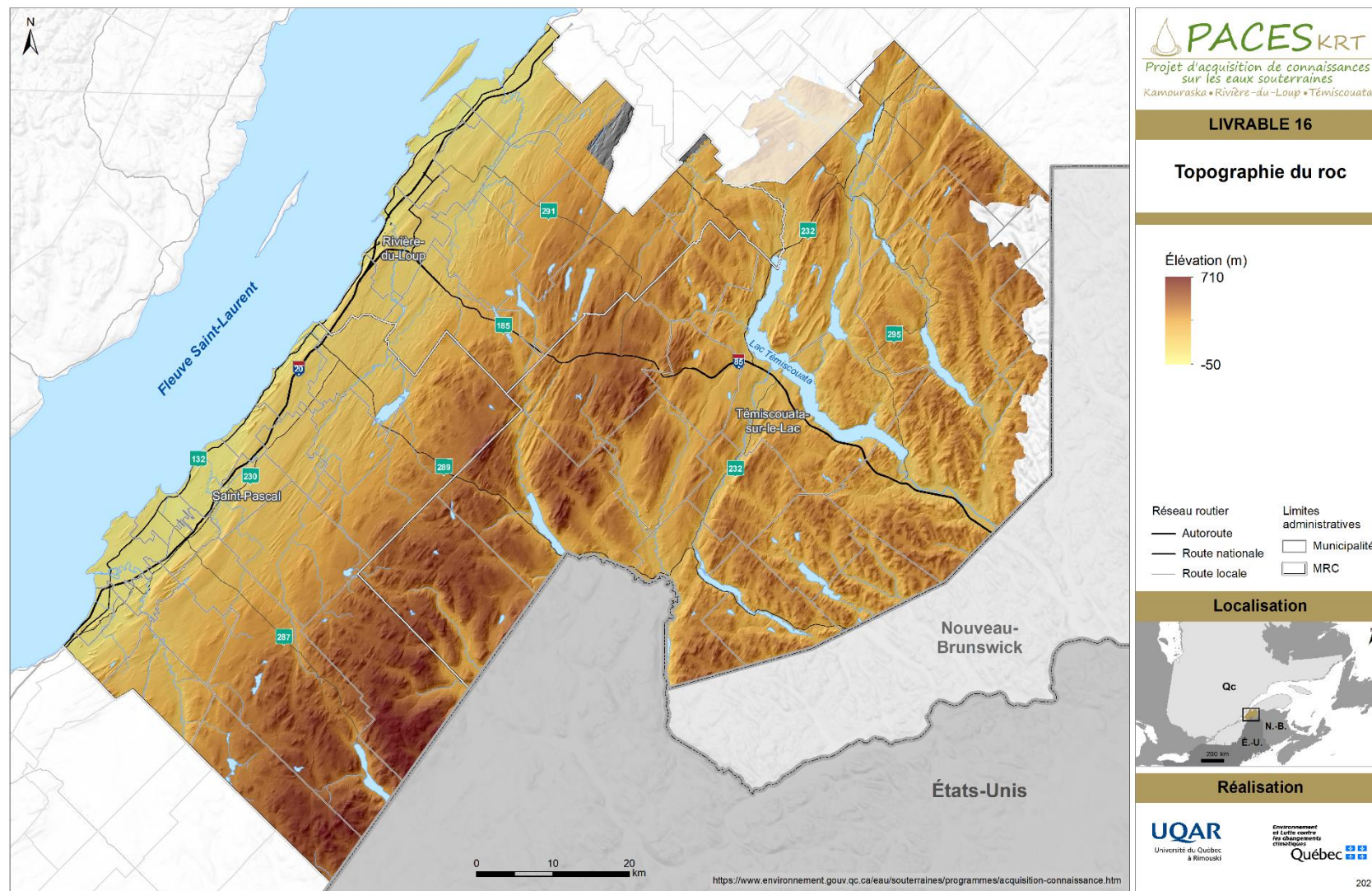


LIVRABLE 15B

4.5. Topographie du roc

Le livrable Topographie du roc (livrable 16) représente une estimation de l'altitude de la surface du socle rocheux sous les dépôts meubles. La précision de l'estimation de la topographie du roc dépend principalement de la quantité et de la répartition des données de forage et d'affleurement rocheux. Une carte de la profondeur du roc est un outil utile afin de repérer d'éventuelles vallées enfouies pouvant contenir de potentiels aquifères granulaires.

La topographie du roc a été estimée en jumelant deux méthodes. Dans le contexte hydrogéologique de la plaine côtière, secteur où l'on retrouve les plus importantes épaisseurs de dépôts, l'élévation du socle rocheux a directement été interpolée en soustrayant l'épaisseur des dépôts de l'élévation du sol. Ainsi, la morphologie du socle rocheux devient indépendante de la morphologie de surface qui peut avoir été modelée par divers processus récents. Pour ce qui est des hauts plateaux, secteur 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 pour mieux refléter les crêtes et sillons où les dépôts meubles sont de faibles épaisseurs.



LIVRABLE 16

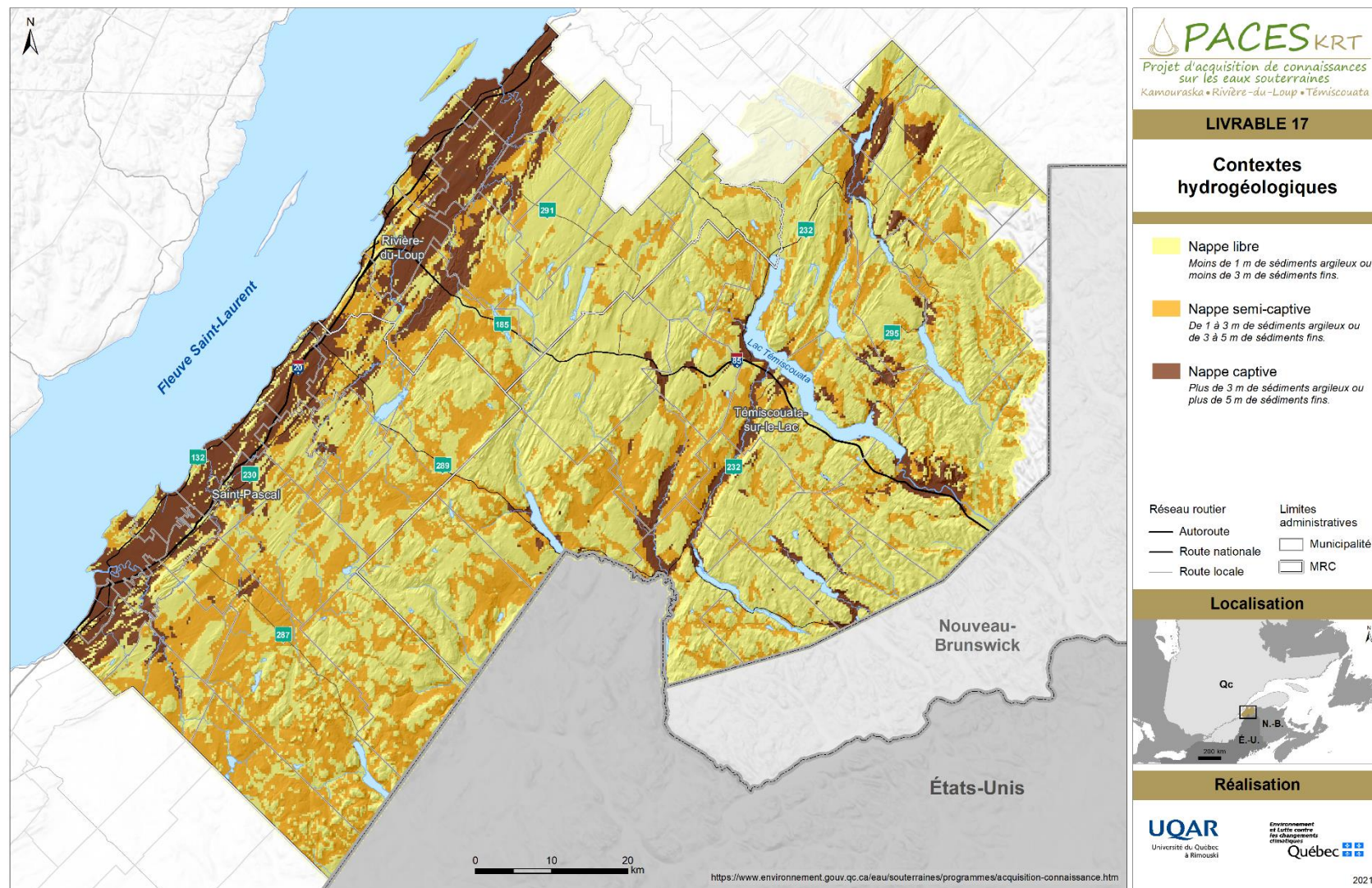
4.6. Conditions de confinement

Le confinement d'un aquifère est déterminé par son recouvrement par une strate de matériaux peu perméables (aquitard) isolant de la surface l'eau souterraine qu'il contient. La granulométrie et l'épaisseur des strates de dépôts meubles déterminent le niveau de confinement des aquifères (tableau 4.1). On retrouve donc des aquifères non confinés (nappe libre), semi-confinés (nappe semi-captive) et confinés (nappe captive). Les dépôts meubles fins composés de limon (silt) et d'argile agissent comme des matériaux confinant. Les dépôts marins d'eaux profondes et le till (dépôt glaciaire) sont aussi des types de dépôts susceptibles de confiner partiellement ou complètement des aquifères selon l'épaisseur des strates. En l'absence de dépôts meubles, ou lorsque ceux-ci sont perméables, les aquifères seront non confinés (nappe libre). 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 et sa qualité.

Les conditions de confinement ont été établies pour l'aquifère rocheux régional selon les épaisseurs des strates de dépôts meubles peu perméables, tels que le till et l'argile au-dessus du roc (livrable 17). Les conditions de confinement ont été définies en utilisant des critères d'épaisseurs pour l'argile et le till (tableau 4.2). Les épaisseurs de ces unités de faible perméabilité ont été directement interpolées (voir section méthodologie du livrable contextes hydrostratigraphiques). La carte des dépôts meubles et des affleurements rocheux a aussi été utilisée pour combler les zones où il n'y avait aucun forage.

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 till.
Nappe semi-captive	De 1 à 3 m de sédiments argileux ou de 3 à 5 m de till.
Nappe libre	Moins de 1 m de sédiments argileux ou moins de 3 m de till.



LIVRABLE 17

4.7. Épaisseurs et limite des aquifères régionaux et contextes hydrostratigraphiques

4.7.1. Épaisseurs et limite des aquifères régionaux

Comme souligné dans les sections 4.3 et 4.4, les épaisseurs de dépôts de surface à potentiel aquifère sont rares sur le territoire à l'étude. La présence d'argile domine la plaine côtière coiffée, parfois, d'une faible épaisseur de sable (<3 m). Peu de forages dans la région ont été faits dans les dépôts de surface, nous empêchant de délimiter ceux-ci avec exactitude. Notons cependant que les données accumulées montrent des épaisseurs non négligeables de dépôt granulaires dans les vallées de certaines rivières. Dans la MRC de Kamouraska, entre 5 et 10 m d'épaisseur dans les vallées des rivières Kamouraska et Saint-Denis pourraient présenter un potentiel aquifère. La portion sud-ouest de la vallée de la rivière du Loup, présente des épaisseurs de dépôts se situant entre 10 et 15 m. On ne retrouve pas ou peu de dépôt granulaire dans le Témiscouata, généralement mélangé à du till mince ou des argiles glacio-lacustre.

Seule la moraine de Saint-Antonin est connue comme étant un aquifère de surface productif. En effet, la ville de Rivière-du-Loup alimente sa municipalité à partir de drains horizontaux installée dans la portion de la moraine située dans la municipalité de Saint-Modeste. Par contre, cet aquifère partage un fort lien hydraulique avec la rivière Verte, ce qui explique que l'approvisionnement en eau de la ville de Rivière-du-Loup est considéré comme étant de surface. Étant donné ce lien, la capacité du réservoir est fortement dépendante du débit de la rivière.

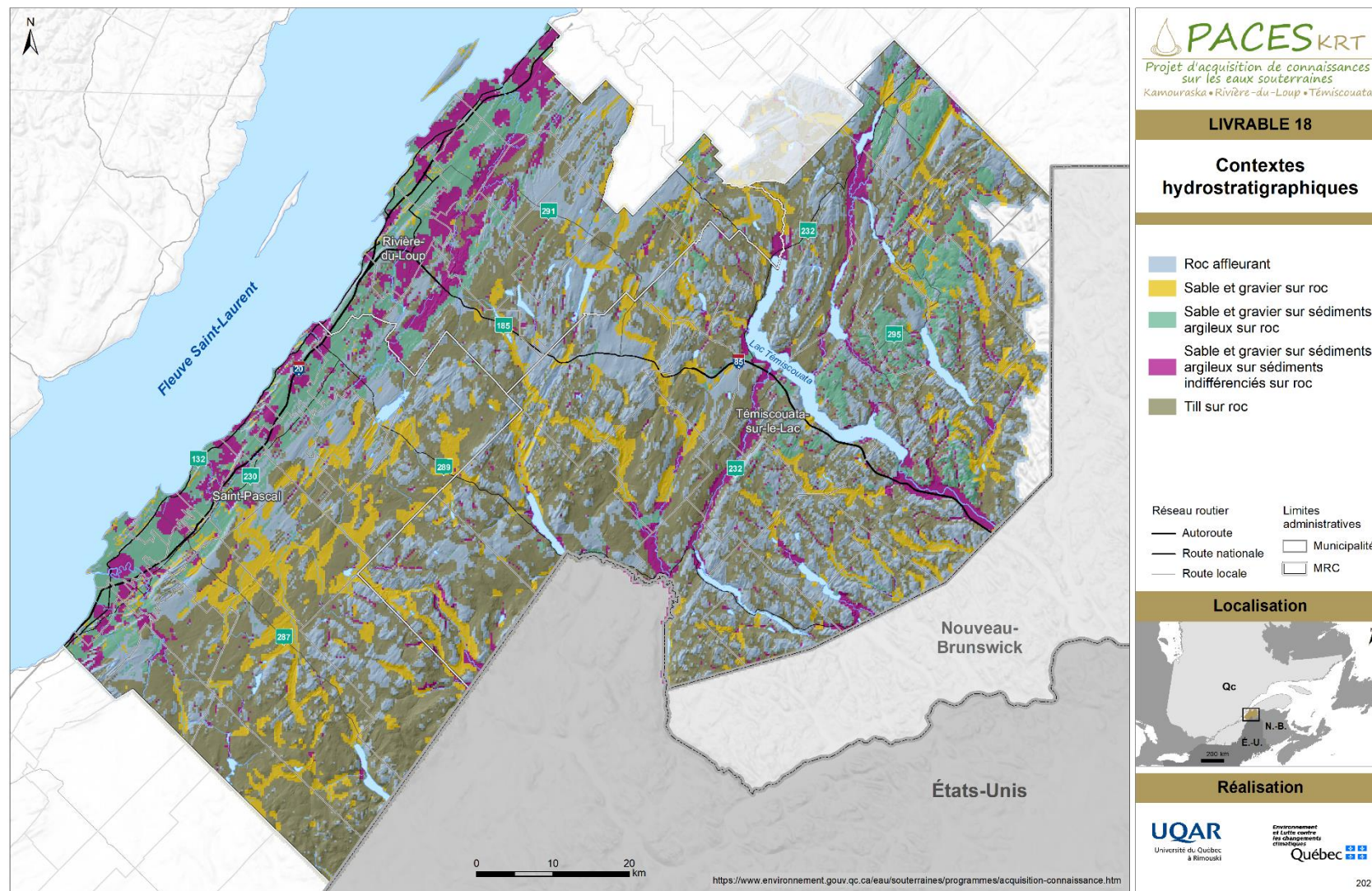
4.7.2. Contextes hydrostratigraphiques

Les contextes hydrostratigraphiques se définissent sur la base de la séquence verticale de matériaux meubles recouvrant l'aquifère rocheux en un site donné. Ils sont donc la représentation planimétrique des séquences typiques d'unités hydrostratigraphiques que l'on retrouve sur le territoire du PACES-KRT.

En raison de la production du livrable à l'échelle de la zone d'étude, une simplification des séquences stratigraphiques retrouvées dans les journaux de forage a dû être faite afin de retrouver une certaine uniformité pour une meilleure représentation et une meilleure

compréhension de l'hydrogéologie régionale. Les sédiments ont donc été regroupés et simplifiés en cinq grandes unités hydrostratigraphiques en fonction de leur perméabilité (potentiel hydrogéologique), de la dominance du matériel et de leur épaisseur. Les cinq grandes unités sont : le sable et gravier de surface, les sédiments argileux, les sédiments indifférenciés, le till et le roc (livrable 18). Les sédiments indifférenciés sous l'argile représentent tout sédiment s'apparentant à des dépôts fluvioglaciaires ou glaciaires recouvrant le roc (aussi appelés diamictons). Étant donné les faibles épaisseurs et le niveau de confiance de la majorité des données (notamment celles extraites du SIH), il était impossible de différencier avec exactitude les sédiments fluvioglaciaires potentiels des sédiments glaciaires. Il a donc été choisi de les regrouper. Cette simplification permet également d'obtenir une unité de sédiments indifférenciés généralement continue. Notons que la distinction de l'unité de « Till » présente sur la carte du livrable 18 s'explique par le fait que sur le territoire des hauts plateaux, il n'y a pas de données de forage sur de vastes étendues. Par conséquent, la carte des dépôts meubles de Veillette *et al.* (2015) où on retrouvait ce type de dépôts et une description des épaisseurs a été utilisée pour pallier le manque d'informations stratigraphiques.

Pour parvenir à produire le livrable contextes hydrostratigraphiques, les épaisseurs des unités hydrostratigraphiques ont été interpolées par krigeage ordinaire. Par la suite, pour parvenir à créer une matrice du territoire où chaque pixel représente une stratigraphie, la présence ou l'absence de chacune des unités ont été extraits à chacun des pixels d'une matrice aux 250 m x 250 m du territoire. Le livrable 18 est donc la représentation planimétrique de la stratigraphie du territoire sans tenir compte de l'épaisseur de chacune des couches hydrostratigraphiques, mais seulement leur séquence de superposition verticale.



LIVRABLE 18

5. Conditions hydrogéologiques

5.1. Propriétés hydrauliques

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

- 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).

La conductivité hydraulique et la transmissivité sont estimées par les essais hydrauliques, à partir de l'analyse du rabattement en fonction du temps induit dans des puits d'observation par pompage à débit constant Q (m³/s). Enfin, la capacité spécifique ($CS = Q/s$; m²/s) est une propriété caractérisant l'efficacité d'un puits de pompage qui permet une estimation indirecte et approximative de T . Puisque les données de CS sont beaucoup plus courantes que celles sur T ou K , la capacité spécifique est fréquemment utilisée pour l'estimation de T , puis K (Mace, 2001).

Les approvisionnements municipaux, qu'ils proviennent d'un aquifère au roc ou granulaire, doivent être caractérisés lors de la mise en place des ouvrages de captage. Des valeurs de transmissivité (T), de conductivité hydraulique (K), de capacité spécifique (CS) et d'emménagement (S) ont été extraites des rapports hydrogéologiques des municipalités et comparées à des mesures sur le terrain (voir section 3.2.2). 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. Cependant, moins d'une dizaine de valeurs ayant été compilées pour les coefficients d'emménagement et les capacités spécifiques, ces valeurs n'y sont pas présentées. De plus, deux forages ont été retirés des statistiques étant donné les valeurs aberrantes de transmissivité mentionnées dans les

rapports. Indépendamment du type d'aquifère ou de confinement, la différence entre le minimum et le maximum de conductivité hydraulique pour chaque catégorie varie de deux à trois ordres de grandeur. Seul l'aquifère granulaire à nappe semi-confinée fait exception avec son écart-type plus faible.

Les essais de pompages sur les puits au roc ainsi que dans les sondages stratigraphiques forés pour le projet (figure 3.2) ont permis de calculer la transmissivité et la conductivité hydraulique des aquifères rocheux et granulaires selon la méthode Cooper-Jacob en remontée. Ces résultats sont présentés dans le tableau 5.2. Comme pour les données des forages municipaux, les valeurs diffèrent d'une à deux ordre de grandeur indépendamment du type d'aquifère ou de confinement. La disparité est pourtant moins importante, sans doute expliqué par le temps de pompage et les conditions des tests hydraulique similaire d'un forage à l'autre.

Tableau 5.1-Mesures de tendance centrale et de dispersion des paramètres de transmissivité (T) et de conductivité hydraulique (K) provenant de la compilation des études hydrogéologiques locales du territoire du KRT.

Aquifère Nappe	Roc Fracturé				Granulaire					
	Captive		Libre		Captive		Semi-captive		Libre	
	$T (m^2/s)$	$K (cm/s)$	$T (m^2/s)$	$K (cm/s)$	$T (m^2/s)$	$K (cm/s)$	$T (m^2/s)$	$K (cm/s)$	$T (m^2/s)$	$K (cm/s)$
Minimum	4,5E-05	1,0E-06	7,0E-06	2,5E-05	7,5E-05	5,3E-04	4,6E-04	2,4E-02	4,9E-05	6,0E-04
Maximum	6,3E-03	5,6E-03	5,8E-03	4,8E-02	8,1E-03	3,0E-02	3,7E-02	3,1E-01	3,5E-02	1,2E-01
Moyenne	1,1E-03	1,5E-03	1,7E-03	1,3E-02	1,9E-03	1,4E-02	1,4E-02	1,3E-01	2,3E-02	4,0E-02
Écart-type	2,3E-03	2,4E-03	2,3E-03	1,8E-02	2,0E-03	1,2E-02	1,6E-02	1,3E-01	1,0E-02	6,6E-02
Nb de donnée	7	8	12	12	13	10	5	4	10	3

Tableau 5.2-Résultats de transmissivité et de conductivité hydraulique des forages au roc et des sondages dans les dépôts meubles

Nom forages	Aquifère	K (m/s)	T(m ² /s)	Nappe
Joseph 01	Granulaire	9,9E-08	2,9E-07	Semi-captive
Germain 01	Granulaire	1,5E-07	2,3E-07	Captive
Denis 01	Granulaire	2,9E-07	8,7E-07	Captive
Bruno 01	Granulaire	7,2E-07	3,2E-06	Libre
Bruno 02	Granulaire	8,7E-07	2,6E-06	Libre
André 02	Granulaire	2,2E-05	3,4E-05	Captive
F-01	Roc	3,1E-08	4,7E-06	Libre
F-02	Roc	9,7E-08	9,7E-06	Libre
F-03	Roc	2,6E-07	2,7E-05	Captive
F-04	Roc	7,6E-07	7,6E-05	Semi-captive
F-05	Roc	6,5E-08	6,5E-06	Semi-captive

Le perméamètre de Guelph a été utilisé de façon parcimonieuse afin de valider les conductivités hydrauliques de certaines séquences stratigraphiques dans la plaine côtière du bassin versant de la Kamouraska. Ces données sont reportées dans le tableau 5.3. La conductivité dans les couches de sédiments contenant de l'argile est généralement plus faible que dans celles n'en contenant pas sauf dans G08 et G10 où elle est presque similaire. La variabilité de la conductivité est très grande d'un contexte à l'autre.

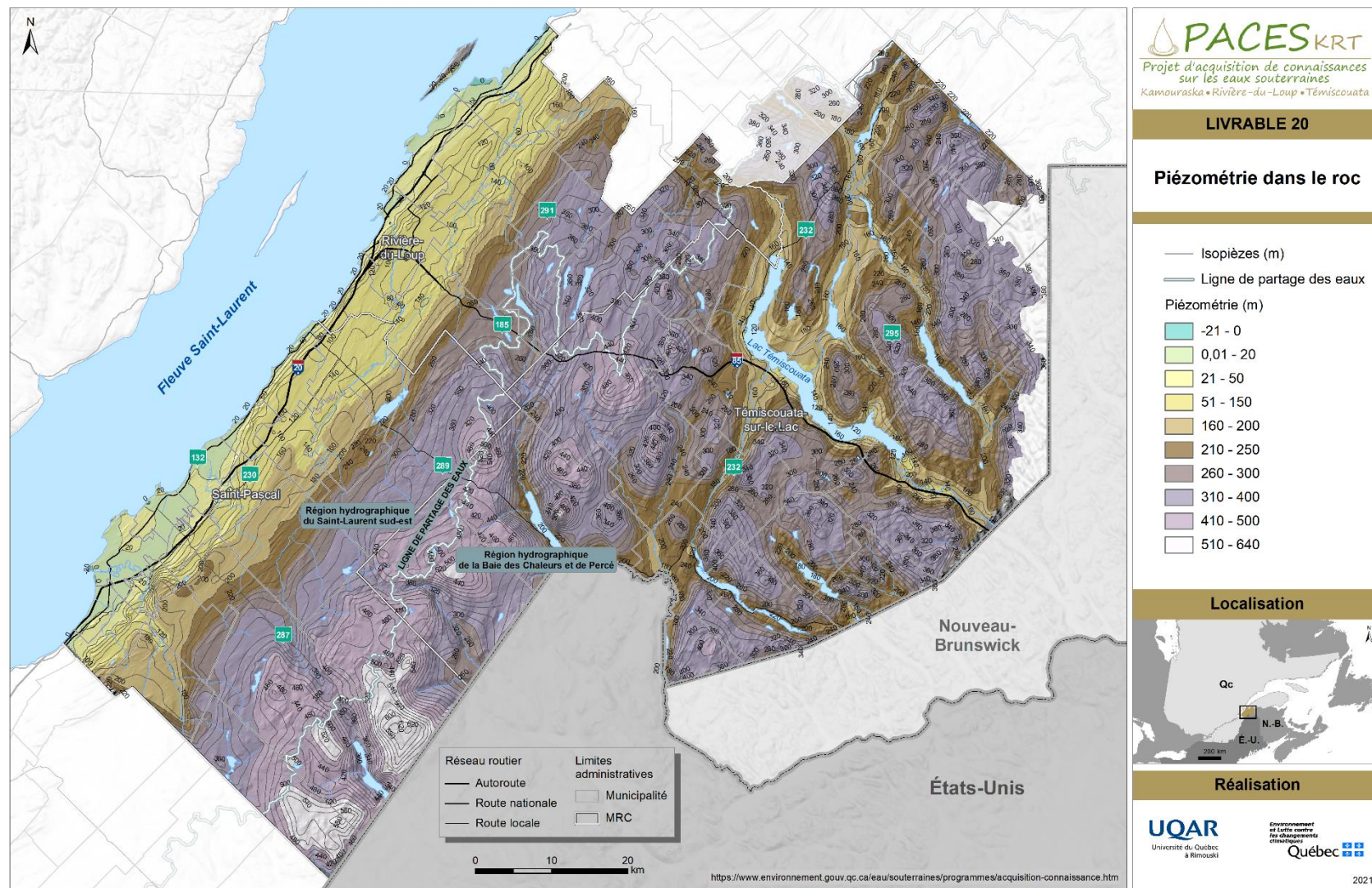
Tableau 5.3-Résumé des essais de conductivité hydraulique au perméamètre de Guelph et calculs de la conductivité moyenne (Kmean) selon deux méthodes de calcul. SHM : Single Head Method, DHM : Double Head Method

Contexte	Méthode	Kmean (m/s)
Sable et gravier/argile/roc	SHM	2,5E-09
Sable et gravier/argile/roc	SHM	3,7E-10
Sable et gravier/argile/roc	SHM	9,9E-09
Sable et gravier sur roc	SHM	7,6E-10
Sable et gravier sur roc	SHM	7,0E-10
Sable et gravier sur roc	DHM	2,6E-06
Sable et gravier sur roc	DHM	1,9E-06
Till sur roc	DHM	1,1E-07
Till sur roc	SHM	1,0E-08
Roc affleurant	DHM	2,0E-07
Roc affleurant	DHM	1,1E-07

5.2. Piézométrie, écoulements et suivi des niveaux d'eau

La piézométrie représente la hauteur de la nappe (aussi appelée 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 (livrable 20) donne une vue d'ensemble de la direction de l'écoulement de l'eau souterraine de l'aquifère rocheux régional. Étant donné le faible nombre de données de niveaux d'eau provenant des aquifères granulaires (n=99) et que ceux-ci sont spatialement discontinus, la piézométrie régionale des formations meubles n'a pas été produite. Le livrable se concentre sur la piézométrie des aquifères au roc.

Différentes sources d'information ont été utilisées pour le développement de la carte piézométrique. Ces différentes sources d'informations représentent les niveaux d'eau tels que rapportés dans le SIH, ceux des rapports hydrogéologiques compilés, les données récoltées sur le terrain lors de l'échantillonnage, ainsi que les données des quelques stations du réseau de suivi du MELCC. Cependant, une vaste zone des hauts plateaux, correspondant principalement aux TNO, comporte un nombre insuffisant de données pour effectuer une interpolation avec un niveau de confiance élevé (voir carte de la distribution des données, figure 3.1). Cette zone du territoire à tout de même été cartographiée en faisant l'hypothèse que le niveau de base d'un cours d'eau représente l'expression de la nappe en surface. Les principaux cours d'eau sur les hauts plateaux ont ainsi été convertis en points à un intervalle de 500 m et l'altitude de la surface à l'emplacement des points a été extraite et attribuée aux points pour réaliser l'interpolation. Les niveaux d'eau des différentes sources ont été préalablement soustraits aux altitudes de surface du MNE et ensuite interpolés par krigeage ordinaire avec un modèle exponentiel. Aucune distinction n'a été faite quant aux dates de prise de mesure.



LIVRABLE 20

Les niveaux piézométriques sur la zone d'étude varient d'un maximum de 670 m en amont à un minimum de -20 m à proximité de l'estuaire. La profondeur moyenne du niveau d'eau par rapport au sol est de 6 m. Les niveaux les plus près du sol (niveaux statiques 0 à 1,5 m) sont dans la plaine côtière alors qu'on retrouve les niveaux les plus profonds dans les escarpements aux pourtours de la région des lac Témiscouata – Grand lac Squatec.

Tout comme le réseau hydrographique de surface, les écoulements souterrains se divisent selon les grands bassins versants hydrographiques du Saint-Laurent Sud-Est et de la Baie-des-Chaleurs – Percé. Du côté du bassin du Saint-Laurent, l'écoulement régional se fait du sud-ouest vers le nord-ouest. À plus petite échelle, l'écoulement se fait selon la topographie et s'oriente vers le lit des rivières. La présence de crêtes appalachiennes provoque cependant la formation d'écoulements intermédiaires et locaux qui ne sont pas visibles à l'échelle régionale (possibilité d'avoir un écoulement vers le nord-ouest). Les gradients hydrauliques les plus prononcés sont au niveau du piedmont appalachien. Il est ainsi plus fréquent d'observer des résurgences (sources) au pied de l'escarpement appalachien ou des nappes en condition artésienne. Au niveau des grandes plaines agricoles du Kamouraska et de la région de Rivière-Du-Loup, les gradients hydrauliques sont faibles. Les écoulements sont donc latéraux. Du côté du bassin hydrographique de la Baie-des-Chaleurs – Percé, les sommets topographiques représentent des dômes piézométriques et la topographie escarpée provoque des gradients hydrauliques très élevés. Les hauts topographiques sont des zones de recharge et les fonds de vallées sont les zones de décharge où l'on retrouve les cours d'eau et les plans d'eau.

La figure 5.1 présente en détail des niveaux d'eau enregistrés dans les puits au roc forés aux sites F01 et F02 (localisation à la figure 3.2) sur la période 2019-2020. La nappe semble réagir de manière synchrone aux événements de recharge par les précipitations (solides et liquides) surtout dans le puits F01, situé sur un cran rocheux en contexte de nappe libre, à quelques mètres du rivage du St-Laurent (figure 3.4). Les niveaux d'eau semblent aussi réagir à des composantes de fréquences plus régulières. Une analyse de fréquence a été effectuée sur la série temporelle de niveaux d'eau enregistrée et a révélé le contrôle de 4 composantes de marée lunaire (K1, M2, M3 et M4) à partir desquelles les niveaux pouvaient être modélisés (figure 5.2). Les composantes

M2 (composante principale lunaire semi diurne, période = 12.42h) et sa seconde pure harmonique M4 (dite de faible niveau d'eau, période = 6.21h) dominent les signaux dans les puits F01 et F03. Les composantes K1 (composante lunaire diurne, période = 23.93h) et sa sous-composante ter-diurne M3 (période = 8.23h) sont aussi présentes. Ces dernières semblent avoir peu ou pas d'impact dans les enregistrements de F02 et F04. La distance à la côte de F04 explique probablement l'atténuation des effets de marée lunaire dans F04 dont le signal est dominé par la composante M2 et la recharge. Les composantes de marée lunaire expliquent des amplitudes de variation du niveau d'eau de quelques décimètres dans F04 ($\approx 0.25\text{m}$) à mètres dans F01 ($\approx 1.2\text{m}$) (figure 5.2). La propagation de l'onde de marée, avec ou sans intrusion saline, a des répercussions sur les niveaux d'eau dans les aquifères côtiers. Dans un contexte de changement climatique et de hausse du niveau marin, il apparaît important de suivre le devenir des niveaux d'eau dans les puits situés à proximité du fleuve et d'évaluer leur connectivité physique et géochimique avec les eaux côtières salées.

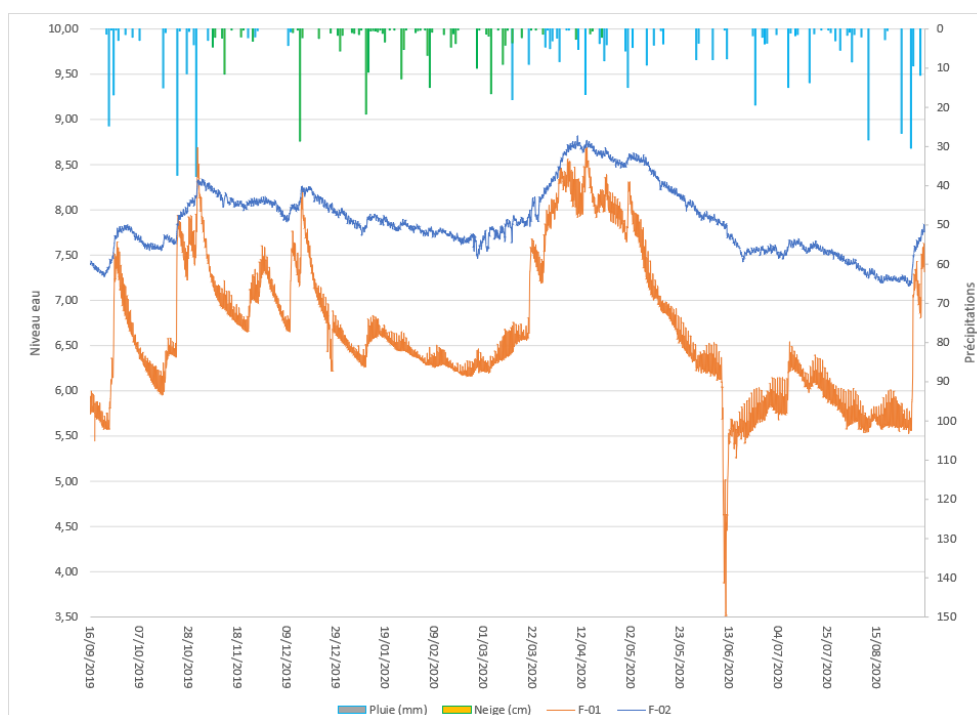


Figure 5.1-Niveau d'eau des puits F-01 et F-02 (voir leur position sur figure 3.2) et précipitations durant la période de septembre 2019 à septembre 2020

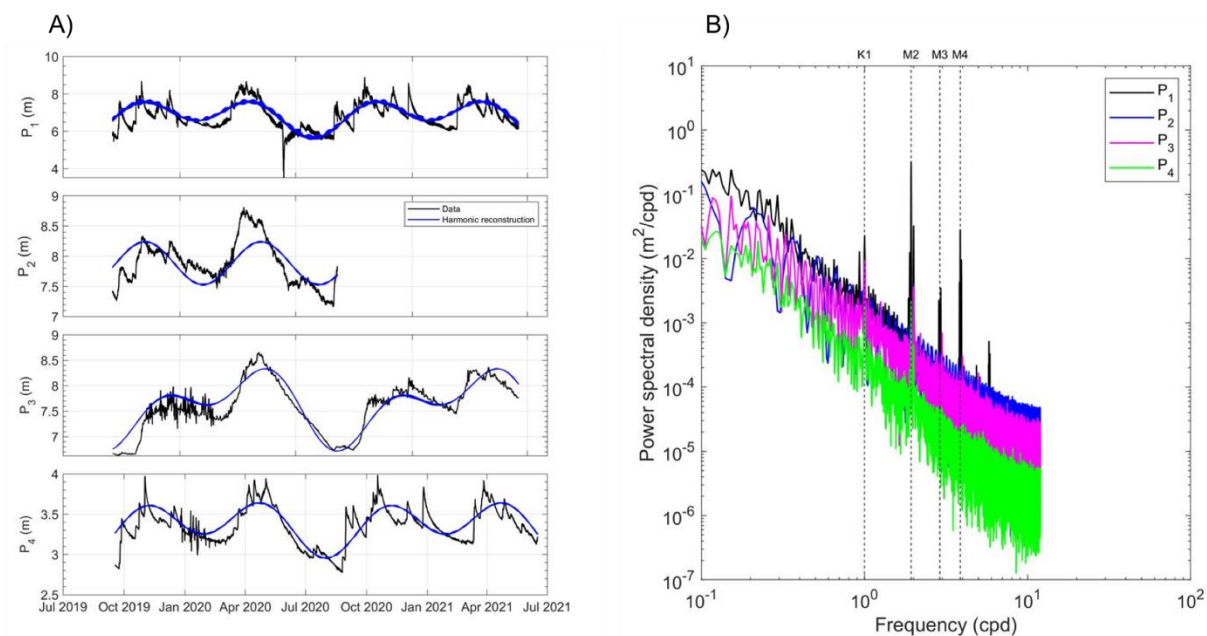


Figure 5.2 : Études des harmoniques de marées dans les puits F01(P1), F02 (P2), F03 (P3) et F04(P4), de juillet 2019 à juillet 2021. A) Niveaux d'eau enregistrés dans les puits au cours de la période d'étude (courbe noire) et niveau d'eau modélisés à partir des composantes de marées K1, M2, M3 et M4 (courbe bleue); B) densité spectrale de puissance (*Power Spectral Density*, PSD) des composantes de marée K1, M2, M3 et M4 pour les niveaux d'eau enregistrés dans les 4 puits.

5.3. Recharge et résurgences

La recharge des aquifères est l'un des plus importants paramètres à déterminer lors de la réalisation d'études hydrogéologiques puisqu'elle sert à évaluer les quantités d'eau pouvant être soutirées d'un aquifère de façon durable. La recharge des aquifères est par contre un des paramètres les plus complexes à mesurer étant donné d'une part que les nombreux facteurs qui influencent la recharge sont eux aussi complexes à estimer, mais aussi que l'on peut avoir de données directes de recharge pour la valider. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'estimation de la recharge. Dans le cadre de notre projet, c'est l'outil de modélisation de la recharge potentielle des eaux souterraines « HydroBudget » développé par l'UQAM, et fonctionnant sur le logiciel R, qui a été utilisé (Dubois *et al.*, 2021).

L'outil « HydroBudget » permet d'obtenir une estimation mensuelle et spatialisée de la recharge potentielle d'un territoire. Il est adapté aux climats froids et présente l'avantage d'être parcimonieux en données d'entrée, notamment en s'affranchissant des données sur le sous-sol. La zone non saturée n'étant pas considérée, les résultats sont à interpréter en termes de recharge potentielle et non de recharge réelle. Les hypothèses principales d'application d'HydroBudget sont les suivantes :

- Les délimitations des bassins versants souterrains et des bassins versants de surface sont confondues
- Le bilan hydrique est fermé par bassin versant de rivière
- Le temps de réponse du bassin versant est inférieur à un mois

Le modèle nécessite en entrée les données météorologiques journalières (précipitations et températures moyennes), un coefficient de ruissellement spatialisé (*Runoff curve number*), les débits totaux et les débits de base avec la délimitation des bassins versants de jaugeage. La méthodologie de préparation de ces données sur le territoire du Bas-Saint-Laurent est détaillée dans la section suivante. En sortie du modèle, on obtient la recharge mensuelle spatialisée et non spatialisée, ainsi que les moyennes annuelles et spatialisées de la recharge, de l'évapotranspiration et du ruissellement sous forme de raster.

La recharge est calculée comme un bilan hydrique de surface sans routage en surface, c'est-à-dire que le bilan est effectué maille par maille. En période estivale, les précipitations liquides sont partagées entre ruissellement et percolation vers un réservoir. L'évapotranspiration (Oudin *et al.*, 2005) est prélevée dans ce réservoir et l'eau restante est disponible pour la recharge. En période hivernale, la neige est stockée jusqu'au printemps, sa remobilisation liquide est fonction de la température et d'un coefficient de fonte. Si le sol est considéré comme gelé, l'ensemble de l'eau de surface ruisselle et la recharge est nulle.

La calibration repose sur des débits de rivière et les débits de base et vise huit paramètres liés au modèle de fonte de la neige, au module de gel du sol, et au partitionnement des eaux entre ruissellement, évapotranspiration réelle et recharge potentielle.

5.3.1. Calcul de la recharge

5.3.1.1. Intrants

Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement (RCN; *runoff curve number*) est un outil de modélisation conceptuel. Il exprime la part des précipitations qui ruisselle en surface. C'est un outil empirique développé par l'USDA (*United States Department of Agriculture*), très utilisé pour déterminer approximativement le ruissellement de surface sur un territoire lors d'un événement pluvieux (U. S. Department of Agriculture, 1986). Les valeurs du coefficient de ruissellement s'étendent sur un intervalle de 24 à 100, plus le coefficient est faible, plus le sol est perméable, et l'infiltration forte.

Il existe plusieurs méthodes de calcul du RCN, celle présentement utilisée considère trois facteurs : le groupe hydrologique du sol, l'utilisation du sol, et la pente. Au Québec, les données des groupes hydrologiques du sol sont fournies par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, elles ont été mises à jour en 2013 (Gagné *et al.*, 2013). Les affleurements rocheux sont considérés comme un sol de type D, donc très favorable au ruissellement. La pente est directement disponible sur le raster Slopekrt250. Le type de couverture du sol est classifié en

cinq catégories d'utilisation simplifiée du sol, soit culture intensive, culture extensive, boisée, résidentielle commerciale peu dense, résidentielle commerciale dense.

L'association des trois facteurs (utilisation du sol, groupe hydrologique, pente) sur chaque maille est traduite en RCN via une table de conversion (Monfet, 1979; Croteau, 2006). Les calculs de RCN sont basés sur le maillage de 250 m x 250 m.

Données météorologiques

La température moyenne et les précipitations journalières ont été extraites des grilles de climat Québec du 01-01-1961 au 31-12-2017 sur 240 localisations couvrant l'ensemble du territoire. Chaque maille est associée au point météo le plus proche.

5.3.1.2. Calibration

Les débits

La calibration du modèle repose sur des données de débit et de débit de base. Des chroniques de mesure de débit dans certaines rivières du territoire sont disponibles. Pour séparer les hydrogrammes de crues en deux (débit de base, et débit issu du ruissellement), le modèle HydroBudget utilise la méthode des filtres récursifs (Lyne et Hollick, 1979). Le débit $q(i)$ à l'instant i est séparé en débit de base $q_b(i)$ et débit issu du ruissellement de surface $q_f(i)$ en suivant les équations suivantes (Ladson *et al.*, 2015) :

$$q_f(i) = \begin{cases} \alpha q_f(i-1) + \frac{1+\alpha}{2} [q(i) - q(i-1)] & \text{pour } q_f(i) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$q_b(i) = q(i) - q_f(i)$$

avec $\alpha(-)$ le paramètre de filtre qui conditionne la séparation des hydrogrammes. Les valeurs de ce paramètre retrouvées dans la littérature sont comprises entre 0.90 et 0.98, et il doit idéalement être adapté à chaque bassin versant. Dans son article, Ladson *et al.* (2015) propose une méthode stochastique pour le déterminer. Il s'agit, pour un grand nombre de α

généralisé de manière aléatoire entre 0,90 et 0,98, de calculer le rapport du volume du débit de base et du volume du débit total sur une certaine période (*Baseflow Index*, BFI). Enfin, retrouver la valeur α donnant le BFI médian pour un intervalle de confiance de 90%. En 2012, la détermination de débits de base avait déjà été menée par filtre récursif sur des bassins versants du Bas-Saint-Laurent. Il est donc possible de comparer les valeurs du paramètre de filtre issues de cette étude, avec des paramètres alpha obtenus par la méthode décrite par Ladson *et al.* (2015). La méthode proposée par Ladson *et al.* (2015) donne des résultats proches de ceux fournis par le CEHQ (tableau 5.4), ainsi c'est cette même méthode qui a été appliquée pour obtenir les valeurs de α sur l'ensemble des bassins versants qui ont été utilisés pour la calibration.

Tableau 5.4-Vérification de la pertinence de la méthode de détermination du paramètre de filtre par comparaison avec une étude du CEHQ de 2012.

Station	Rivière	Alpha CEHQ 2012	Alpha méthode Ladson et. al (2015)
022703	Ouelle	0,939	0,939
022704	Ouelle	0,939	0,938
022507	Du Loup	0,942	0,940
022504	Du Loup	0,945	0,943

Les débits sont utilisables s'ils sont représentatifs d'un bassin versant présent en totalité sur le territoire modélisé par HydroBudget. Les débits mesurés sur la rivière Ouelle ont été écartés de l'étude pour cette raison, plus de la moitié du bassin versant étant en dehors du territoire modélisé. Au nord également, une partie du bassin versant de la rivière Madawaska n'est pas inclus dans le territoire d'étude, mais celle-ci ne représente que 14 % du territoire. Les données de débit de la station 011707 ont été utilisées dans la calibration, en prenant en compte la surface de son bassin versant manquante via le calcul du débit spécifique. Certaines stations sont influencées de manière journalière ou mensuelle, on les écarte de la calibration pour les rivières sur lesquelles on dispose de données non influencées. Sur la rivière Madawaska, les deux stations sont influencées et si on les écartait de la calibration il n'y aurait pas de donnée disponible dans la partie sud du territoire. Les parties nord et sud du territoire diffèrent en beaucoup de points il est donc impossible de considérer que les valeurs calibrées sur la partie sud pourraient être également applicables sur la partie nord. Les données de débit de la rivière Madawaska sont une source précieuse d'information, même si elles portent une certaine

incertitude (influence mensuelle, hypothèse des débits spécifiques). Les bassins versants des stations sélectionnées couvrent 44,5 % de la superficie du territoire total.

La période

La période de calibration doit être assez large pour inclure l'ensemble des variations saisonnières et nécessite des données journalières continues. C'est la période du 23/09/2008 au 06/05/2012 qui maximise la couverture de données journalière sur les cinq rivières (tableau 5.5).

Tableau 5.5-Bilan des stations utilisées pour la calibration, avec valeur du paramètre de filtre α et proportion de la période de calibration couverte par des données journalières (en rouge, livrable 26).

Station	Rivière	alpha	% jour couvert par des données
02E901	Fouquette	0,9394	97 %
011707	Madawaska	0,9394	100 %
022505	Fourchue	0,9393	100 %
022507	Du Loup	0,9400	100 %
022601	Kamouraska	0,9403	100 %

Résultats

Pour chaque simulation avec HydroBudget, le critère statistique KGE (*Kling-Gupta Efficiency*) est calculé sur les débits mensuels totaux (KGE Q_{total}) et sur les débits de base (KGE Q_{base}). La calibration dans le modèle HydroBudget vise à maximiser ces deux variables cibles. L'algorithme d'optimisation caRamel (Monteil *et al.*, 2020) permet d'explorer l'espace de variation des paramètres à calibrer. Une simulation HydroBudget est lancée pour 500 combinaisons de valeurs des paramètres à calibrer.

Les fronts de Pareto permettent de visualiser en 2 dimensions (pour les deux KGE calculés sur chaque simulation) les performances de toutes les simulations de la calibration. Un indice KGE inférieur à 0 est insatisfaisant, entre 0 et 0,50 médiocre, entre 0,50 et 0,80 satisfaisant, et plus de 0,80 très bon. Sur la figure 5.3, on note que la correspondance entre les observations et les simulations sur les débits totaux est meilleure que sur les débits de base. L'objectif principal du modèle étant de représenter la recharge, le poids de pondération de KGE Q_{base} est légèrement

supérieur au KGE Q_{total} (0,60 contre 0,40) lorsque l'on cherche à repérer les combinaisons qui donnent le meilleur résultat (points rouges).

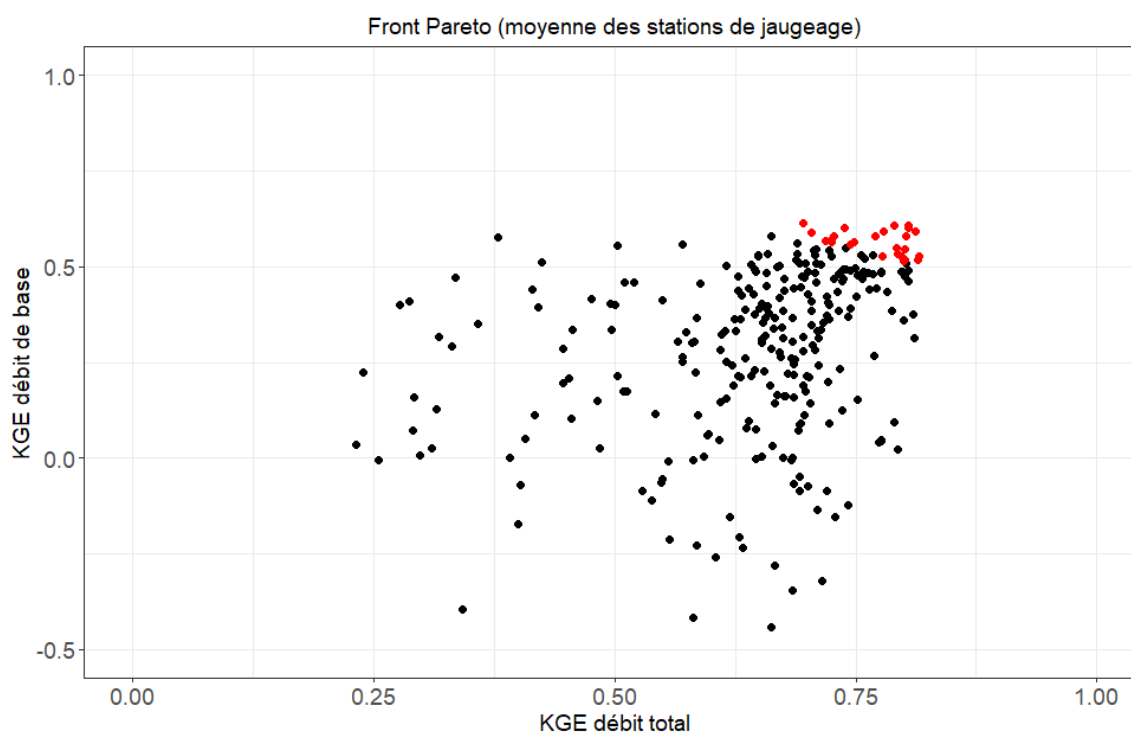


Figure 5.3-Front de Pareto des résultats de calibration moyennés sur toutes les stations. Les points rouges correspondent aux 25 meilleurs résultats.

L'analyse du front de Pareto par station (figure 5.4) permet d'aller plus loin dans l'interprétation des résultats. On peut y observer des pôles de regroupement pour chaque station. Les simulations sur les bassins versants des rivières Madawaska et Fourchue, dont on sait que les débits sont influencés, sont moins performantes que les autres stations. La représentation du débit de base est globalement de meilleure qualité sur versant de la rivière du Loup relativement aux autres. La même réflexion peut être faite sur la représentation du débit total de la rivière Fouquette. Une des différences majeures de ces deux bassins versants, outre leur taille, est le type de territoire qu'ils couvrent. Le bassin versant de la station de la rivière Fouquette est situé sur la bande littorale, une zone qui favorise plutôt le ruissellement (RCN moyen 70). Le bassin versant de la station de la rivière du Loup, lui, est situé sur la partie centrale du territoire, boisé, et avec un sol groupe hydrologique A ou B, donc sur une zone qui favorise plutôt l'infiltration (RCN moyen 58). Le modèle HydroBudget fonctionne avec un jeu unique de

paramètres appliqué sur l'ensemble du territoire. Des observations issues de deux zones du territoire différentes « tirent » la calibration chacun dans un sens. Le jeu de paramètre auquel on doit aboutir est compromis entre les tendances de différentes parties du territoire. Il serait possible de mettre l'accent sur une station et donc indirectement sur un type de territoire) avec une pondération variable par station dans le calcul du KGE moyen. Cela n'a pas été choisi ici, toutes les stations ont le même poids.

Le tableau 5.6 résume les valeurs des indices KGE pour la simulation la plus performante. On retrouve la tendance observée sur les fronts de Pareto : les débits totaux simulés sont plus proches des observations que les débits de base. La représentation de ceux-ci n'en reste pas moins satisfaisante avec un KGE moyen de 0,62.

Tableau 5.6-Performance de la correspondance entre les observations et la calibration pour le meilleur jeu de paramètre issu de la calibration.

Station	Rivière	KGE Q_{total}	KGE Q_{Base}
02E901	Fouquette	0,84	0,61
011707	Madawaska	0,73	0,51
022505	Fourchue	0,71	0,40
022507	Du Loup	0,84	0,82
022601	Kamouraska	0,84	0,74
	Moyenne	0,79	0,62

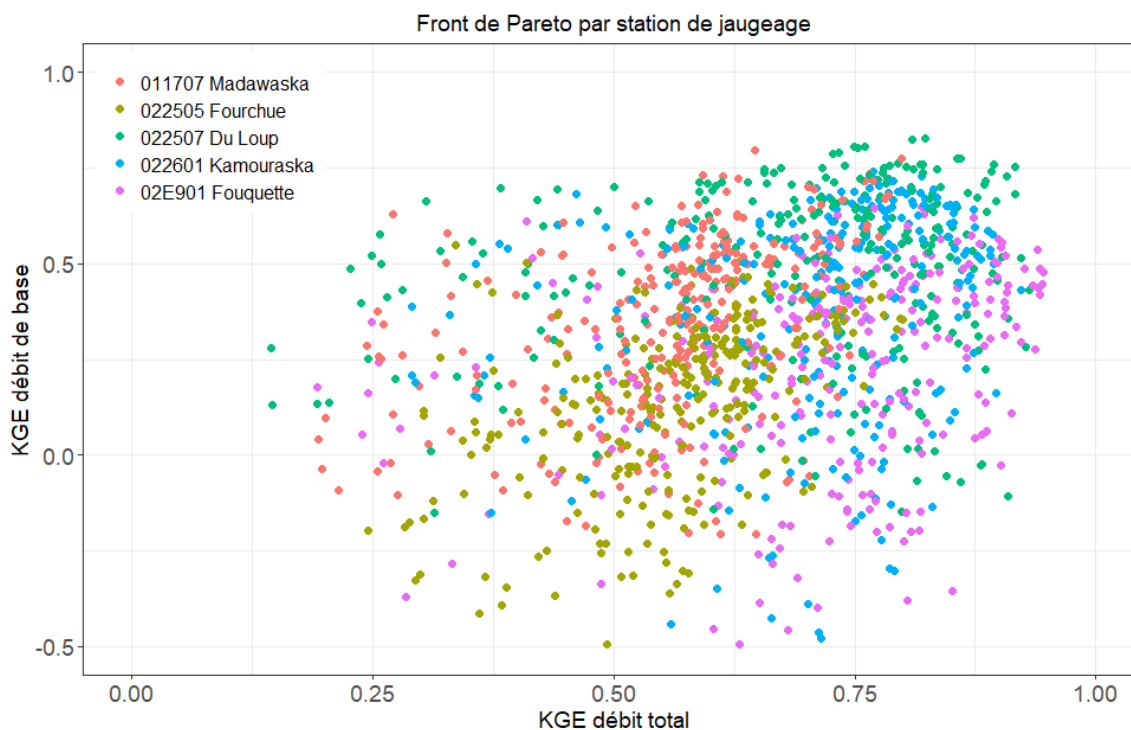


Figure 5.4-Front de Pareto des résultats de calibration par station de jaugeage

5.3.2. La recharge des nappes sur le territoire du KRT

La recharge moyenne sur le territoire est de 171 mm/an, avec un maximum de 500 mm/an et un écart type spatial de 59 mm/an. Le territoire semble découpé en trois parties : d'une part, deux zones avec une recharge autour de 100 mm/an le long de la côte du Saint-Laurent, ainsi que dans la partie est du territoire, et d'autre part une large bande centrale d'axes NE-SO qui présente **la zone de recharge préférentielle** avec une recharge moyenne autour de 250 mm/an. À noter, très localement la recharge est supérieure à 300 mm/an. Ces zones sont caractérisées par un RCN très faible (inférieur à 33) qui favorise l'infiltration. C'est la classe pédologique qui semble le plus influencer le RCN. Par exemple, une maille de couverture boisée, de pente 1 % et de sol de classe A a un RCN de 24, alors qu'une même maille de couverture boisée, de pente 1 % et classe pédologique B a un RCN de 54. Cette grande différence a un impact certain sur la recharge, et génère localement de grandes disparités qui ne sont sans doute pas

représentatives de la réalité. Le paramètre RCN est un outil précieux par sa simplicité de calcul, mais la catégorisation du territoire selon trois critères en réduit les nuances.

La recharge représente de 15 % à 23 % des précipitations annuelles sur le territoire sur la période de calibration (tableau 5.7). On retrouve ici les différences marquées des bassins versants de la rivière du Loup et de la rivière Fouquette. Le ruissellement de surface représente 40 % à 48 % et l'évapotranspiration environ 38 % des précipitations annuelles.

Tableau 5.7-Bilans d'eau sur les bassins versants des stations de jaugeages utilisés durant la calibration sur la période de septembre 2008 à mai 2012

Station	Rivière	Précipitations (mm/an)	Recharge (mm/an)	Ruissellement de surface (mm/an)	Évapotranspiration (mm/an)
02E901	Fouquette	965 (100 %)	146 (15 %)	466 (48 %)	353 (37 %)
011707	Madawaska	1050 (100 %)	160 (15 %)	509 (48 %)	381 (37 %)
022505	Fourchue	969 (100 %)	203 (21 %)	391 (40 %)	375 (39 %)
022507	Du Loup	983 (100 %)	226 (23 %)	370 (38 %)	387 (39 %)
022601	Kamouraska	974 (100 %)	196 (20 %)	396 (41 %)	382 (39 %)

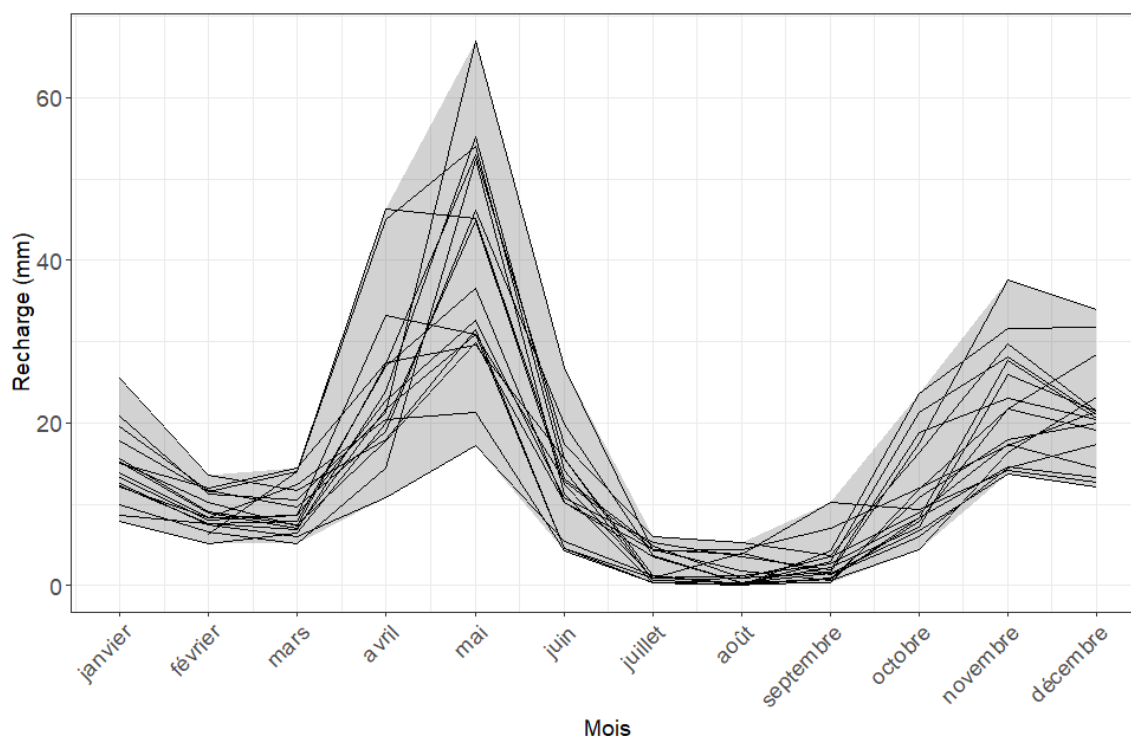
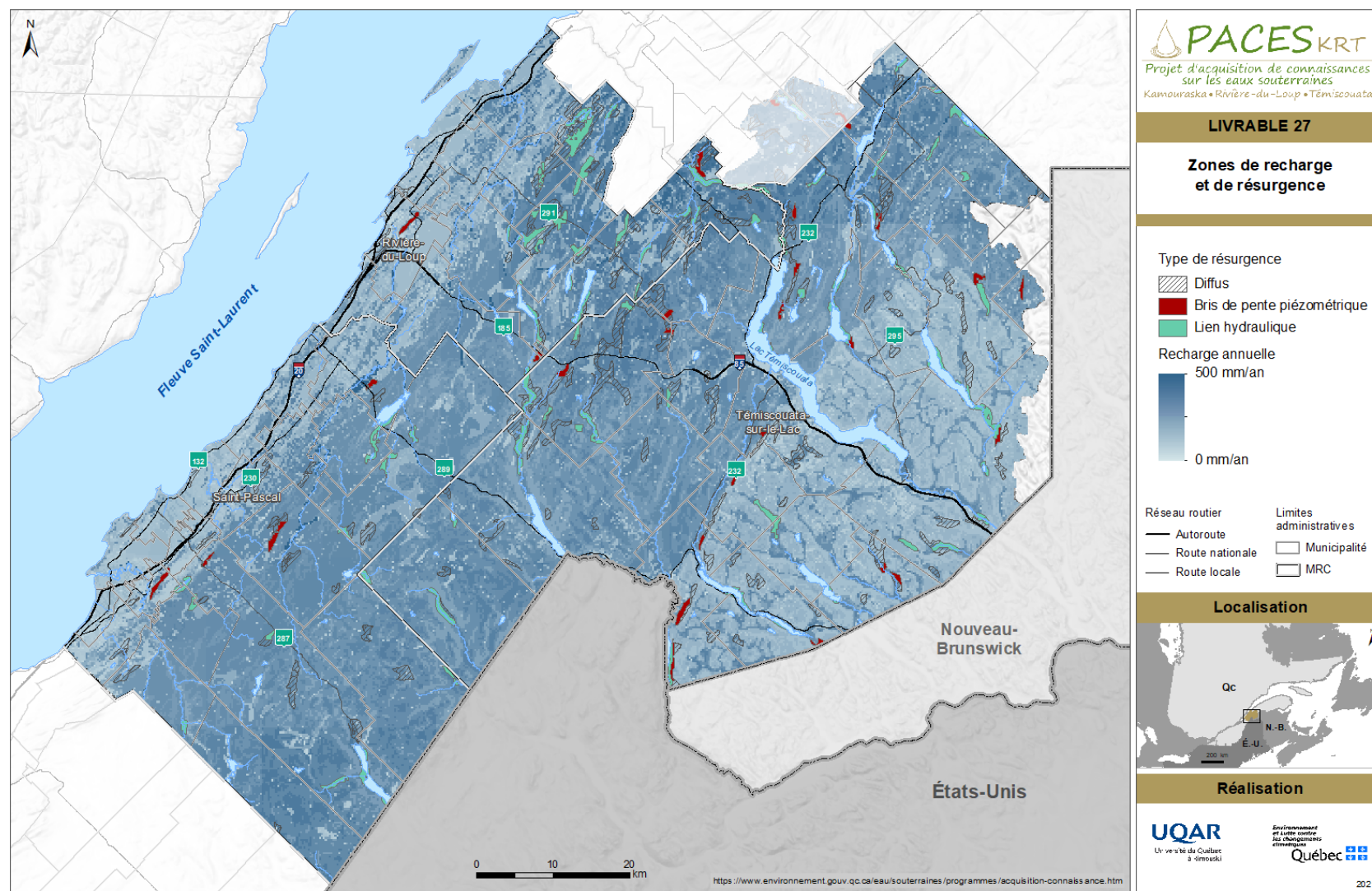


Figure 5.5-Recharge mensuelle de janvier 2000 à décembre 2017 moyennée sur tout le territoire du PACES KRT.

La figure 5.5 décrit la dynamique annuelle moyenne de la recharge potentielle (en mm/an) sur le territoire de 2000 à 2017. Les deux périodes de recharge classiquement retrouvées sont bien identifiées. La période de fonte entre avril et juin produit des pics de recharges autour de 35 mm/mois qui sont très variables selon les années. La recharge automnale qui s'étale d'octobre à décembre est moins intense, avec des valeurs autour de 20 mm/mois. Il est délicat de quantifier l'incertitude de résultats de simulation tant elle résulte de sources variées : représentation conceptuelle des processus dans le modèle HydroBudget, incertitude sur les données d'entrée (krigeage de la météo, recours au paramètre RCN, débits de rivières influencés). Cependant, les 25 meilleurs jeux de paramètres aboutissent à une recharge moyenne sur le territoire de 184 mm/an, avec un écart type de 22 mm/an sur cette moyenne (livrable 27).

5.3.3. Résurgences

Les zones de bris de pente hydraulique (en rouge, livrable 27) correspondent à une dénivellation importante dans la piézométrie. Ce type de dénivellation est généralement susceptible de créer une résurgence naturelle, surtout au moment où le niveau de nappe est très haut. Cependant, aucune source naturelle n'a été constatée directement sur le territoire ou indiquée par les acteurs. Les liens hydrauliques entre les aquifères et les rivières (en turquoise, livrable 27) se font lorsque l'aquifère se trouve en condition de nappe libre. Généralement, cet état de fait se produit lorsque la rivière repose directement sur le roc ou sur un aquifère granulaire de surface important. Il est à noter que sur la carte, certaines rivières semblent être des zones de recharges élevées alors qu'elles n'ont pas été identifiées comme ayant un lien hydraulique avec l'aquifère. Cela s'explique par l'utilisation de la pédologie dans le calcul de la recharge alors que pour le confinement l'épaisseur de la séquence stratigraphique est prise en compte. Ainsi, la plupart des rivières dans la plaine côtière repose sur des aquifères au roc confiné. Finalement, les secteurs hachurés sur la carte représentent les secteurs où l'altitude piézométrique est supérieure à l'altitude du modèle numérique de terrain et où l'on s'attend à des résurgences diffuses. La plupart de ces secteurs se situent en bordure de cours d'eau ayant un lien hydraulique avec les eaux souterraines, mais aussi dans des creux topographiques. Ce type de résurgence permet la mise en place de marais, de marécages ou encore de tourbières.



LIVRABLE 27

5.4. Vulnérabilité des aquifères

La méthode DRASTIC est la méthode recommandée par la réglementation québécoise sur le prélèvement des eaux et leur protection (RPEP) pour définir la vulnérabilité d'un aquifère face à une potentielle contamination provenant de la surface du sol. La méthode DRASTIC n'a pas pour objectif d'identifier le niveau de vulnérabilité face à un contaminant en particulier, mais détermine plutôt la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère en tenant uniquement compte de paramètres physiques. La représentation cartographique de l'indice DRASTIC se veut un outil d'aide à la décision concernant l'aménagement du territoire, facile d'utilisation et permettant de rapidement cibler les zones du territoire qui peuvent être sensibles à une contamination. **Autant pour la vulnérabilité DRASTIC que pour les autres livrables du projet PACES-KRT, les cartes sont produites à l'échelle régionale et des études hydrogéologiques complémentaires sont nécessaires si des interprétations à l'échelle locale sont réalisées.** L'indice DRASTIC dans le cadre du PACES-KRT a été calculé pour l'aquifère rocheux. Dans la région, il n'y a pas d'aquifère granulaire suffisamment étendu pour en déterminer leur vulnérabilité. Il est tout de même possible d'utiliser la carte de l'épaisseur de sédiments argileux pour avoir une indication de la vulnérabilité de ces aquifères granulaires.

La méthodologie suivie pour la production de l'indice DRASTIC est conforme à Aller *et al.* (1987). L'approche de classification multi critères pour le calcul du DRASTIC nécessite la connaissance de sept paramètres hydrogéologiques (figure 5.6): D : Profondeur de la nappe (Depth to water table); R : Recharge (Recharge); À : Nature du milieu aquifère (Aquifer media); S : Type de sol (Soil media); T : Pente du terrain (Topography); I : Nature de la zone vadose ou non saturée (Impact of vadose zone); C : Conductivité hydraulique de l'aquifère (Conductivity).

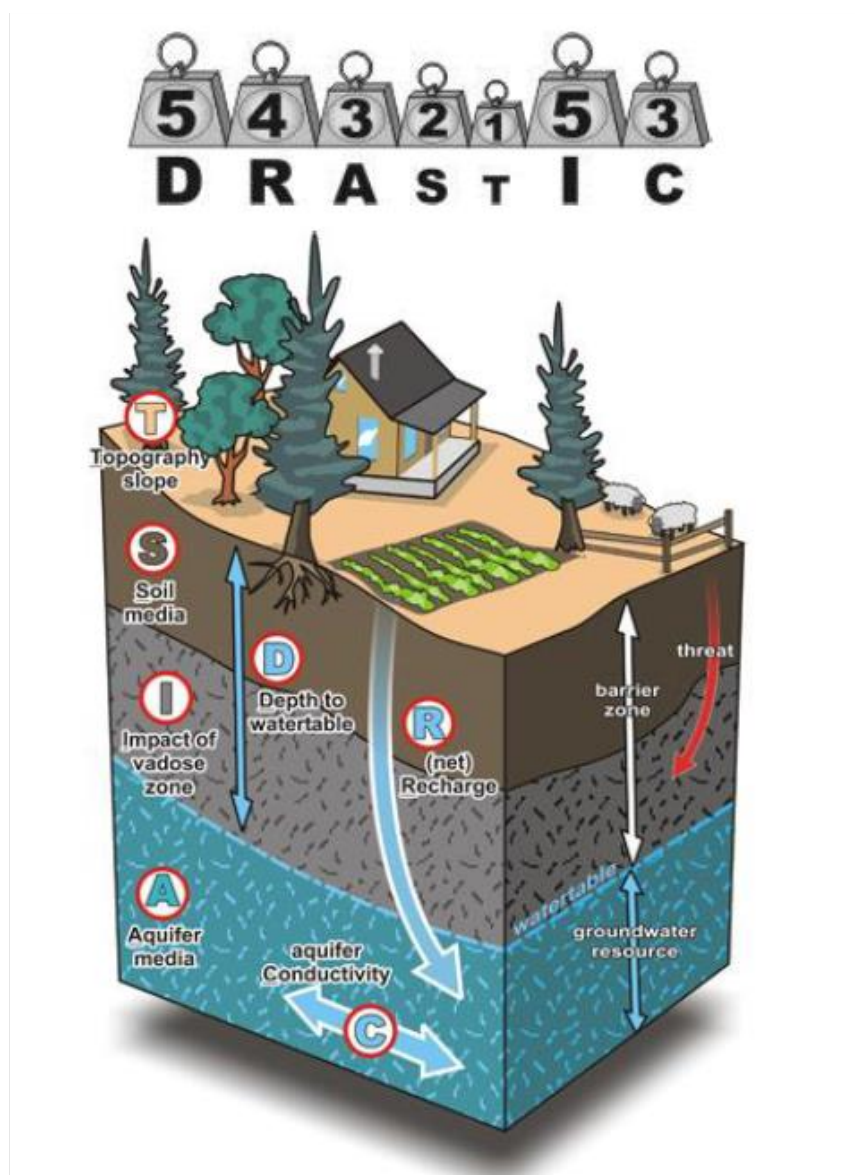


Figure 5.6-Représentation des sept paramètres DRASTIC ainsi que leurs poids respectifs (Figure tirée de Lefebvre *et al.* 2015).

Pour chacun de ces sept paramètres, des points (ou cotes) sont attribués en fonction des caractéristiques géologiques que l'on retrouve sur le territoire. À chacun de ces paramètres est associé un poids prédéfini variant de 1 à 5. Les paramètres Profondeur de la nappe (D), Recharge (R) et Nature de la zone vadose (I) sont les paramètres ayant les poids les plus élevés et par conséquent, ce sont les paramètres contribuant le plus à la détermination de la vulnérabilité d'un aquifère. Une cote numérique variant de 1 à 10 est également attribuée à chacun des paramètres selon les caractéristiques hydrogéologiques au site. L'indice final, variant entre 23 et 226, est calculé selon l'équation :

$$\text{Indice DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

où l'indice c de chaque indicateur est la cote attribuée à celui-ci (ex. : D_c = cote de la profondeur de la nappe) et est multiplié par son poids (ex. : D_p = poids de la profondeur de la nappe). Le tableau 5.8 présente le gabarit des différentes cotes utilisées.

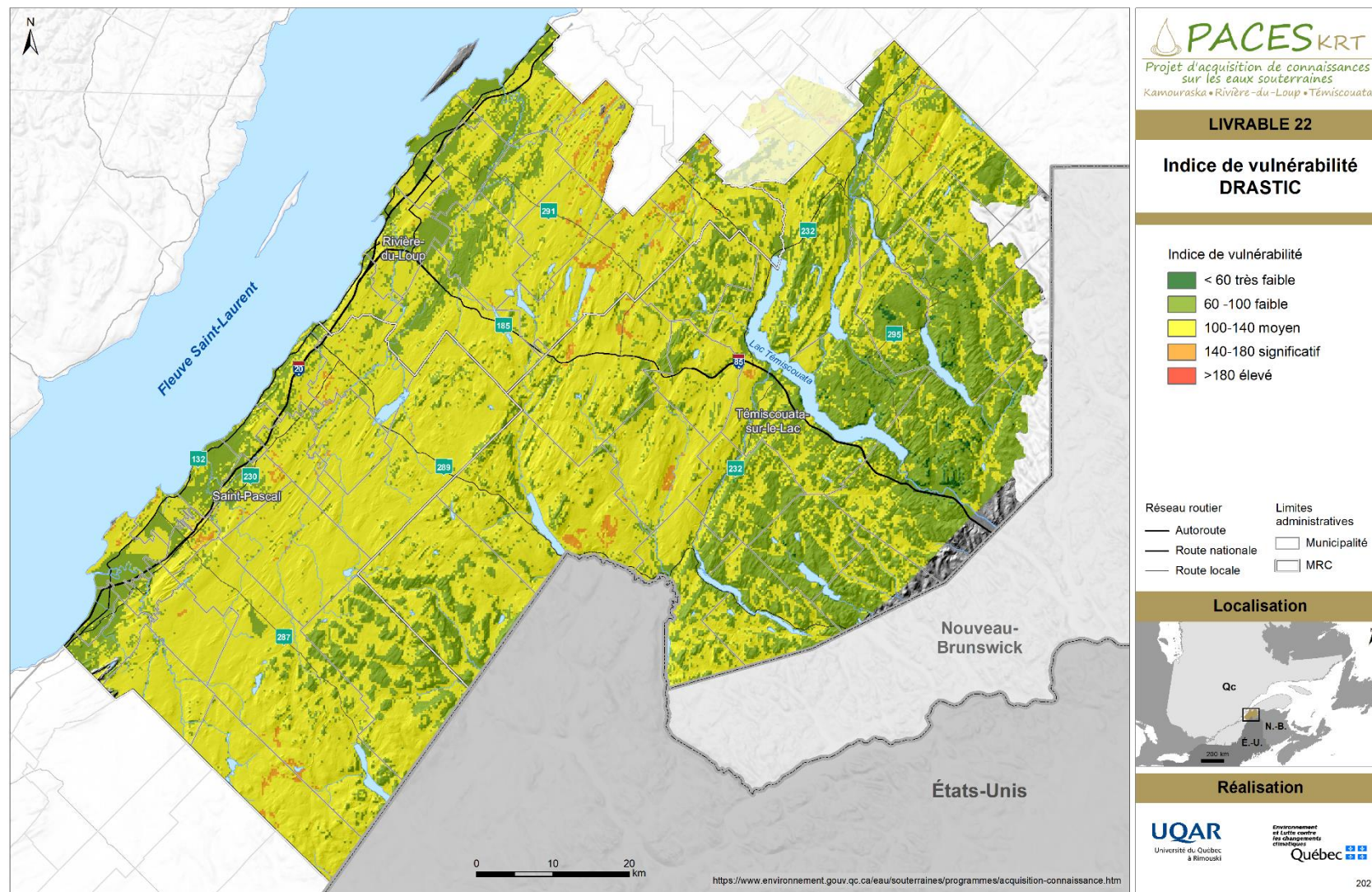
Pour calculer l'indice DRASTIC à l'échelle régionale, une carte de la distribution spatiale de chacun des sept paramètres a été produite en format matriciel (*raster*). Comme pour l'ensemble des livrables en format matriciel, des mailles de 250 m × 250 m ont été utilisés pour les couches de chacun des paramètres. La cote numérique variant de 1 et 10 a ensuite été attribuée à chacune des cellules selon le gabarit prescrit (tableau 5.8). Ainsi, pour chacun des paramètres, on retrouve une distribution spatiale de chacune des cotes numériques sur tout le territoire. Le calcul de l'indice a ensuite été fait avec l'outil *raster calculator* dans le système d'information géographique (SIG) ArcGIS (livrable 22). À noter que les cartes pour chacun des sept paramètres sont disponibles à l'annexe 6.

En règle général, la vulnérabilité de l'aquifère au roc du territoire est considérée plutôt faible dans la plaine côtière et au sud du Témiscouata, tandis que la région centrale à une vulnérabilité moyenne. Seul quelque petite partie du territoire se démarque par une vulnérabilité significative, mais dont l'indice ne dépasse pas 150.

Tableau 5.8-Gabarit des paramètres de l'indice DRASTIC. Tableau tiré de MELCC 2019

Cote	D	R	A	S	T	I	C
	Profondeur de la nappe ⁽¹⁾	Recharge (mm/an)	Nature du milieu aquifère ⁽²⁾	Type de sol ⁽³⁾	Pente du terrain (%)	Nature de la zone vadose ⁽⁴⁾	Conductivité hydraulique de l'aquifère (m/j)
1	31 et plus	De 0 à 50		Argile	18 et plus	Couche confinante (1)	0,04 à 4
2	De 23 à 31		Schiste massif (1-3)	Terre noire			4 à 12
3	De 15 à 23	De 50 à 100	Roches ignées ou métamorphiques (2-5)	Loam argileux	De 12 à 18	Limon ou argile (2-6) schiste (2-5)	
4			Roches ignées ou métamorphiques altérées (3-5)	Loam silteux		Roches ignées ou métamorphiques (2-8)	12 à 29
5	De 9 à 15		Till (4-6)	Loam	De 6 à 12		
6		De 100 à 180	Lits de grès, de calcaire et de schiste (5-9) Grès massif (4-9) Calcaire massif (4-9)	Loam sableux		Calcaire (2-7) Grès (4-8) Lits de calcaire, de grès et de schiste (4-8) Sable et gravier avec limon et argile (4-8)	29 à 41
7	De 4,5 à 9			Argile fissurée			
8		De 180 à 250	Sable et gravier (4-9)	Tourbe		Sable et gravier (6-9)	41 à 82
9	De 1,5 à 4,5	250 et plus	Basalte (2-10)	Sable	De 2 à 6	Basalte (2-10)	
10	De 0 à 1,5		Calcaire karstique (9-10)	Sol mince ou roc ou gravier	De 0 à 2	Calcaire Karstique (8-10)	82 et plus
Poids	5	4	3	2	1	5	3

(1) La profondeur de la nappe s'applique dans le cas d'une nappe libre tandis que dans le cas de nappe captive, la profondeur de la nappe correspond au toit de l'aquifère. (2) Chaque matériau est classé selon la cote type proposée par la méthode DRASTIC. Elle propose aussi un intervalle de cote, indiqué entre () dans ce tableau. (3) Environ le premier mètre de dépôt à partir de la surface du sol. (4) Portion souterraine entre le sol et le niveau de la nappe ou entre le sol et le toit de l'aquifère dans le cas d'une nappe captive.



LIVRABLE 22

5.5. Géochimie de l'eau souterraine

Au cours de son trajet entre les zones de recharges vers les zones de décharge, les eaux souterraines sont influencées par les gaz et aérosols de l'atmosphère, l'altération avec le substrat rocheux et sédimentaire ainsi que par les activités anthropiques. 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 substratum, de la contamination anthropique et naturelle, ainsi que des mélanges entre des eaux de différentes origines. L'objectif de cette section est de comprendre les mécanismes qui contrôlent et influencent l'évolution géochimique des eaux souterraines afin (1) de caractériser la qualité géochimique de la ressource et (2) de proposer un modèle régional d'évolution des eaux des zones de recharge aux zones de résurgences.

Une base de données géochimiques a été réalisée à l'aide d'un maximum d'échantillons représentatifs du territoire étudié. En 2019, un total de 167 échantillons a été prélevé dans des puits privés, incluant des puits au roc (90 %) et des puits dans des aquifères granulaires (10 %). En 2020, 87 échantillons supplémentaires ont été prélevés incluant des puits au roc (66 %) et des puits granulaires (33 %). Cette base de données va permettre d'identifier et localiser les différents faciès géochimiques pour finalement expliquer les processus géochimiques contrôlant les caractéristiques géochimiques des groupes d'eau.

5.5.1. Base de données géochimiques

Le prélèvement des échantillons et leur analyse sont décrits dans la section 3.2.3. Avant leur utilisation, les données ont toutes été révisées afin d'éliminer les doublons, les données erronées ou les données incomplètes selon les critères suivants :

- Posséder des résultats analytiques pour chacun des ions majeurs suivants : HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ ;
- Présenter un bilan ionique acceptable : la somme des cations majeurs et des anions majeurs, exprimés en mEq.L^{-1} , doit être située entre -10 % et +10 %.

Finalement, sur un total de 254 échantillons, 228 échantillons ont été retenus selon ces critères. Cependant, les échantillons de 2020 ayant été prélevés dans des zones ciblées, seuls les échantillons de 2019 sont pris en compte pour les analyses statistiques afin d'éviter de mauvaises interprétations statistiques.

5.5.2. Analyses des ions majeurs et bruit de fond géochimique

Faciès géochimique d'eau souterraine

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. Un total de 5 faciès a pu être identifié à partir du diagramme de Piper (figure 5.7). Les cinq faciès sont les types bicarbonaté-calciq (Ca- HCO_3), bicarbonaté-sodique (Na- HCO_3), les eaux bicarbonaté-mixte cations (mix cation- HCO_3), les eaux de type chloruré-sodique (Na-Cl) et finalement les eaux carbonatées sodique (Ca-Cl).

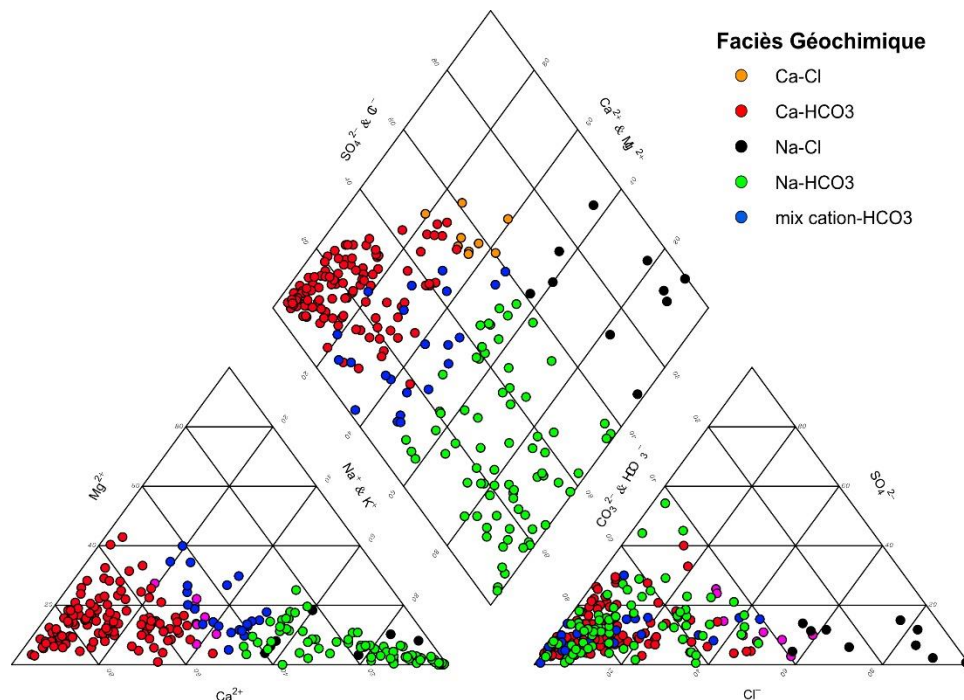


Figure 5.7-Diagramme de Piper pour les 228 échantillons analysés dans le cadre du programme PACES-KRT.

Les eaux de type Ca-HCO_3 sont associées à des eaux de recharge pauvres en éléments dissous et peu minéralisées. Sur le territoire elles représentent la majorité de l'eau consommée dans la région, soit 51 % des échantillons prélevés (tableau 5.9). Le second type d'eau le plus couramment rencontré est le type Na-HCO_3 , que l'on retrouve dans 32% des puits échantillonnés. Ce faciès fait référence à des eaux plus évoluées ayant subi des échanges cationiques entre le Ca^{2+} contenu dans l'eau de recharge et le Na^+ présent dans le substrat rocheux. Les eaux de type Na-HCO_3 ont donc un temps de résidence plus long dans l'aquifère que le type Ca-HCO_3 . Le troisième type d'eau, les eaux mix cations- HCO_3 , représente 8,7 % des puits échantillonnés et correspond à un intermédiaire entre les eaux de type Ca-HCO_3 (peu minéralisées) et les eaux de type Na-HCO_3 (minéralisées). Les quatrième et cinquième faciès sont peu présents et correspondent respectivement à une eau de type Na-Cl chargée en sels (4,4 % des puits) et de type Ca-Cl (3,4 % des puits) semblable au premier faciès, mais enrichie en chlorures (Cl^-) et sulfates (SO_4^{2-}).

Tableau 5.9-Contribution des faciès géochimiques identifiés à l'aide du diagramme de Piper pour la région KRT, en dessous de la limite de la mer de Goldthwait et au-dessus de la limite de la mer de Goldthwait (voir figure 23).

Faciès	Nb.	Total	< mer de Goldthwait		> mer de Goldthwait	
		Contribution (%)	Nb.	Contribution (%)	Nb.	Contribution (%)
Ca-HCO_3	117	51,2	37	28	77	58
Na-HCO_3	73	32,2	36	27	38	28,5
Mix cation-HCO_3	20	8,7	12	9	10	7,5
Na-Cl	10	4,4	7	5,2	4	3
Ca-Cl	8	3,4	5	3,8	4	3
Total	228	100	97	100	133	100

La carte de la figure 5.8 présente la répartition géographique des faciès d'eau. La ligne de partage des eaux (en noire sur la figure 5.8) représente la limite d'écoulement des eaux de surface à l'échelle de grand bassin versant. Les eaux souterraines s'écoulent suivant la piézométrie. Cependant pour faciliter la compréhension de l'évolution des eaux souterraines, la description se fera en fonction de la limite marine de la mer de Goldthwait. À l'échelle régionale, il est possible de constater que le type d'eau Ca-HCO_3 est non seulement présent sur l'ensemble du territoire, mais aussi le plus abondant, autant dans les aquifères au roc que les aquifères granulaires, qu'ils soient confinés, semi-confinés ou libres. Le deuxième type d'eau le plus abondant, Na-HCO_3 est aussi présent sur l'ensemble du territoire étudié. Cependant, localement, on peut observer des disparités entre la plaine côtière et les hauts plateaux appalachiens (figure 5.8 et tableau 5.9).

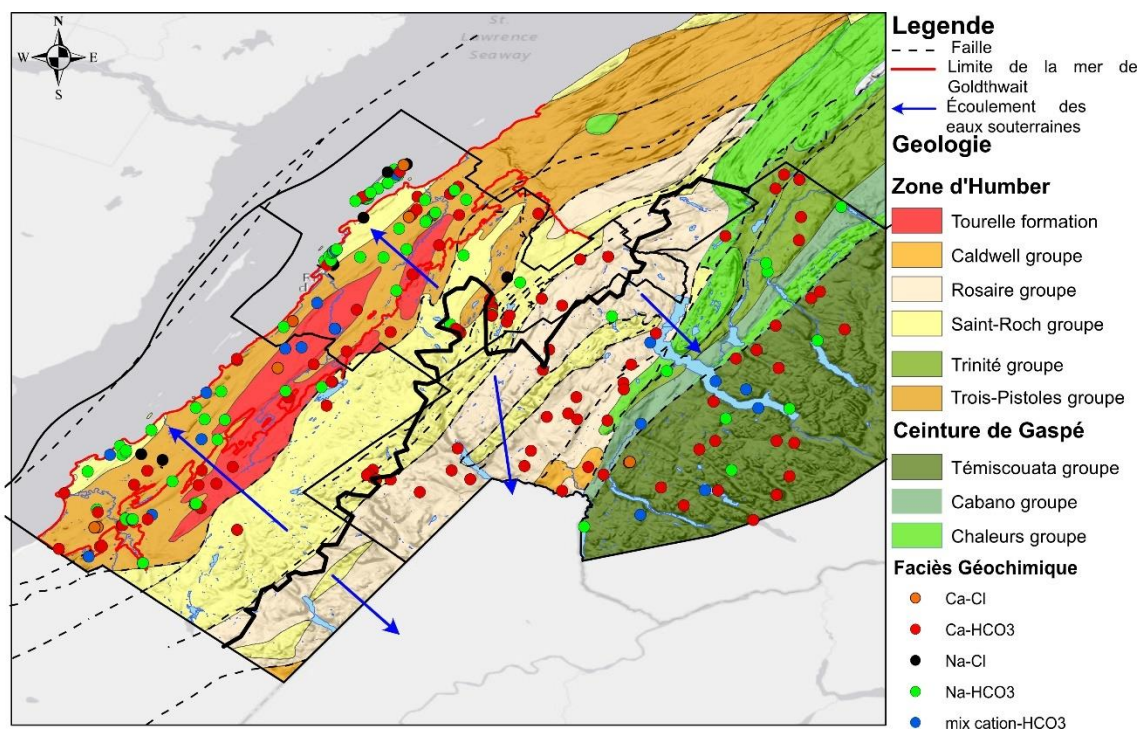


Figure 5.8-Carte montrant la répartition géographique des faciès géochimiques identifiés à l'aide du diagramme de Piper (figure 7). La ligne noire marque la limite de drainage des bassins versants et les flèches bleues l'écoulement régional des eaux souterraines.

Les hauts plateaux se caractérisent par une forte contribution d'eau souterraine faiblement minéralisée de type Ca-HCO_3 (58 %). Ces échantillons ont été prélevés dans des puits principalement situés sur des reliefs, dans des aquifères à nappes libres. À l'inverse, les eaux minéralisées (mix cation- HCO_3 et Na-HCO_3) sont principalement situées dans les vallées à proximité de rivières et/ou de lacs. Ces vallées se caractérisent par des dépôts fluvio-glaciaires suggérant un échange cationique de l'eau souterraine chargée en Ca^{2+} avec les dépôts riches en Na^+ lors de l'écoulement des eaux souterraines depuis les nappes libres sur les reliefs vers les nappes semi-captives à captives situées dans les vallées. La plaine côtière se caractérise par une forte proportion de puits avec des eaux minéralisées (Na-HCO_3 ; 27 %). De plus, si l'on ajoute la contribution de l'ensemble des types d'eaux avec une minéralisation plus avancée que les eaux de recharge (Ca-HCO_3), la contribution devient plus importante. Les types d'eaux tels que Na-HCO_3 , mix cation- HCO_3 , Na-Cl et Ca-Cl sont dominants dans la zone des dépôts argileux située sous la limite marine de la mer de Goldthwait.

Statistiques descriptives des faciès d'eau

Les caractéristiques physico-chimiques et isotopiques des faciès d'eau sont résumées au tableau 5.10 pour les principaux paramètres analytiques. Le nombre total d'échantillons de référence composant chaque groupe y est indiqué. Cependant, notons que seuls les échantillons collectés en 2019 sont pris en compte dans ce tableau.

Une analyse en composante principale (PCA; *Principal Component Analysis*) a aussi été réalisée sur les ions majeurs (Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} et l'alcalinité Totale) afin de mettre en exergue les processus hydrogéochimiques et expliquer la répartition des groupes. L'ACP est une technique de transformation de données qui tente de révéler une structure sous-jacente simple dans un ensemble de données multivariées. C'est une analyse statistique largement utilisée dans les études hydrogéochimiques régionales (Cloutier *et al.*, 2008; Chaillou *et al.*, 2018).

Tableau 5.10. Valeurs moyennes et écarts-types des paramètres chimiques des faciès géochimiques identifiés à l'aide du diagramme de Piper. * T_{alk} : alcalinité totale, TDS : total dissolve solids, CID : carbone inorganique dissous.

Faciès géochimique	Ca-HCO ₃	Mix cation-HCO ₃	Na/K -HCO ₃	Ca-Cl	Na-Cl
Total Échantillon N	81	17	37	6	5
HCO₃ (mg/L)	140 ± 54	146 ± 50	165 ± 62	145 ± 52	88 ± 51
T_{alk}^* (mgCaCO₃./L)	140 ± 54	146 ± 51	174 ± 66	123 ± 55	88 ± 51
Ca²⁺ (mg/L)	51 ± 22	31 ± 11	12 ± 9	76 ± 28	121 ± 70
Cl⁻ (mg/L)	12 ± 20	15 ± 17	26 ± 36	133 ± 61	1452 ± 1622
Na⁺ (mg/L)	10 ± 12	31 ± 15	90 ± 46	58 ± 27	875 ± 975
Mg²⁺ (mg/L)	7 ± 5	10 ± 6	3 ± 3	13 ± 6	17 ± 16
K⁺ (mg/L)	1,6 ± 1,6	2,4 ± 2,1	2,2 ± 1,5	3,9 ± 2,9	13,0 ± 11,6
SO₄²⁻ (mg/L)	19 ± 21	18 ± 12	24 ± 18	27 ± 10	84 ± 111
pH	7,2 ± 0,9	7,6 ± 0,6	8,5 ± 0,8	7,2 ± 0,5	7,3 ± 0,5
TDS* (mg/L)	460 ± 271	507 ± 273	580 ± 467	1040 ± 595	3713 ± 3093
CID* (mg/L)	33 ± 11	38 ± 12	40 ± 11	34 ± 10	21 ± 9
δ^2H ‰	-87,5 ± 5,0	-87,5 ± 2,9	-87,5 ± 4,6	-89,0 ± 3,9	-88,6 ± 2,9
$\delta^{18}O$ ‰	-12,6 ± 0,6	-12,2 ± 0,7	-12,1 ± 0,8	-12,6 ± 0,6	-11,3 ± 1,2
$\delta^{13}C_{CID}$ ‰	-15,7 ± 3,7	-15,3 ± 3,5	-15,5 ± 3,2	-17,5 ± 1,7	-20,8 ± 3,7
²²²Rn (Bq/L)	17,9 ± 18,2	6,8 ± 8,7	7,0 ± 9,5	17,1 ± 21,6	5,0 ± 4,9
Confinement	Non confiné à confiné	Semi-confiné à non confiné	Semi-confiné à non confiné	Semi-confiné à non confiné	Semi-confiné à non confiné
Contexte hydrogéochimique	Plaine côtière et haut plateaux	Plaine côtière et haut plateaux	Plaine côtière et haut plateaux	Plaine côtière et haut plateaux	Plaine côtière

Les données géochimiques sont de nature compositionnelle, c'est-à-dire qu'elles sont des vecteurs de valeurs non négatives soumises à une contrainte de somme constante (généralement 100 %). Il est donc d'une importance cruciale que la nature compositionnelle des données environnementales soit prise en considération pour l'analyse statistique des données afin de limiter les résultats erronés (Filzmoser *et al.* 2009). Les données compositionnelles peuvent être traitées avant l'analyse statistique en utilisant une famille de transformations logarithmique pour convertir les données de composition d'origine en nouvelles coordonnées, qui suivent les règles de la géométrie euclidienne dans l'espace réel (Aitchison, 1990). Dans cette étude, un rapport logarithmique centré (clr transformation; *centred-log ratio*) (Aitchison 1990) a été appliqué à l'ensemble de données avant les analyses multivariées en utilisant le package

“compositions” du logiciel RStudio (Van Den Boogaart et Tolosana-Delgado 2008). Toutes les analyses statiques présentées dans cette section ont été effectuées à l’aide du package “vegan” sur le logiciel RStudio.

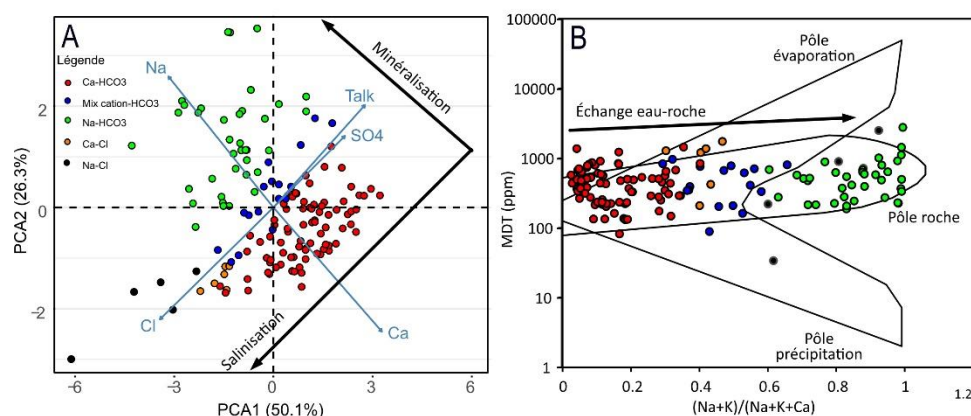


Figure 5.9-A) Analyse en composante principale (PCA) des principaux paramètres chimiques (Ca, Na, Cl, SO₄ et Talk) permettant de mettre en évidence les voies de minéralisation des eaux souterraines. B) Diagramme de Gibbs permettant de mettre en évidence les processus contrôlant l'évolution chimique des eaux souterraines.

Comme le montre la figure 5.9A, les deux premières composantes expliquent respectivement 50 % et 26 % de la variance et, par conséquent, représentent la majorité de la variance dans l'ensemble de données d'origine. L'axe PCA1 qui explique majoritairement la variance, se caractérise par des valeurs positives en Ca, SO₄ et Talk et des valeurs négatives en Cl et Na. L'axe PCA2 est caractérisé par des valeurs positives en Na, SO₄ et Talk et des valeurs négatives en Cl et Ca. En raison de la position des variables chimiques dans le plan défini par les axes des composantes 1 et 2, nous définissons l'axe PCA1 comme la minéralisation globale de l'eau souterraine (de la moins minéralisée avec une valeur positive à la plus minéralisée avec une valeur négative). Cependant, l'axe PCA2 permet d'être plus précis dans l'évolution des eaux souterraines. On peut observer une évolution des eaux du faciès Ca-HCO₃ qui peuvent évoluer soit vers le faciès Na-HCO₃ soit vers faciès Ca-Cl et Na-Cl.

Comme pour les eaux de surface, le diagramme de Gibbs (Gibbs, 1970) peut aider à observer des évolutions simples dans la chimie des eaux souterraines en fonction des processus de base tels que l'évaporation, les précipitations et l'interaction eau-roche (figure 5.9B). Ainsi, le positionnement des eaux souterraines sur le côté gauche ou droit

du diagramme dépend des propriétés du sol et de l'aquifère. Si les minéraux carbonatés dominent, la chimie des eaux souterraines sera associée à un faible rapport $(Na+K)/(Na+K+Ca)$, tandis que dans d'autres zones dominées par les silicates, le rapport est plus élevé (Banks et Frengstad, 2006). Dans cette étude, tous les points d'échantillonnage se situent autour du pôle roche suggérant que l'altération des roches est le principal facteur contrôlant la chimie des eaux souterraines. On note aussi que les différents faciès géochimiques s'alignent vers ce pôle, du moins (Ca-HCO₃) au plus (Na-HCO₃ et Na-Cl) minéralisés avec le mélange-cation-HCO₃ et Ca-Cl comme faciès de transition.

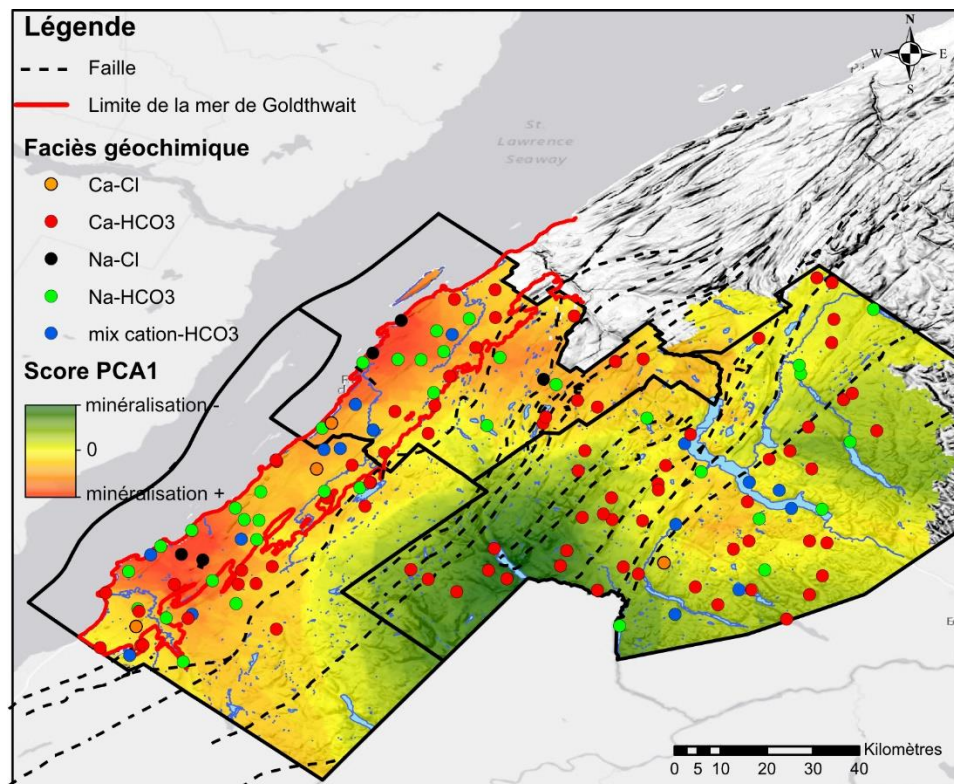


Figure 5.10-Interpolation par méthode de krigeage de la position sur l'axe PCA1 de la PCA représentant le degré de minéralisation des eaux souterraines (en vert les eaux les moins minéralisées et en rouge les eaux les plus minéralisées). Les faciès géochimiques ont aussi été rapportés.

La figure 5.10 présente l'interpolation spatiale de l'axe PCA1 mettant en évidence deux modèles régionaux de distribution:

- Le premier est situé dans les hauts plateaux appalachiens avec une différence marquée entre les zones de haute altitude et les fonds de vallées. Les eaux

- souterraines les moins minéralisées (en vert) se trouvent en altitude et sont principalement liées au dépôt de till dans des aquifères non confinés à semi-confinés. À l'inverse, les eaux les plus minéralisées (de jaune à orange) se trouvent dans les vallées comblées de sédiments fluvio-glaciaires, près de rivières et/ou de lacs, dans des aquifères semi-confinés à confinés.
- Le deuxième est lié à une augmentation de la minéralisation des eaux souterraines entre les hauts plateaux appalachiens et la plaine côtière le long de l'estuaire (du vert au rouge) avec un alignement spécifique parallèle à la côte. La zone la plus minéralisée est située sous la limite de la mer de Goldthwait et est liée à des aquifères confinés sous une épaisse couverture d'argile. Les zones les plus minéralisées (en rouge) correspondent aussi préférentiellement à des zones de dépassement des normes sur la qualité des eaux souterraines (Section 6.2).

La distribution spatiale des processus semble donc assez théorique à l'échelle régionale et ressemble à ce qui a été observé dans d'autres régions le long du fleuve, notamment dans le nord-est du Bas-Saint-Laurent (Buffin-Bélanger *et al.*, 2015; Chaillou *et al.*, 2018). À une échelle d'observation plus locale, cependant, la figure 5.10 révèle aussi l'hétérogénéité de la distribution spatiale des faciès des eaux souterraines, avec des faciès Ca-HCO_3 et Na-HCO_3 situés très près l'un de l'autre. L'évolution des eaux souterraines pourrait ne pas être aussi linéaire que le suggère l'ACP et le graphique de Gibbs et des processus locaux ponctuels pourraient aussi contrôler la géochimie des eaux souterraines.

5.5.3. Les principaux processus géochimiques

Les relations entre les faciès peuvent être étudiées à l'aide de divers graphiques géochimiques. Les graphiques jugés les plus pertinents sont présentés dans cette section selon différentes thématiques dans le but d'appuyer des hypothèses sur les mécanismes contrôlant l'hydrogéochimie régionale. Dans la section suivante, nous allons explorer plusieurs mécanismes réactionnels pour expliquer l'évolution des faciès géochimiques.

Ces mécanismes incluent la dissolution des minéraux carbonatés, les échanges cationiques et la salinisation.

La dissolution des carbonates

Le faciès Ca-HCO_3 reflète la première étape d'enrichissement de l'eau de recharge qui s'infiltre dans l'aquifère. Cloutier *et al.* (2006) suggéraient déjà que la dissolution de la calcite est active dans la zone de recharge des Appalaches. De même, Chaillou *et al.* (2018) proposaient dans le NEBSL que la dissolution de la calcite, et plus probablement de la dolomite, contrôlait les premières étapes de la minéralisation après la recharge dans les hauts plateaux appalachiens. La majorité des échantillons d'eau souterraine ayant des faciès Ca-HCO_3 et de mélange cation- HCO_3 présentent des indices de saturation (IS) de la calcite et de la dolomite allant de sous-saturés à presque l'équilibre, tandis que les échantillons du faciès Na-HCO_3 ont des indices de saturation de la calcite et de la dolomite presque à l'équilibre à sursaturés (figure 5.11A). Un cadre plus général du processus chimique affectant les eaux souterraines peut aussi être déterminé par le diagramme $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg})$ vs $\text{SO}_4/(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3)$. La plupart des échantillons se situent dans le domaine calcite - dolomite suggérant que la composition de l'eau souterraine est principalement contrôlée par la dissolution conjointe de ces deux minéraux carbonatés (figure 5.11B).

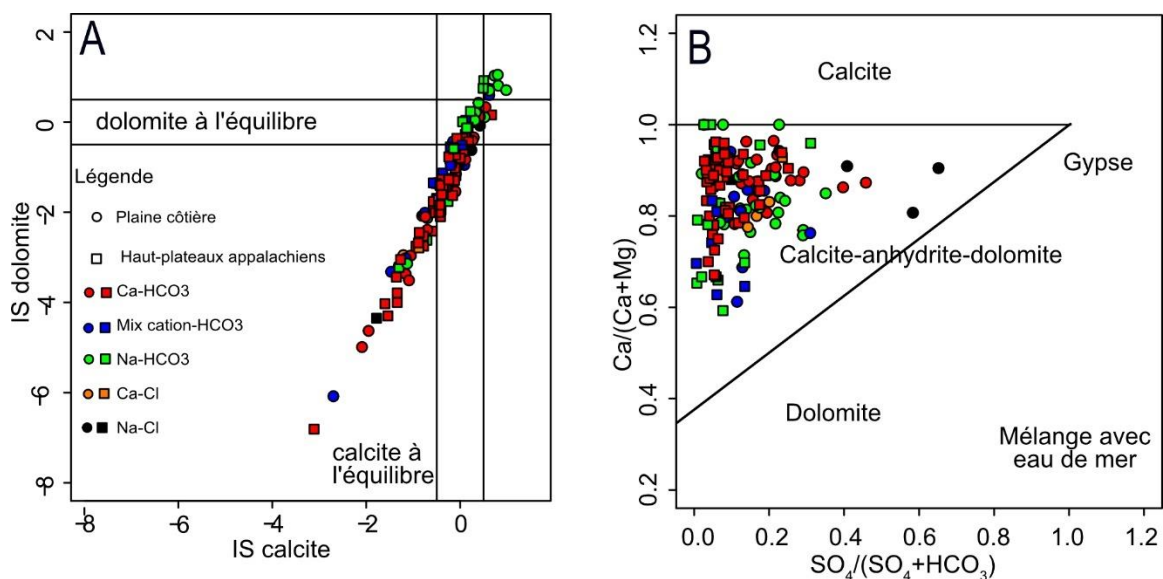


Figure 5.11: A) Indice de saturation (IS) des minéraux carbonatés pour les différents faciès géochimiques. B) Graphique $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg})$ vs $\text{SO}_4/(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3)$ montrant la dissolution des minéraux influençant la chimie des eaux souterraines.

Échanges cationiques Na-Ca

Les échanges cationiques entre Ca^{2+} des eaux souterraines avec Na^+ des minéraux silicatés représentent l'évolution naturelle des eaux souterraines. Cette évolution chimique est caractérisée à la fois par une augmentation de la concentration en Na, mais aussi une diminution en Ca. Ce processus est aussi associé à une augmentation des valeurs de TDS et de pH (tableau 5.10). Ces résultats suggèrent une minéralisation des eaux souterraines avec échange d'ions $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$, où le Ca^{2+} dans l'eau échange avec 2 ions Na^+ issus des minéraux silicatés dans les aquifères semi-confinés à confinés. Le mélange cation- HCO_3 est un faciès intermédiaire entre ces deux entités. Cette évolution est cohérente avec des valeurs de pH inférieures à 8 caractérisant les aires de recharge préférentielles avec le faciès Ca-HCO_3 vers des valeurs de pH supérieures à 8 pour le faciès Na-HCO_3 (Thorstenson *et al.*, 1979; Henderson, 1984; Cloutier *et al.*, 2006).

Salinisation des eaux souterraines : Na-Cl et Ca-Cl

Les faciès Na-Cl et Ca-Cl représentent les eaux les plus évoluées dans la région d'étude. Ils sont principalement présents le long de la plaine côtière et se caractérisent par une salinisation liée à un enrichissement en ions chlorure (figure 5.12A). Comme discuté dans Cloutier *et al.* (2010), l'augmentation de la salinité des eaux souterraines peut résulter de différents processus, tels que l'interaction eau-roche le long du trajet d'écoulement, la dissolution des roches évaporitiques, l'intrusion d'eau de mer ancienne ou actuelle, la diffusion de solutés à partir d'un aquitard contenant de l'eau interstitielle saline, et la contamination anthropique, comme le déglacage des sels de voirie ou des intrants agricoles.

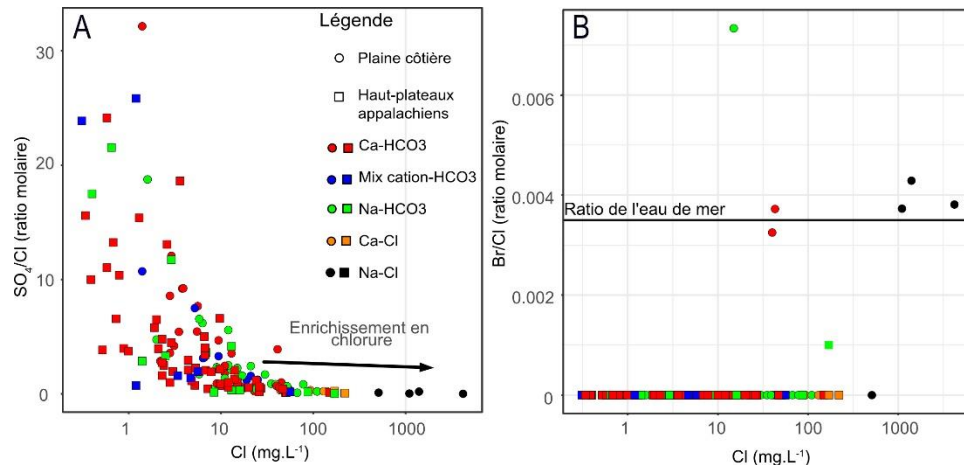


Figure 5.12-Rapports A) brome sur chlore et B) sulfate sur chlore (rapport massique) en fonction de la concentration en ions chlorure (en mg/L). Ici, les ions chlorure sont considérés comme conservatifs et sont utilisés comme traceurs de la salinisation. Le rapport théorique Br/Cl de l'eau de mer actuelle (estuaire du Saint-Laurent) est rapporté. Les différents faciès géochimiques sont aussi présentés.

La proximité avec le fleuve ainsi que le contexte géologique du Bas-Saint-Laurent pourraient expliquer la salinisation des eaux souterraines situées dans la plaine côtière. En se référant aux données du système d'information hydrogéologique (SIH), on constate que 15 % des 8802 puits répertoriés dans le Bas-Saint-Laurent sont d'ailleurs situés à moins de 1 km de la côte et 40% dans les premiers 5 km. Dans les puits privés visités, en 2019 et 2020, les dépassements dans la plaine côtière représentent 8 % (soit 19 puits sur 228 (faciès Ca-Cl et Na-Cl; voir figure 5.12B et section 5.5.2). Localement, nous ne pouvons exclure une salinisation par des embruns ou un déplacement sporadique du biseau salé qui expliqueraient que quelques échantillons présentent des rapports Br/Cl proches de celui des eaux du fleuve Saint-Laurent (calculs théoriques basés sur la salinité des eaux côtières dans le secteur de Kamouraska). À l'échelle régionale cependant, les sources de chlorures les plus probables sont liées aux vestiges de la mer de Goldthwait. Ces sédiments, déposés dans un contexte marin, contiennent encore des résidus de sels qui pourraient être lessivés et mobilisés vers les aquifères sous-jacents (figure 5.12).

Dissolution des gypses

Des analyses statistiques plus poussées incluant les éléments majeurs et les mineurs ont permis de définir d'autres processus géochimiques au sein d'un même faciès. Par exemple, ces analyses ont permis la distinction d'un sous-groupe dans le faciès Ca-HCO_3 correspondant à un faciès Ca-SO_4^{2-} . La présence de ce faciès indique que la dissolution du gypse est aussi impliquée dans la géochimie régionale des eaux souterraines. Les échantillons de ce faciès sont principalement localisés dans les aquifères au roc confiné sous les dépôts d'argile de la mer de Goldthwait. Leur localisation suggère une infiltration d'eau moderne à proximité malgré le confinement de l'aquifère par les argiles de la mer de Goldthwait.

5.5.4. La signature isotopique régionale

Les isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$

Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène (ou Deutérium) de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) sont couramment utilisés en hydrogéologie pour déterminer l'origine de l'eau ainsi que sa dynamique (AIEA, 2008). Quatre pluviomètres adaptés des modèles développés par Gröning *et al.* (2012) ont été installés sur notre territoire pour recueillir les précipitations liquides et solides (tableau 5.11). Les précipitations ont été échantillonnées mensuellement d'octobre 2018 à février 2020, et ont été préservées selon le protocole utilisé pour les analyses isotopiques des eaux souterraines. Ces données ont servi au développement d'une droite météorique locale (DML) de la région à l'étude. Bien que préliminaire (car seulement basée sur une trentaine d'échantillons), elle nous donne cependant une idée de la signature isotopique des pôles « pluie » et « neige » dans notre secteur d'étude. La figure 5.13 présente la DML ainsi que les échantillons d'eau souterraine. La composition isotopique moyenne des échantillons d'eau souterraine est de $-12,4 \pm 0,7 \text{ ‰}$ et de $-88,5 \pm 4,3 \text{ ‰}$ respectivement pour le $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$. La droite météorique locale est définie par $\delta^2\text{H} = 7,64 \times \delta^{18}\text{O} + 5,83$ qui est similaire à la droite météoritique mondiale ($\delta^2\text{H} = 8,13 \times \delta^{18}\text{O} + 10,38$) et celle du PACES-NEBSL ($\delta^2\text{H} = 7,55 \times \delta^{18}\text{O} + 7,7$; Chaillou *et al.*, 2018). La signature isotopique moyenne

des deux pôles de précipitation est de $-10,6 \pm 3,7 \text{ ‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) et $-75,2 \pm 28,9 \text{ ‰}$ ($\delta^2\text{H}$) pour la pluie et $-19,2 \pm 2,3 \text{ ‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) et $-140,8 \pm 15,9 \text{ ‰}$ ($\delta^2\text{H}$) pour la neige.

Tableau 5.11-Localisation et données sur les analyses isotopiques des échantillons de précipitations récoltés à l'aide des pluviomètres sur le territoire KRT.

Localisation des pluviomètres	Altitude (m)	Nb total d'échantillon	$\delta^{18}\text{O}$ pluie (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ neige (‰)	$\delta^2\text{H}$ pluie (‰)	$\delta^2\text{H}$ neige (‰)
Saint-Germain	17	6	-8,2	-21,0	-58,1	-154,4
Témiscouata-sur-le-Lac	208	17	-9.6	-18.5	-67,0	-135,7
L'Isle-Verte	30	3	-10,4	ND	-73,1	ND
St-Pâcome	43	7	-9.6	ND	-67,6	ND

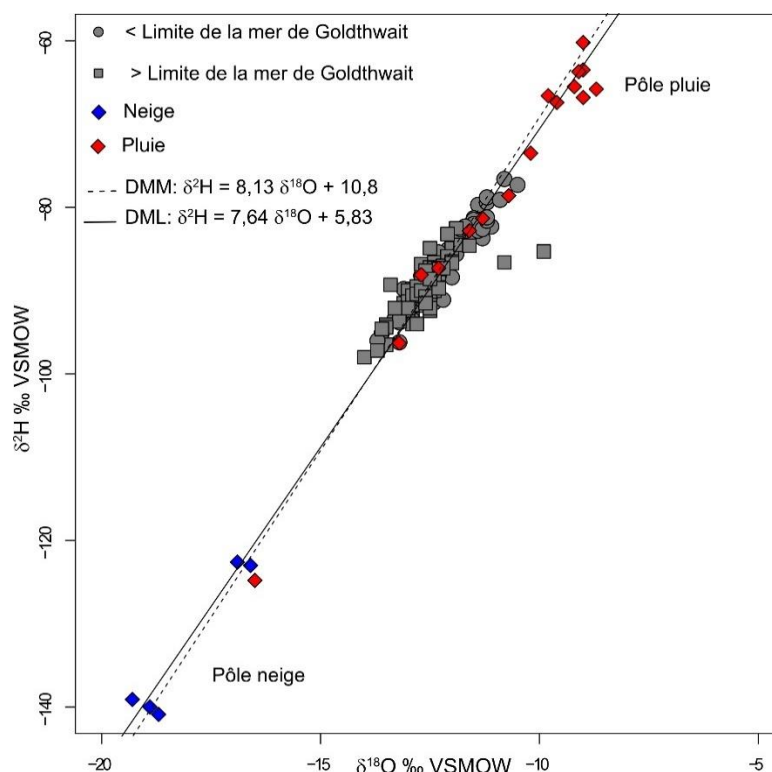


Figure 5.13-Composition isotopique de l'eau souterraine et des précipitations solides et liquides dans la région KRT comparée à la droite météorologique mondiale (DMM; Craig, 1961) et à la droite météorologique locale (DML).

Les échantillons d'eau souterraine s'alignent parfaitement sur la droite météorologique locale, 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 peu ou pas de différence entre la composition isotopique des eaux souterraines entre les puits situés en dessous

et en dessus de la limite marine de la mer de Goldthwait, indiquant une origine commune de la source de la recharge et peu d'évaporation au sein du système. L'absence d'une composition isotopique distincte dans les échantillons d'eaux souterraines suggère que l'infiltration et la recharge des aquifères se sont produites dans les conditions climatiques modernes. De plus, la dispersion des points se rapprochant davantage du pôle pluie, la recharge serait principalement contrôlée par les précipitations liquides plutôt que la fonte de la neige. Ce résultat est surprenant, car les taux de recharge moyens modélisés sont beaucoup plus importants au printemps (fonte printanière avec des taux moyens autour de 35 mm/mois) qu'à l'automne (≈ 20 mm/mois; figure 5.5). Dans le NEBSL, la signature moyenne des eaux souterraines établie en 2014 était plus appauvrie et bien centrée autour de la moyenne des précipitations solides. Dans le NEBSL, cependant, la majorité des eaux souterraines consommée se retrouvent dans des aquifères de surface ou granulaires. Dans le KRT, les aquifères sont globalement plus profonds et au roc. Le contexte hydrostratigraphique pourrait expliquer que les précipitations liquides puissent dominer la recharge dans cette région. Nous ne pouvons cependant pas exclure une simple variabilité annuelle des précipitations liquides et solides comme observée sur les 12 années modélisées à la figure 5.5.

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

Le carbone inorganique dissous dans les eaux souterraines est un paramètre du système des carbonates et un composé clé dans les mécanismes 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 (minéraux de calcite et dolomite) 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 verticale des hydrocarbures, notamment le méthane (Pinti *et al.* 2014; Raynault *et al.* 2014).

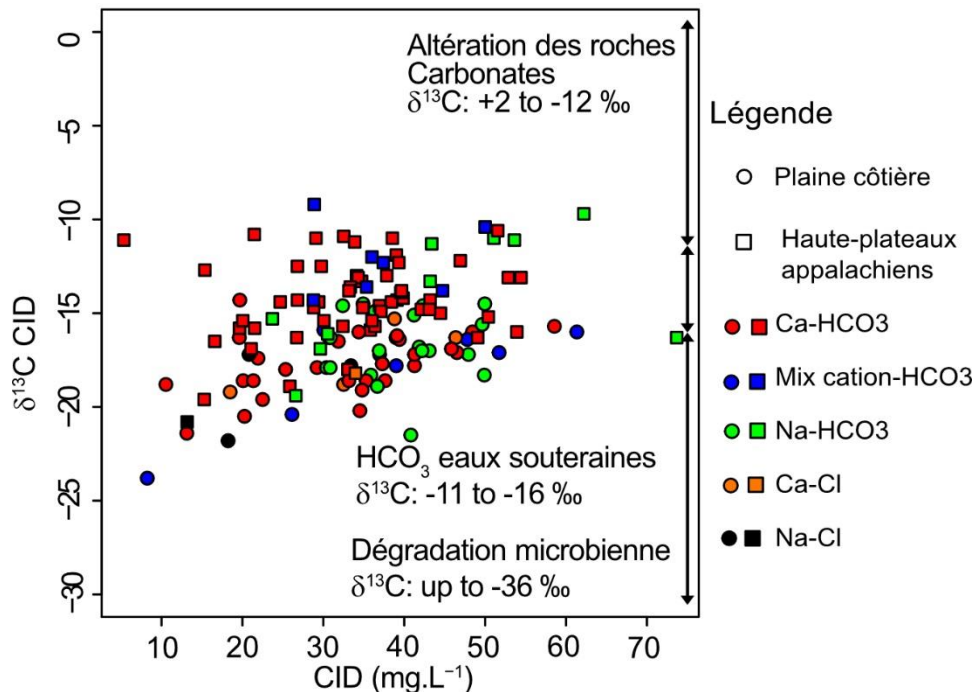


Figure 5.14 - $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ en fonction de la concentration en CID pour les échantillons du PACES-KRT. Les faciès géochimiques des échantillons sont présentés et une distinction est faite entre les échantillons prélevés dans la plaine côtière et ceux prélevés dans les hauts plateaux appalachiens. Les domaines de l'origine du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ sont définis dans Cane et Clark (1999).

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). Dans ce projet, 141 échantillons ont été analysés pour le $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ (figure 5.14) en 2019. Les échantillons collectés en 2020 n'ont pas encore été analysés. Les données présentées dans la figure 5.14 sont très variables et vont de $-26,5\text{ ‰}$ à $-9,2\text{ ‰}$. Plus de 50% des échantillons ont un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ compris entre $-16,0\text{ ‰}$ et $-10,0\text{ ‰}$. Les faciès Ca-HCO_3 , mélange cation- HCO_3 et Na-HCO_3 ont des valeurs moyennes similaires de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ autour de $-15,5\text{ ‰}$ (tableau 5.10). Les faciès Ca-Cl et Na-Cl affichent des valeurs plus négatives comprises en moyenne entre $-17,5$ et $-20,8\text{ ‰}$ respectivement (tableau 5.10). De plus, les échantillons situés dans les hauts plateaux appalachiens affichent des valeurs $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ moins appauvries que les échantillons situés dans la plaine côtière (80 % vs 25 % des échantillons d'eau souterraine ont un $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ compris entre $-16,0\text{ ‰}$ et $-10,0\text{ ‰}$, respectivement). Ces valeurs nous

indiquent que la majorité du CID retrouvée dans les eaux souterraines des hauts plateaux appalachiens est principalement contrôlée par la dissolution des carbonates. Ces résultats sont cohérents avec les données géochimiques. Les valeurs plus négatives du $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ dans la plaine côtière suggèrent que la dégradation de la matière organique contenue dans le sol contribue davantage à la signature en CID des eaux souterraines.

L'isotope 222 du radon (^{222}Rn)

Le radon (^{222}Rn) est un isotope dérivé de la chaîne de désintégration de l'uranium (^{238}U) et plus spécifiquement de la désintégration α de l'isotope 226 du radium (^{226}Ra) (radium) adsorbé sur les minéraux des roches et sédiments. Le radon lui-même se désintègre rapidement en polonium (^{218}Po) avec une demi-vie de 3,8235 jours. L'activité en ^{222}Rn dans l'eau résulte de l'activité en ^{226}Ra dans l'eau, de l'émanation des roches environnantes et peut varier dans chaque unité géologique, voire différer d'un puits à l'autre, à proximité et au sein d'une même unité géologique (Przylibski, 2000). En plus des facteurs géologiques, la distribution du ^{222}Rn dans les eaux souterraines dépend également du mélange des eaux souterraines avec des écoulements plus superficiels ou des écoulements d'eaux plus profonds, du temps de séjour en subsurface, et de la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines (Przylibski et Zebrowski, 1999). On ne sait cependant pas si les activités de ^{222}Rn dans l'aquifère rocheux sont contrôlées par des schémas de distribution spécifiques et s'il y a des variations répondant à la minéralogie de l'aquifère, la distance par rapport à la zone de recharge, le type de roches sédimentaires sous-jacentes, le temps de séjour, etc. (Pinti *et al.*, 2014). Ces informations sont néanmoins essentielles pour les questions de santé publique, mais aussi pour utiliser la ^{222}Rn comme traceur à court terme des eaux souterraines afin de fournir des informations sur le trajet d'écoulement et les processus de mélange des eaux souterraines.

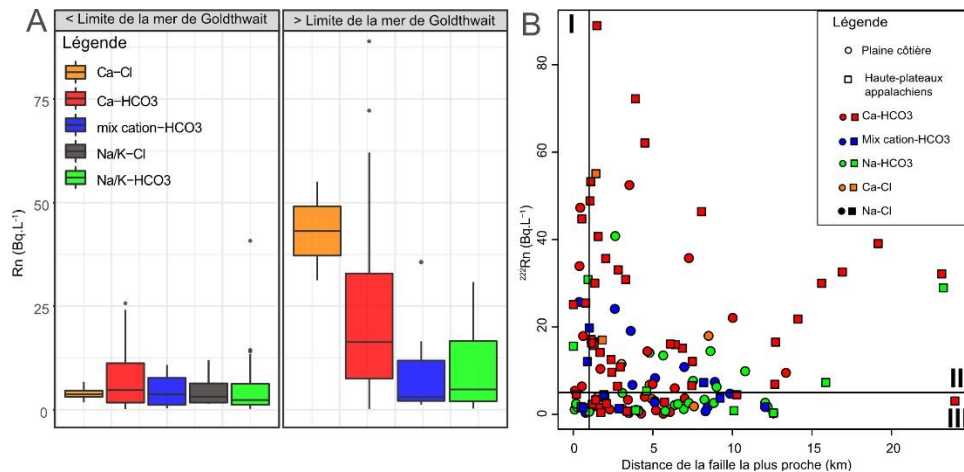


Figure 5.15-A) Boîte à moustache des activités du ^{222}Rn en fonction des faciès géochimiques au-dessus et en dessous de la limite marine. B) Graphique montrant l'activité du ^{222}Rn en fonction de la proximité avec une faille.

Il existe encore peu d'études sur le radon dans l'eau souterraine au Québec et au Canada (Berthot et al., 2016; Biehler et al., 2020; Chaillou et al., 2018; Pinti *et al.*, 2013, 2014). À l'exception de l'étude de Pinti *et al.* (2014), aucune étude ne fournit d'analyse spatiale des activités de la nappe phréatique à l'échelle régionale. Pinti *et al.* (2014) ont constaté que l'activité moyenne de ^{222}Rn dans les aquifères des Appalaches et la plateforme du Saint-Laurent étaient respectivement de 31,3 et 16,1 Bq/L. Nos données de radon, comprises entre quelques Bq à 88 Bq/L, sont légèrement inférieures avec des valeurs médianes dans la plaine côtière et les hauts plateaux appalachiens de 3,3 et de 15,8 Bq/L respectivement (figure 5.15A). Les activités de ^{222}Rn varient aussi selon les faciès géochimiques (figure 5.15A). Dans la plaine côtière, les activités médianes du ^{222}Rn sont assez similaires entre les faciès géochimiques, variant de 2,3 Bq/L pour le faciès Na-HCO₃ à 4,7 Bq/L pour le faciès Ca-HCO₃. Dans les hauts plateaux appalachiens, les différents faciès ont des activités plus variables. Les activités en radon sont maximales pour les faciès Ca-Cl et Ca-HCO₃ avec des valeurs médianes atteignant 43,1 Bq/L et 16,3 Bq/L respectivement. Elles sont minimales pour le type cations-mixe, avec des valeurs de 3 Bq/L (figure 5.15A). Le faciès Ca-HCO₃ correspond aux zones de recharge dans les hauts plateaux. Ainsi, en suivant la trajectoire de l'écoulement des eaux souterraines à l'échelle régionale, l'activité du radon diminue depuis la zone de recharge vers la plaine côtière. Une telle diminution a aussi été observée entre les Appalaches et la plateforme du Saint-Laurent, dans les régions entre Québec et Montréal et a été

attribuée à la différence de concentration en uranium entre les différentes lithologies de ces deux zones (Roireau et Zikovsky, 1989; Pinti *et al.*, 2014). Dans la région KRT, nous ne pouvons pas exclure que la minéralogie soit aussi le principal facteur influençant l'activité de radon dans l'eau. Cependant, nous pouvons aussi supposer que les activités en ^{222}Rn sont constantes dans les eaux souterraines en raison de l'équilibre séculaire, et que des déséquilibres se produisent dans les teneurs en radionucléides si l'écoulement des eaux souterraines est supérieur au taux de désintégration ou si un processus de dilution par des eaux pauvres en radon se produit au cours de l'écoulement.

La figure 5.15A permet de décrire l'activité du ^{222}Rn en fonction du degré de minéralisation des eaux souterraines. Ce graphique permet de mettre en évidence que moins les eaux sont minéralisées, plus la variabilité de l'activité du ^{222}Rn est grande. En effet, les puits correspondant au faciès Ca-HCO_3 , présents dans un contexte non confiné à semi-confiné, peuvent être associés à des eaux à l'équilibre séculaire (activité élevée du ^{222}Rn). À l'inverse, les eaux plus récentes ne sont pas encore à l'équilibre séculaire révélant des activités en ^{222}Rn plus faibles. Cependant, les eaux plus minéralisées, associées à des contextes semi-confinés à confinés, présentent des valeurs plus faibles de l'activité en ^{222}Rn , ce qui suggère une dilution avec des eaux plus récentes par infiltration et/ou un mélange entre différents types d'eaux.

Les structures géologiques semblent jouer un rôle important dans l'émanation et le transport du radon. Des activités élevées du ^{222}Rn dans les eaux souterraines et le sol ont été relevées proche de failles ou de fractures (Asadi Mohammad Abadi *et al.*, 2015; Seminsky and Seminsky, 2019). La zone KRT s'est formée au cours de l'orogénèse acadienne et taconienne, résultant en un substratum rocheux fortement déformé et faillé. Par coïncidence, des activités du ^{222}Rn relativement plus élevées dans le KRT ont été observées près de certaines failles (figure 5.15B). Par conséquent, l'activité élevée de ^{222}Rn observée dans les eaux souterraines pourrait être causée par l'influence de failles actives.

5.6. Synthèse hydrogéochimique régionale

Sur la base de nos résultats et de l'identification des principaux processus hydrogéochimiques identifiés selon la limite de la mer de Goldthwait, un modèle conceptuel géochimique régional a été proposé le long d'une ligne d'écoulement à partir de la zone de recharge à l'aide de deux coupes stratigraphiques (C et F) décrites dans la Section 4.3 (figure 5.16). La majorité des échantillons proches de la ligne de séparation de l'écoulement des eaux souterraines provient de puits de l'aquifère rocheux en condition de nappe libre. Les échantillons ont une signature géochimique à caractère bicarbonaté-calcique (Ca-HCO_3) (Section 5.5.2). Ce type d'eau est l'expression d'une eau peu évoluée et peu minéralisée provenant d'une recharge récente. Les résultats du bilan hydrique indiquent que la recharge le long de la ligne de séparation de l'écoulement est significative (entre 200 et 250 mm/an; section 5.3.2). Le roc, à cet endroit, est principalement composé de roches carbonatées qui affleurent dans des zones de haute altitude ou sont recouvertes d'une couche mince et discontinue de till. L'eau de pluie s'infiltré et se minéralise faiblement par altération des roches carbonatées et évolue vers le faciès Ca-HCO_3 dans les zones de recharge. Lors de l'infiltration à travers ce substrat rocheux fortement fracturé, les activités de ^{222}Rn augmentent en réponse aux concentrations en uranium et/ou de la proximité d'une faille active. L'évolution des eaux souterraines est assez différente selon l'écoulement des eaux souterraines vers la plaine côtière ou vers les vallées et les lacs des plateaux appalachiens.

La **plaine côtière (coupe C-C'**; figure 5.16) est caractérisée par une couverture quasi continue des argiles de la mer de Goldthwait pouvant atteindre localement jusqu'à 50m d'épaisseur. Ces argiles jouent le rôle d'aquitard et limitent la recharge ($< 120\text{mm/an}$) des aquifères dans la plaine côtière, mais aussi diminuent leur vulnérabilité (indice DRASTIC faible à moyen, de 60 à 140). On retrouve le faciès Na-HCO_3 le long de l'écoulement vers le nord, depuis la zone de recharge vers l'estuaire du Saint-Laurent. Au cours du transit, l'échange cationique $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^{2+}$ domine le processus de minéralisation. Les eaux souterraines jeunes et faiblement minéralisées vont évoluer progressivement vers le faciès mix cation- HCO_3 et finalement Na-HCO_3 dans les aquifères confinés sous les dépôts d'argile de la mer de Goldthwait. Au cours de l'écoulement, en plus de la minéralisation, les eaux souterraines s'appauvrissent en radon. Cependant, on retrouve sporadiquement 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. Nous supposons que la présence de monadnock, massifs isolés dans la plaine côtière, agit probablement comme une zone de recharge locale où les eaux jeunes et peu minéralisées s'infiltrant plus profondément se mélangeant à l'écoulement régional. La présence concomitante des faciès Ca-HCO_3 , cation mixte- HCO_3 et Ca-SO_4^{2-} avec des valeurs de radon plus élevées dans la plaine côtière sont en accord avec les processus de mélange comme expliqué précédemment. Finalement, on retrouve ponctuellement la présence du faciès Na-Cl le long de la côte indiquant la présence d'eaux souterraines salines provenant d'un probable mélange avec le sel ou de la saumure piégée dans les dépôts d'argile de la mer de Goldthwait.

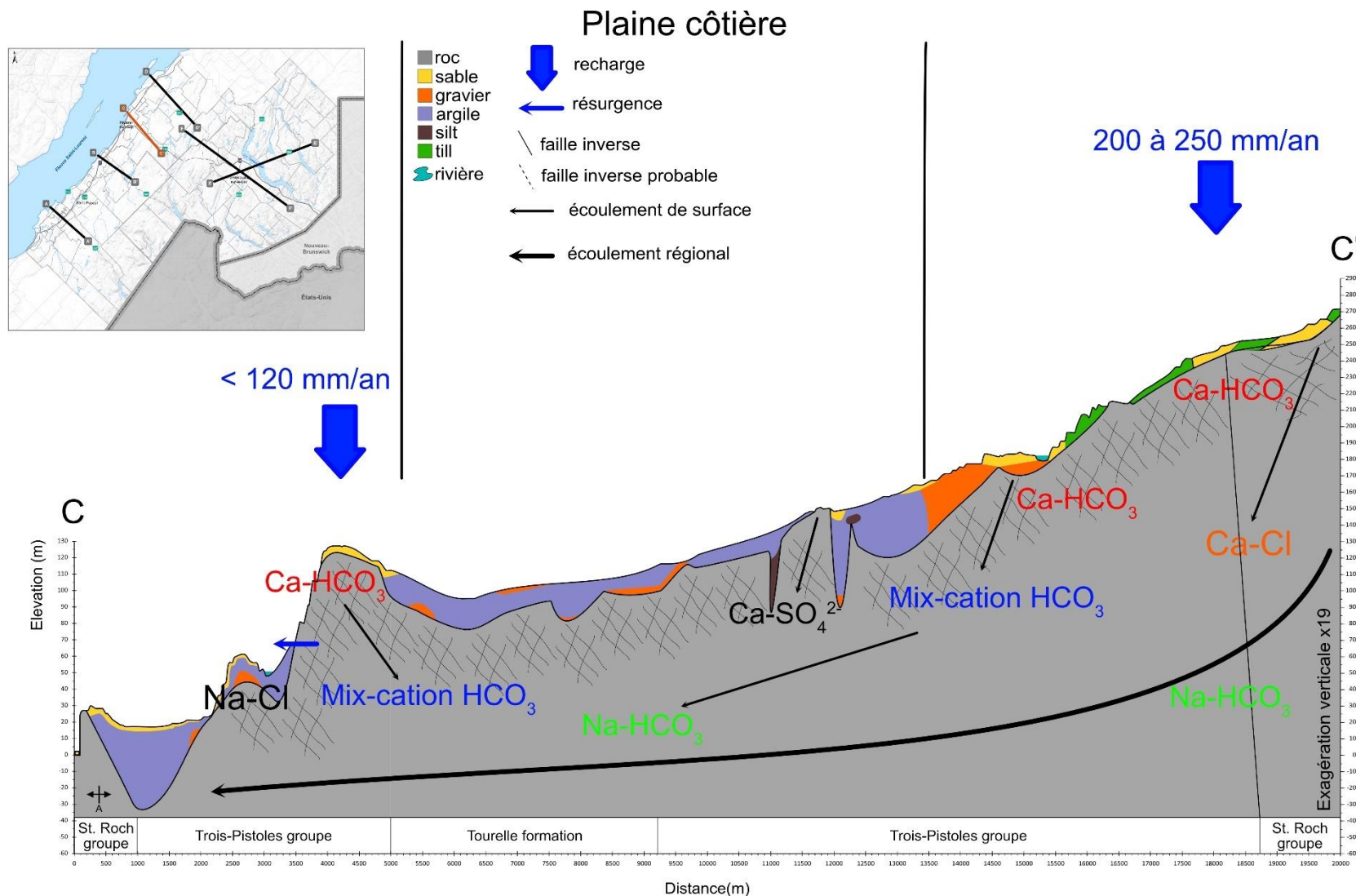


Figure 5.16 : Modèle conceptuel géochimique régional pour l'évolution des eaux souterraines ayant un écoulement sud-nord vers la plaine côtière et l'estuaire du Saint-Laurent.

Dans les plateaux appalachiens (coupe F-F'; figure 5.17), 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 plateaux appalachiens sont la principale zone de recharge du territoire à l'étude. Cependant, au sud de la faille de Témiscouata la présence de till continue et les pentes plus fortes favorisent le ruissellement de surface ce qui diminue la recharge. En effet la recharge estimée au nord de la faille de Témiscouata est de 200 à 250 mm/an alors qu'au sud elle est de 100 mm/an. Selon l'indice DRASTIC, la vulnérabilité de l'aquifère rocheux sur le territoire des plateaux appalachiens est de faible à moyen (60 à 140, livrable 22). Localement, l'indice DRASTIC indique une vulnérabilité significative avec des valeurs autour de 150. Le faciès géochimique Ca-HCO₃ est dominant dans la région. Le roc ainsi que les couches minces de till non confiné permettent une recharge de l'eau souterraine. La dissolution des roches carbonatées est le principal processus se produisant dans le plateau appalachien. Au cours de l'écoulement des eaux souterraines, l'échange cationique Ca²⁺-Na²⁺ domine le processus de minéralisation et l'eau acquiert le faciès mixte cation-HCO₃ ou Na-HCO₃ dans les vallées. Pendant le transport, le ²²²Rn diminue, car la production locale n'égale pas la décroissance du radon. Il y a peu ou pas de mélange avec les eaux souterraines pauvres en radon dans cette zone sans doute expliquée par la faible distance entre la zone de recharge et les vallées qui occasionne un court temps de séjour des eaux souterraines. La présence sporadique du faciès Ca-Cl associé à des activités de radon élevées à proximité de failles indique que, localement, les eaux souterraines minéralisées riches en radon peuvent se mélanger avec des eaux souterraines moins minéralisées.

Plateaux appalachiens

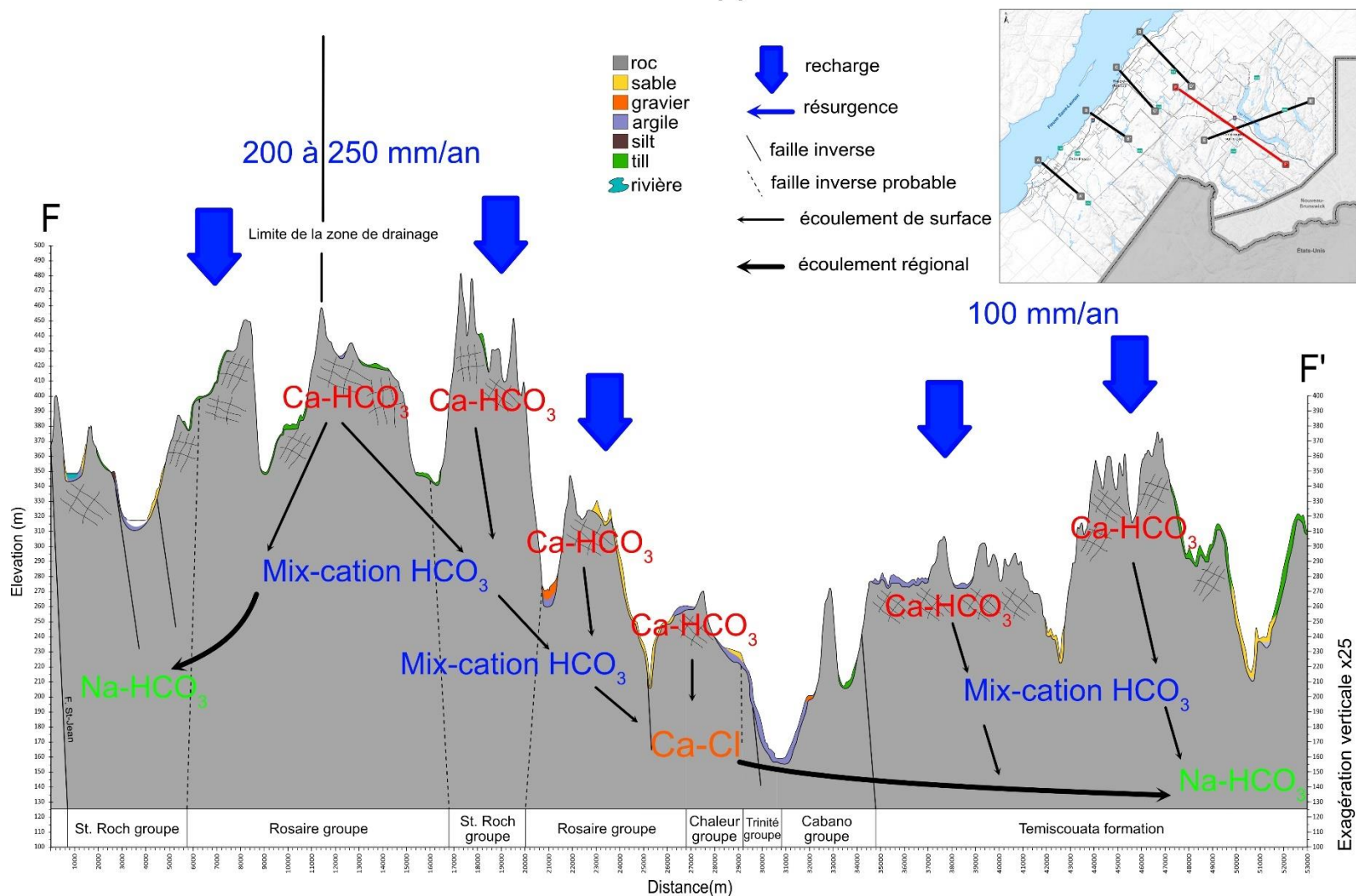


Figure 5.17 : Modèle conceptuel géochimique régional pour l'évolution des eaux souterraines ayant un écoulement nord-sud, vers les vallées appalachiennes.

6. Ressource en eau souterraine

6.1. Utilisation de l'eau souterraine

Les besoins en eau d'une population peuvent être comblés par différentes sources, selon la nature des usages, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. Alors que dans la plupart des villes et villages la population a accès à un réseau alimenté par des réseaux municipaux, en dehors des villes les habitants dépendent généralement de puits privés. Dans le cadre de ce projet, les données provenant d'organismes gouvernementaux (MELCC, MAMH, MAPAQ, Statistiques Canada) ont été compilées par municipalité afin d'établir une consommation de l'eau selon trois secteurs – résidentielle, agricole et ICI (institution, commerce, industrie) – et selon la provenance de l'eau – souterraine ou de surface (lac, rivière, souterraine considérée de surface). La figure 6.1 résume la méthodologie utilisée afin d'établir une estimation de la consommation totale en eau sur le territoire.

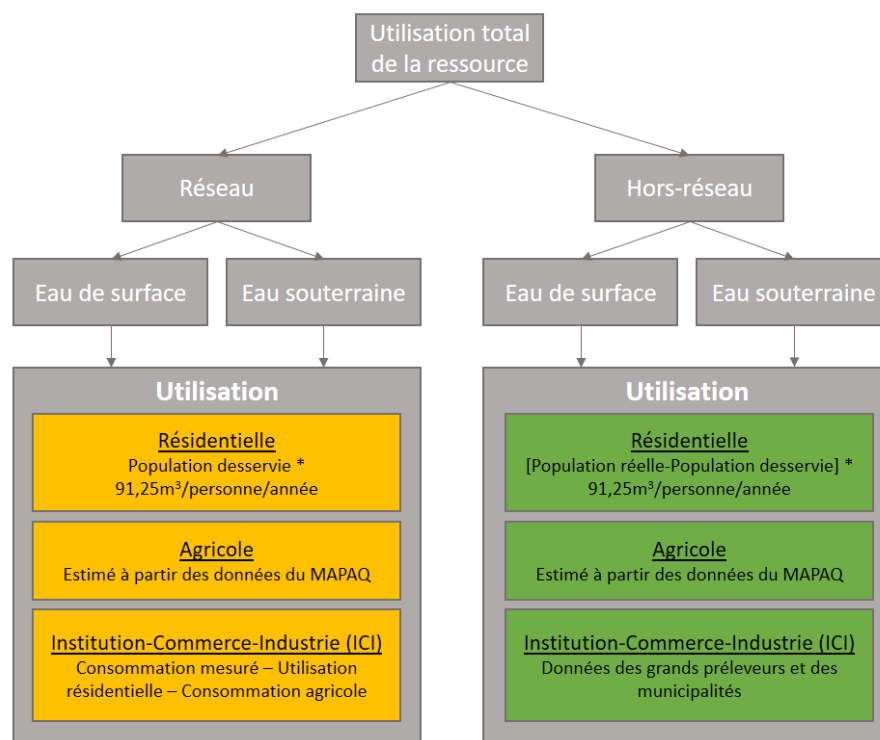


Figure 6.1-Schématisation de la méthodologie utilisée pour le calcul de l'utilisation de la ressource en eau

Les réseaux municipaux desservent près de 75 % de la population du territoire. La majorité des municipalités munies d'aqueduc s'approvisionnent en eau souterraine (vingt-deux (22) municipalités sur 34), mais ne desservent que 23 % de la population. Ceci s'explique, car les villes les plus peuplées du territoire – qui représentent 40% de la population totale – s'approvisionnent en eau de surface, c'est-à-dire Rivière-du-Loup, Témiscouata-sur-le-Lac et La Pocatière. En considérant que les demeures du territoire non connectées aux réseaux d'aqueduc s'approvisionnent en eau souterraine, l'approvisionnement résidentiel en eau potable se fait donc à parts égales entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Le tableau 6.1 résume les différents types d'approvisionnements par MRC.

Tableau 6.1-Source d'approvisionnement en eau par MRC

MRC	Eau souterraine		Eau de surface		Hors réseau
	Nb de municipalité	% population par MRC	Nb municipalité	% population par MRC	Population sur puits privé
Kamouraska	6	23	6	42	35
Rivière-du-Loup	9	26	1	60	14
Témiscouata	8	26	4	36	38

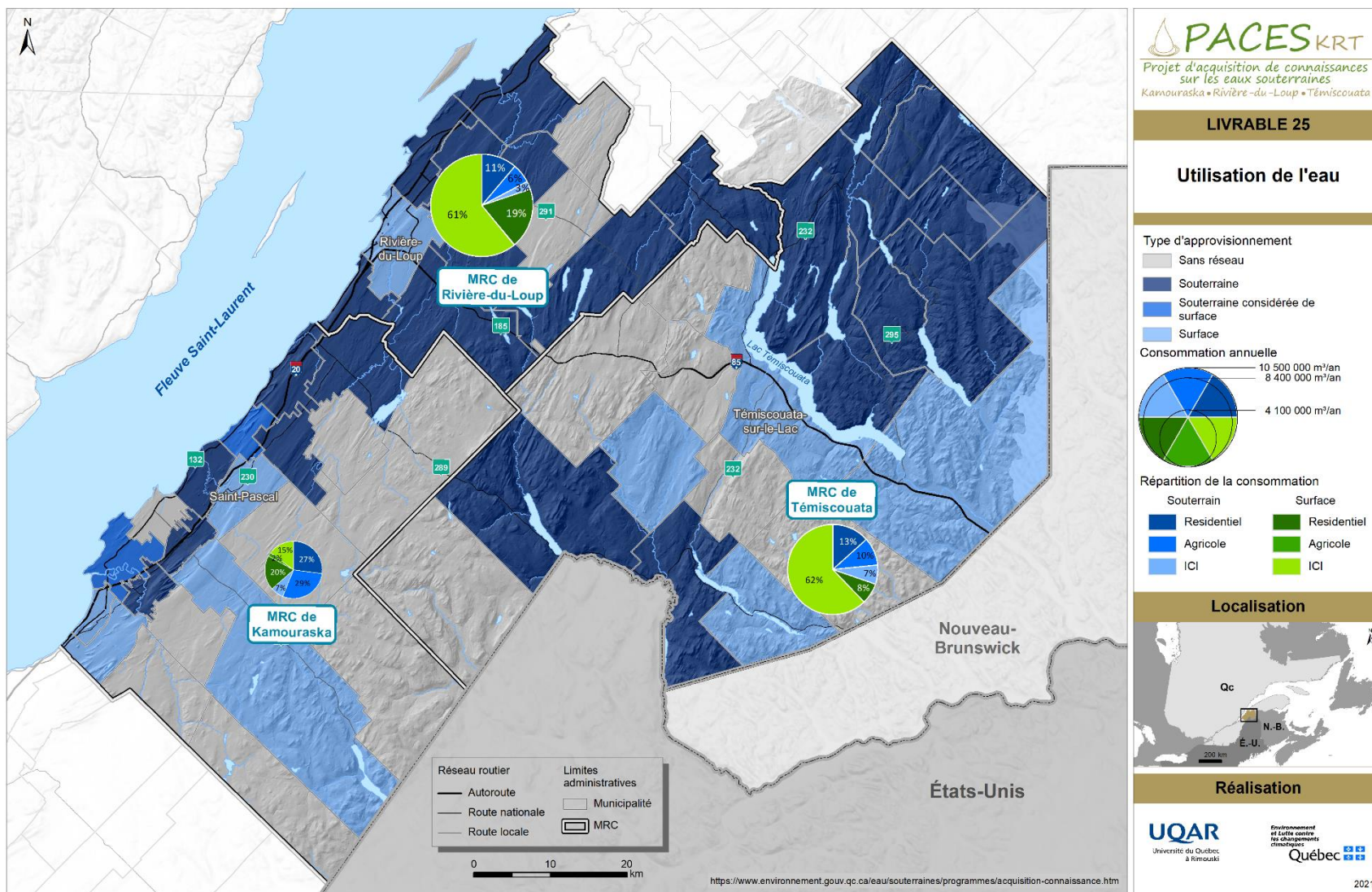
En plus des réseaux municipaux, il existe trois réseaux privés desservant une quarantaine de personnes chacun dans les municipalités de Rivière-Ouelle, Sainte-Anne-de-la-Pocatière et Saint-Onésime-d'Ixworth. Pour ce qui est des institutions, les écoles primaires de 13 municipalités ainsi que trois haltes routières possèdent leurs propres réseaux privés. Le parc national du Lac Témiscouata possède quatre puits tubulaires pouvant desservir près de 500 personnes dans les municipalités de Dégelis, Saint-Juste-du-Lac et Saint-Michel-de-Squatec. Finalement, 24 entreprises sur le territoire ont des puits privés. Plus de la moitié (16) sont des entreprises d'hébergement telles que des campings et des auberges.

Le tableau 6.2 présente la consommation d'eau selon les usages résidentiels, agricoles et ICI (Institution, commerce et industrie) en fonction de la source de l'eau.

Indépendamment du fait que l'eau provienne ou non d'un réseau de distribution, la consommation d'eau souterraine du territoire est pratiquement similaire d'une MRC à l'autre avec une moyenne de 2 414 482 m³/an. Près de la moitié de cette eau (1 135 393 m³/an, 47 %) sert exclusivement à la consommation résidentielle. Seul le secteur agricole de la MRC de Kamouraska est légèrement supérieur en consommation agricole que son secteur résidentiel, ce qui s'explique par sa production laitière qui représente 30 % de la production régionale contre 15% dans Rivière-du-Loup et 8 % au Témiscouata. Pour le volet eau de surface, les consommations des ICI dominent dans les MRC de Rivière-du-Loup et du Témiscouata, alors que le secteur résidentiel à une consommation supérieure dans le Kamouraska.

Tableau 6.2-Consommation de l'eau par MRC, provenance de l'eau et par les catégories d'usage. Les chiffres en caractères gras représentent les secteurs consommant le maximum d'eau, en et hors réseau.

		Consommation sur réseau (m ³ /an)			Consommation hors réseau (m ³ /an)		
		Résidentielle	Agricole	ICI	Résidentielle	Agricole	ICI
Kamouraska	Souterraine	413 545	18 186	301 130	694 595	1 175 368	-
	Surface	801 358	88 739	556 454	-	-	49 713
Rivière-du-Loup	Souterraine	739 764	36 149	271 747	436 996	609 815	-
	Surface	2 009 234	11 483	2 268 563	-	-	4 146 405
Témiscouata	Souterraine	459 809	14 279	578 976	661 471	831 617	-
	Surface	634 005	-	1 702 163	-	-	3 526 650



LIVRABLE 25

6.2. Qualité de l'eau

6.2.1. Eau souterraine

La qualité des eaux souterraines a été présentée comme une problématique majeure par les différents partenaires interrogés, principalement dans la plaine côtière durant l'atelier 1 du RQES. Si l'eau douce est généralement disponible en grande quantité au Québec, il y a des endroits où la qualité ne permet pas sa consommation. La municipalité de Kamouraska par exemple, a dû déboursier plus de 2,2 millions de dollars en 2020 après plus de 15 ans de problème de triahlométhane et de manque d'eau en été, ou encore la municipalité de St-Pascal qui est prise avec des concentrations en fer qui rendent l'eau jaunâtre et peu appétissante. Compte tenu de l'intérêt marqué de nos partenaires pour cette composante, notre équipe a déployé davantage d'efforts sur cette composante du mandat qui lui était donné par le MELCC.

Critères bactériologiques et perception de la qualité

La figure 6.2 présente les résultats du sondage sur la perception de qualité des eaux souterraines effectuées lors de l'échantillonnage des puits privés. Quatre-vingt-neuf pour cent (89 %) des citoyens rencontrés perçoivent leur eau comme étant de qualité excellente à bonne (dominance des points verts). Moins de 10 % des citoyens considèrent que leur eau est de qualité moyenne (points oranges) et ≈3 % la considèrent comme mauvaise (points rouges). Dans 77 % de ces derniers échantillons (14 cas sur 18), les propriétaires ont indiqué que leurs eaux sentaient le soufre (sulfure d'hydrogène, odeurs d'œufs pourris). En plus de la présence de soufre, 60 % ont signifié la présence de manganèse et 50 % la présence de fer, ce qui a tendance à colorer l'eau (grise et jaune). Ces derniers paramètres semblent être les principaux qui motivent les réponses de perception négative de la qualité de l'eau.

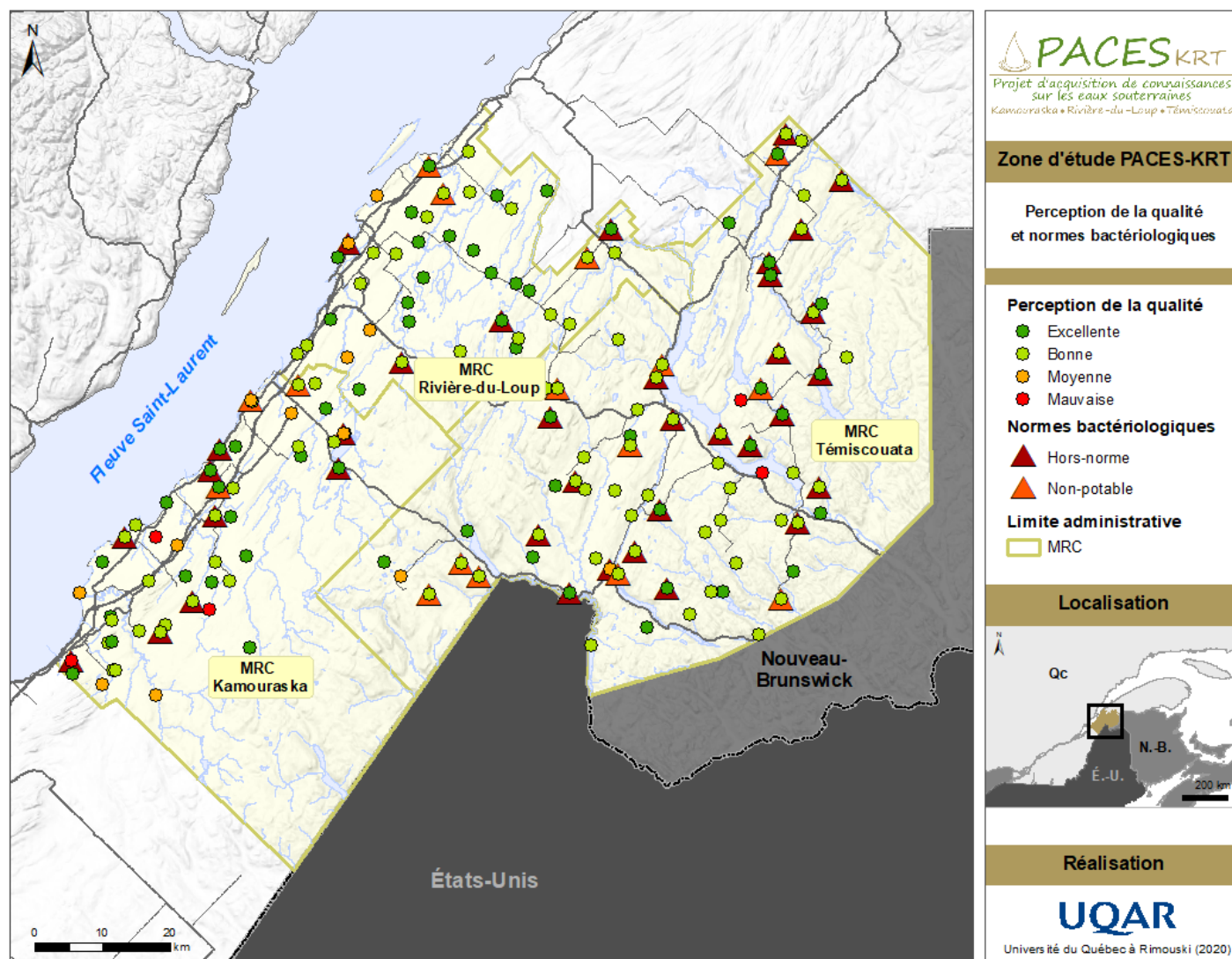


Figure 6.2-Perception de la qualité de l'eau potable et dépassement des normes bactériologiques lors de l'échantillonnage de juin 2019 dans le KRT

Des systèmes de traitement, des filtres ou les deux étaient présents dans plus de 30 % des foyers échantillonnés. Les adoucisseurs d'eau sont le type de traitements le plus souvent retrouvé (n=26), mais il y a aussi deux foyers avec une lampe UV et un autre avec un système complet d'osmose inversée. Un foyer possédant un adoucisseur d'eau possède également un filtre KDF® tandis que des filtres à particules sont présents dans 20 résidences. Tel que mentionné précédemment, l'échantillonnage d'eau a été effectué sans que celle-ci passe par les systèmes mis en place.

Les données de perception présentées sur la figure 6.2 sont mises en perspective avec les résultats bactériologiques obtenus. Dix-sept échantillons se sont avérés non potables (figure 6.2, triangle rouge clair) étant donné la présence de bactéries entérocoques et d'*E.Coli*. Des résultats hors-normes (figure 6.2, triangle rouge foncé) dus à une trop grande présence de coliformes totaux ont été mesurés dans 48 échantillons soit dans 30 % des puits échantillonnés. Notons que seulement 1 échantillon non potable est perçu comme étant de mauvaise qualité par le propriétaire. Seize propriétaires n'étaient donc pas conscients de la qualité de leur eau ce qui s'explique par le fait que la qualité bactériologique d'un échantillon est complètement indépendante de la couleur ou du goût de l'eau.

Critères de potabilités et esthétiques

Les données utilisées afin de dresser le portrait de la géochimie de l'eau souterraine proviennent de plusieurs sources et comptent quelque 3064 points d'échantillonnage. La Banque de Données Géochimique du Québec (BADGEQ) comporte à elle seule près de 89% de ces échantillons (soit 2735 points). Seules les données d'eaux souterraines des campagnes d'inventaire géochimique de 1978 et de 1983 entrepris par le Service de Géochimie/Géophysique du Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec (MERQ) ont été utilisées pour ce rapport. Le rapport de Procéan Inc (1991) sur l'analyse et le traitement de cette base de données permet d'utiliser celles-ci avec un taux de confiance relativement élevée. Les autres données proviennent des rapports hydrogéologiques municipaux (2,2 %) et des campagnes d'échantillonnages faites par

l'équipe PACES en 2019 et 2020 (8,6 %). Aucune distinction n'a été faite quant à la date de prélèvement ou le type d'aquifère. Les deux TNO (10 % du territoire) ainsi que le sud de la municipalité de Mont-Carmel (4,5 % du territoire) ne sont pas couverts par les données disponibles (voir figure 3.1). Le reste du territoire, en particulier les MRC de Rivière-du-Loup et Kamouraska, est mieux documenté.

Le tableau 6.3 dresse un bilan de la qualité des eaux souterraines pour 14 paramètres règlementés en vertu du *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (RQEP) du MELCC. Les normes du RQEP (concentrations maximales) sont édictées afin de prévenir les risques encourus pour la santé humaine advenant l'ingestion d'eau contenant des contaminants d'ordre naturel ou anthropique. Les objectifs esthétiques (OE) présentés sont ceux de Santé Canada et concernent principalement le goût, l'odeur et la couleur de l'eau et ont pour but d'accroître la confiance des consommateurs envers la qualité de l'eau potable et n'ont aucune incidence sur la santé.

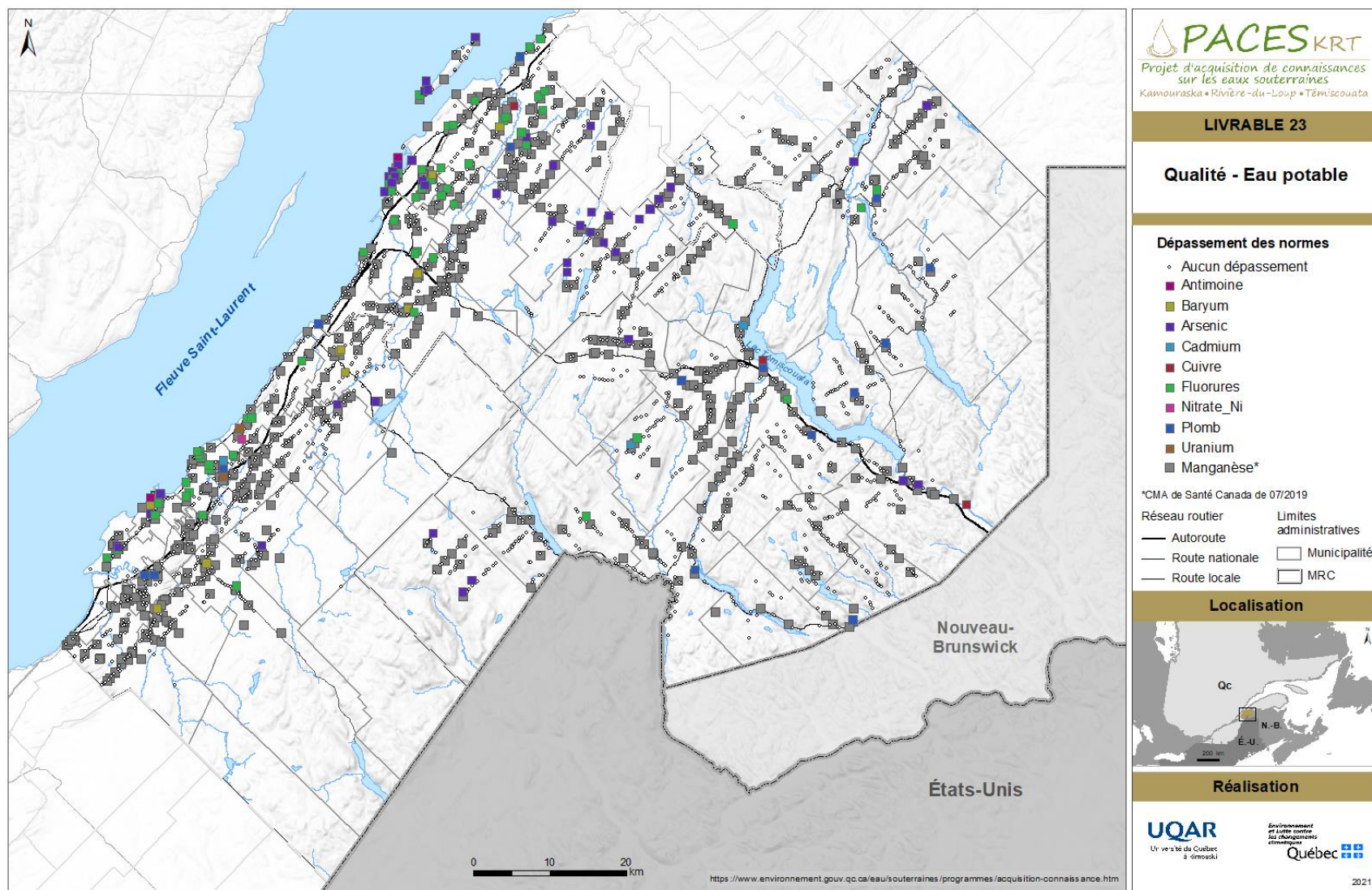
Le livrable 23 représente les dépassements régionaux des normes. Tous les dépassements observés sur le territoire pour ces critères sont soupçonnés d'être d'origine naturelle. Les dépassements en arsenic sont les plus fréquents sur le territoire, principalement dans la MRC de Rivière-du-Loup (90 %). Le maximum mesuré se situe à Cacouna et provient d'un puits privé fraîchement foré dont l'eau contenait une très forte teneur en particules en suspension (opaque et de couleur grise rosée). Même en petite quantité, l'arsenic peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. En effet, une personne exposée à l'arsenic pendant plusieurs années a plus de risques de souffrir de problèmes cutanés et cardiovasculaires ainsi que de certains types de cancers. Les femmes enceintes et les enfants seraient les populations les plus sensibles compte tenu des effets possibles de l'arsenic sur le développement de l'enfant.

Cependant, il est à noter qu'en 2021 le gouvernement du Québec a ajouté une notice de prévention et de protection de la santé en ce qui a trait au manganèse suite à la mise à jour de la concentration maximale acceptable (CMA) de Santé Canada en juillet 2019. En effet, les études sur le manganèse, à des concentrations supérieures à

0,12 mg/L, établies un lien entre le manganèse présent dans l'eau potable et certains effets neurologiques chez les enfants. Ceux-ci concordent avec les effets constatés dans les études clés sur les animaux. En se basant sur cette concentration seuil, c'est 541 (18 %) puits qui se trouve au-delà, avec des concentrations maximales autour de 2,2 mg/L et une médiane des dépassements à 0,24 mg/L. Ces dépassements sont représentés sur le livrable 23 en tant que dépassement de la concentration maximale acceptable émise par Santé Canada

Les dépassements en fluorure et en baryum sont surtout situés dans la plaine côtière, tels qu'observés dans les régions ayant subi l'invasion des eaux marines de la mer de Champlain (Carrier *et al.* 2013). Une faible concentration de fluorures dans l'eau potable a un effet bénéfique en contribuant à la minéralisation des dents, les fluorures protégeant contre la carie dentaire. Cependant, la consommation prolongée d'eau contenant des concentrations de fluorure qui dépassent 1,5 mg/L peut causer la fluorose dentaire chez les enfants de moins de 9 ans. Au-delà de 4 mg/L, la consommation quotidienne de l'eau sur une longue période peut entraîner une fluorose osseuse chez l'adulte. La présence de baryum dans l'eau est, quant à elle, susceptible de faire augmenter la pression artérielle ou entraîner des problèmes cardiovasculaires.

Les autres contaminants sont présents de manière anecdotique sur le territoire. Les dépassements en plomb (18) semblent se répartir de façon aléatoire sur le territoire et n'ont pas été illustrés dans le présent document. Lors de l'échantillonnage de l'équipe PACES, un seul dépassement en plomb a été observé, et ce dans une demeure où la plomberie n'était, ni en cuivre ni en polyéthylène réticulé (pex) selon le propriétaire. Étant donné les années des campagnes d'échantillonnages d'inventaire géochimique (1978 et 1983), il est soupçonné que la cause est davantage associée à la plomberie qu'à une présence de cet élément dans la nappe phréatique.



livrable 23

Tableau 6.3-Compilation des données disponible sur le territoire du KRT selon les critères pour la santé du RQEP et ceux d'ordre esthétique de santé Canada.

Paramètres (CM)	Nb d'échantillons	Maximum mesuré	Norme	Nb dépassements	Proportion (%)
As (mg/L)	3026	0,79	0,010	87	2.88
B (mg/L)	292	0.91	5,000	0	0.00
Ba (mg/L)	2232	10,225	1,000	9	0.40
Cd (mg/L)	2846	0,130	0,005	4	0.14
Cr (mg/L)	2228	0,015	0,050	0	0.00
Cu (mg/L)	3024	2,000	≤ 1,000	3	0.10
F (mg/L)	3033	11,550	1,500	64	2.11
NO2 - NO3 (mg N /L)	299	14,9	10,000	0	0.00
pH	193	9,70	< 6,500	1	0.52
			> 8,500	3	1.55
Pb (mg/L)	3028	0,095	0,010	18	0.59
Sb (mg/L)	280	0,048	0,006	1	0.36
Se (mg/L)	291	0,009	0,010	0	0.00
U (mg/L)	3021	0,045	0,020	1	0.03
Paramètres (OE)	Nb d'échantillons	Maximum mesuré	Objectif esthétique	Nb dépassements	Proportion (%)
Al (mg/L)	280	0,08	0,100	0	0.00
Cl (mg/L)	3037	8700	≤ 250	35	1.15
Fe (mg/L)	3043	20	≤ 0,30	412	13.54
Mn (mg/L)	3051	7,58	≤ 0,02	858	28.12
Na (mg/L)	3032	5100	≤ 200	54	1.78
S (mg H2S/L)	205	3.4	≤ 0,05	21	10.24
SO4 (mg/L)	2163	1100	≤ 500	1	0.05
Zn (mg/L)	3022	16	≤ 5,00	5	0.17

Le tableau 6.3 présente également neuf paramètres pour lesquelles il existe un critère d'ordre esthétique ou opérationnel selon les *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada*. Ce sont les principaux dépassements observés sur le territoire. La carte du livrable 24 représente une mosaïque des dépassements de ces paramètres.

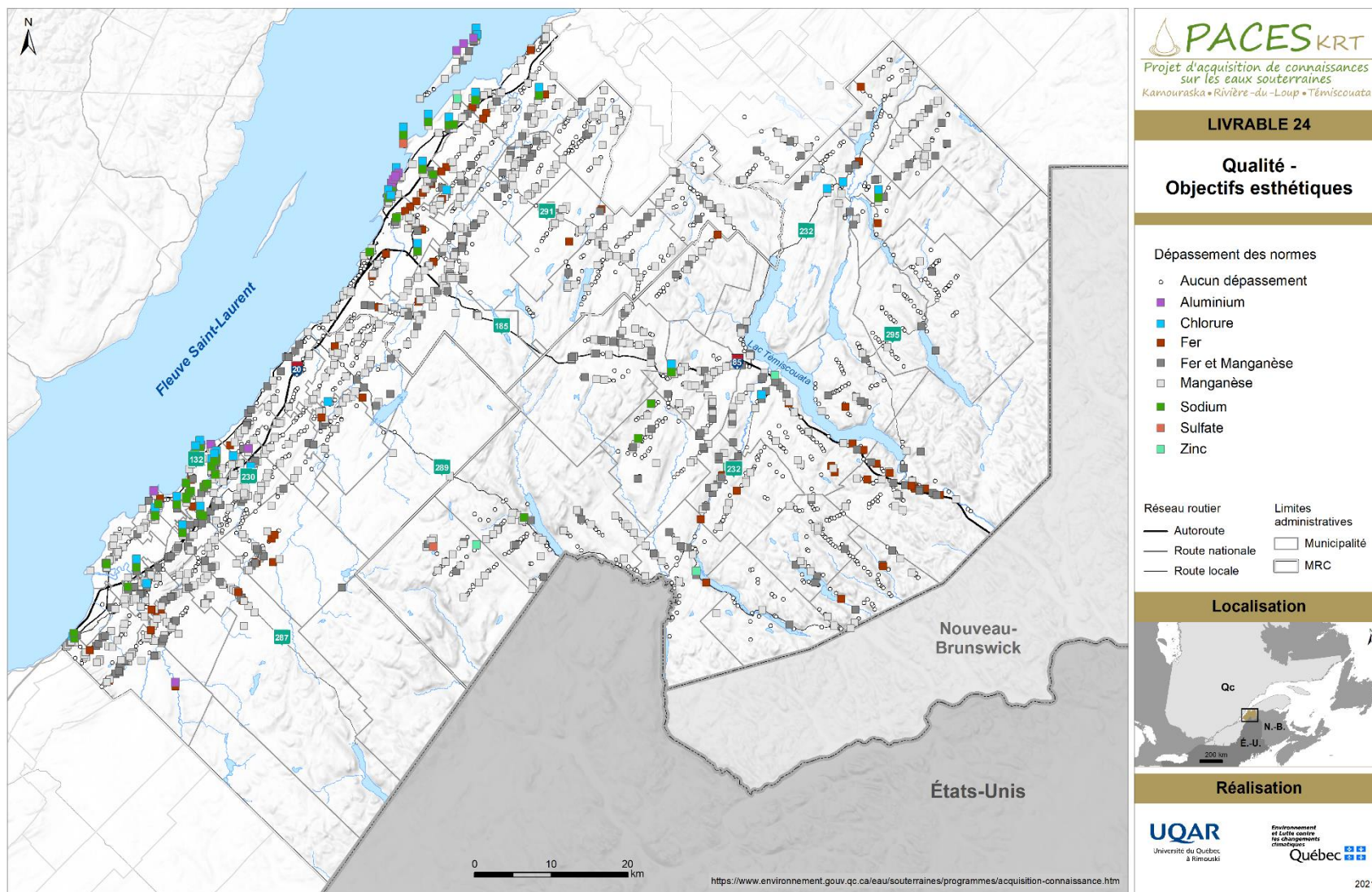
Le manganèse montre le plus grand nombre de dépassements avec 40 % des puits ayant une concentration supérieure à 0,02 mg/L. Les désagréments associés à l'excès de manganèse sont pour le moment principalement liés à la couleur de l'eau qui devient grisâtre ou jaunâtre et qui peut par conséquent tacher les appareils électroménagers et les vêtements lors de la lessive par exemple.

Les dépassements en fer, moins nombreux que dans le cas du manganèse, se retrouvent aussi sur l'ensemble du territoire avec des dépassements mesurés dans 14 % des puits. Le fer présent dans l'eau lui donne une coloration rougeâtre à l'origine de taches sur la lessive ainsi que dans les équipements utilisant de l'eau (lavabo, toilette, lave-vaisselle, etc.).

Des dépassements en chlorure et en sodium sont également observés principalement dans la plaine côtière, mais aussi dans les hauts plateaux du Témiscouata. L'invasion de la mer de Goldthwait et le dépôt de sédiments marins lors de la dernière déglaciation expliquent possiblement ces dépassements. La salinité (minéralisation) de ces échantillons est abordée plus en profondeur dans la section 5.5 sur la géochimie de l'eau souterraine. Pour les données du Témiscouata, la contamination par les sels de déglacage est une hypothèse probable à explorer. Bien que peu de dépassement des objectifs esthétiques en sodium et chlorure n'ont été mesurés sur le terrain, les informations à notre disposition indiquent que la problématique n'est pas unique et s'étend généralement à plusieurs habitations et celles-ci doivent se tourner vers une autre source d'approvisionnement.

Les sulfures montrent un taux de dépassement de 10 %. Pourtant 30 % (sur 263 échantillons) des gens interrogés ont signifié que leur eau avait parfois ou en

permanence une odeur « d'œufs pourris ». Le seuil de perception olfactive du sulfure d'hydrogène, soit 0,0081 mg/L, est près de 5 fois inférieur à l'objectif a norme esthétique de 0,0500 mg/L ce qui pourrait expliquer l'odeur perçue, particulièrement dans l'eau chaude qui favorise le développement des bactéries responsables de la production de H₂S.



livrable 24

6.2.2. Eau de surface

Les informations sur la qualité des eaux de surface proviennent de la base de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA) du MELCC. Des données sont disponibles sur 90 stations dont les dernières données disponibles s'échelonnent de 1995 à 2016. L'IQBP6 est utilisé afin de déterminer la qualité de l'eau et fait appel à 6 paramètres (azote ammoniacal, nitrates-nitrites, solides en suspension, phosphore total, coliformes fécaux et chlorophylle *a* total).

Dans le KRT, l'eau de surface démontre une qualité allant de bonne à satisfaisante, excepté pour la rivière Goudron qui a un statut médiocre entre autres par sa teneur en chlorophylle *a* totale, sa turbidité et sa quantité de matière en suspension. Selon les données disponibles des stations du Réseau Rivières, la qualité des eaux en fonction des 6 paramètres de l'IQBP semble plutôt stable entre 2002 et 2011, avec une tendance à la baisse pour ce qui est du phosphore, des espèces azotées et de la chlorophylle *a*. Par contre, il semble y avoir une augmentation en coliformes fécaux durant la même période. Malgré la mise aux normes de plusieurs installations de traitements des eaux usées municipales depuis 2011 (Saint-Bruno-de-Kamouraska, Sainte-Hélène, Saint-Pascal et Saint-Alexandre), la quantité de coliformes fécaux ne semble pas diminuer dans les stations pour lesquelles on voyait une augmentation de 2002 à 2011. Plus de 35 % des échantillons entre 2014 et 2016 présentaient des dépassements pour les stations 2260002 sur la Kamouraska, allant même jusqu'à 6 000 UFC/100mL pour la station 2250005 sur la Rivière-du-Loup.

Outre les stations du ministère, l'eau de 6 rivières du bassin versant de la Kamouraska a également été analysée dans le cadre de ce projet (tableau 6.4). La conjoncture entre les conditions d'étiage et le moment d'épandage aux champs peut expliquer les forts taux bactériologiques mesurés, cependant il semblerait que ce soit un état généralisé. Toutes les rivières échantillonnées dépassent les normes de protection des activités récréatives et de l'esthétique pour ce qui est des entérocoques (norme de 35 individus). Deux sites se démarquent particulièrement du lot par le nombre de

bactéries *E.coli*, bactéries provenant exclusivement d'excréments humain ou animal. Il s'agit de la rivière Dufour avec plus d'une centaine de bactéries dénombrées, et de la rivière Kamouraska, avec un résultat « trop nombreux pour être compté », alors que l'échantillon a été pris en zone forestière et non agricole. La rivière Kamouraska dépasse la norme de 200 individus dans les normes de protection des activités récréatives et de l'esthétique. Bien qu'aucune autre norme n'existe pour la prévention de la contamination, notons que deux municipalités s'approvisionnent en eaux de surface dans ce bassin versant, soit Mont-Carmel et Saint-Pascal. Pour ce qui est des résultats physico-chimiques, aucun des éléments mesurés ne dépasse les critères de qualité pour la protection de la vie aquatique (effet chronique; CVAC) du MELCC.

Tableau 6.4-Résultats bactériologiques des rivières échantillonnées en septembre

Station	Cours d'eau	Date d'échantillonnage	Entérocoques	<i>E.coli</i>
LEV-1	Lévesque	17-sept	TNC ¹	68
POI-1	Poivrier	17-sept	TNC	23
GOU-1	Goudron	17-sept	TNC	36
DUF-1	Dufour	17-sept	TNC	>100
SD-1	Saint-Denis	18-sept	>100	13
KAM-2	Kamouraska	18-sept	87	TNC

¹Trop nombreux pour être comptés

6.3. Gestion durable de la ressource

Comme la gestion de toutes ressources qui s'appuie sur le principe de développement durable, la gestion durable des eaux souterraines est le résultat d'un ensemble de compromis acceptés par la société. Dans son rapport "*La gestion durable des eaux souterraines au Canada*" (2009) le Conseil des Académies Canadiennes (CAC) propose cinq objectifs pour atteindre la gestion durable de la ressource afin d'en assurer la pérennité :

- Protéger les eaux souterraines de la surconsommation
- Protéger les eaux souterraines de la contamination
- Préserver la santé des écosystèmes
- Atteindre un bien-être socio-économique
- Appliquer les principes de bonne gouvernance

Ces objectifs sont tous interdépendants et présentés sous forme d'un pentagramme à la figure 6.3.

Afin de pouvoir répondre adéquatement à ces objectifs, l'acquisition de connaissances, tel que fait par les PACES, est primordiale. Ils permettent de construire des bases de données fiables et complètent des connaissances actuelles sur les eaux souterraines. Les cartes générées ainsi que l'ensemble des travaux réalisés procurent une compréhension des eaux souterraines étendue sur la région et forme une base solide pour la gestion durable de la ressource. De plus, la mise en place d'atelier de transfert de connaissances avec les partenaires régionaux permet à ceux-ci d'avoir une vue d'ensemble vulgarisé des connaissances en plus d'apprendre à utiliser les cartes et données générées durant le projet. Ces connaissances pourront ensuite être utilisées afin de pouvoir prendre des décisions plus éclairées en ce qui concerne la gestion de la ressource en eaux souterraines.

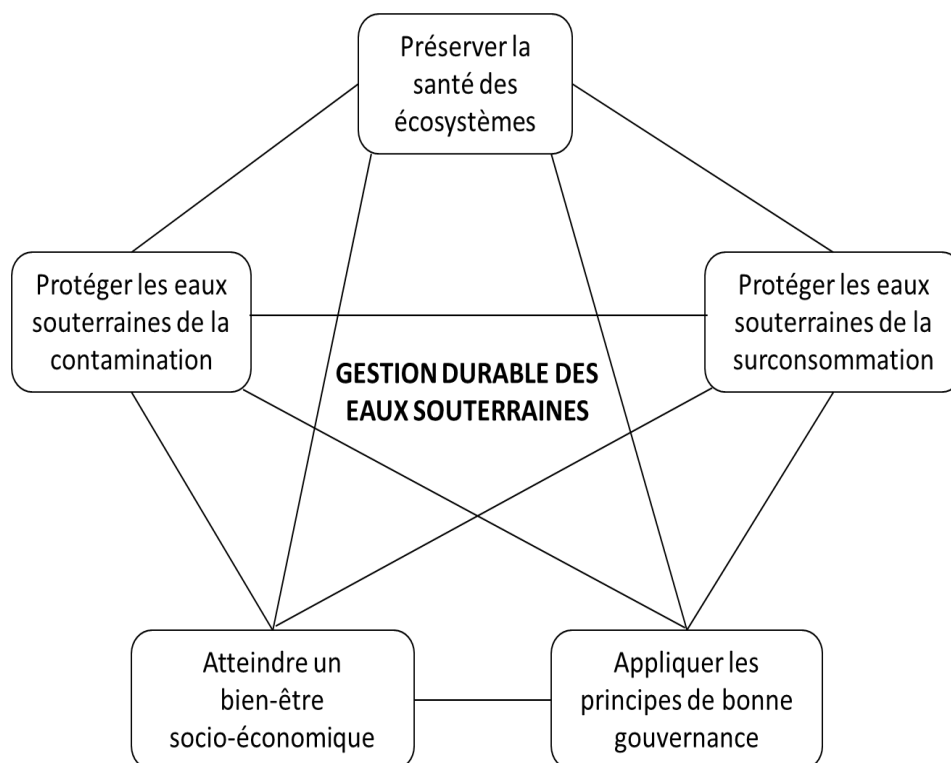


Figure 6.3- Pentagone de la gestion durable des eaux souterraines (Conseil des Académies Canadiennes, 2009)

7. Rencontres avec les partenaires, transfert de connaissances et diffusion des résultats

Au cours de la *phase I*, deux ateliers ont été donnés : le premier en collaboration avec le RQES (atelier 1 de la stratégie de transfert de connaissances) et le deuxième en collaboration avec nos partenaires (atelier ES-KRT sur la problématique des nitrates dans les eaux souterraines de la municipalité de Saint-Germain). La *phase II* du projet a été axée sur le terrain et la collecte de données. Ainsi, lors de nos déplacements de travaux, les rencontres avec les partenaires se font de manière plus informelle. Les aménagistes des MRC de Kamouraska et de Rivière-du-Loup ont été rencontrés individuellement à la fin de l'échantillonnage sur leur territoire respectif afin de brosser un rapide portrait du nombre d'échantillons prélevés. Les résultats bactériologiques préliminaires ainsi que l'analyse de la perception qu'ont leurs concitoyens de leur eau ont aussi été transmis à chaque MRC. En plus du déploiement de l'équipe au cours du mois de juin 2019 sur tout le territoire à l'étude (plus de 160 foyers ont été visités), l'équipe a participé à diverses activités données par les partenaires. Un résumé de celles-ci est fait au tableau 7.1. Au cours de l'été 2020, la pandémie et les conditions sanitaires nous ont forcés à adapter nos pratiques et aucune rencontre sur le terrain ou en personne n'a été faite. Ces rencontres ont toutes été effectuées en mode virtuel.

Tableau 7.1-Résumé des rencontres avec les partenaires du PACES-KRT

Activité	Lieu	Date
Atelier #1 du RQES	Pohénégamook	25-OC-2018
Soirée d'information publique OBAKIR « La qualité de mon eau potable? »	La Pocatière	21-MR-2019
GAM-MAC-IAH	Québec	13-15-MAI-2019
Échantillonnage d'un puits privé MRC de Kamouraska, Enseignant du cégep de La Pocatière	Mont-Carmel	14-JN-2019
Atelier de concertation OBAKIR Bassin Versant Rivière-Ouelle	Rivière-Ouelle	13-SE-2019
Atelier de concertation OBAKIR Bassin Versant Rivière Kamouraska	St-Pascal	24-SE-2019
Atelier RPEP; eau de surface	Rimouski	22-OC-2019
Atelier RPEP; eau souterraine	Rivière-du-Loup	23-OC-2019
Atelier Érosion des berges dans la Rivière-Ouelle	Rivière-Ouelle	SE-2019
Rapport d'activité 2019 MRC Rivière-du-Loup	Virtuelle	17-JN-2020
Rapport d'activité 2019 MRC Kamouraska	Virtuelle	15-JN-2020
Terrain en collaboration avec l'ULAAVAL-Radon/Radium	Île-de-la-Madeleine	20-SE au 3-OC 2020
Atelier #2 RQES	Virtuelle	28 et 29-OC- 2020
Rencontre avec le MAPAQ sur le site de captation de la municipalité de St-Germain-de-Kamouraska	St-Germain-de- Kamouraska	31 Oc-2020
Atelier #3 RQES	Virtuelle	8 et 9 Jn - 2021
Tournage La Semaine verte	Kamouraska	19 Oc- 2021
Table de concertation OBAKIR-Présentation de la recharge	Virtuelle	27 Oc-2021

7.1. Rapports aux MRC

Les résultats de qualité d'eau étaient très différents d'une MRC à l'autre, l'équipe trouvait important que les MRC soient informées de ce qui avait été fait plus particulièrement sur leur territoire. Les trois MRC ont donc été rencontrées individuellement et des rapports individuels leur ont été déposés au printemps 2020. Les rencontres ont eu lieu les 15 et 17 juin 2020 (figure 7.1). Seule la MRC du Témiscouata n'a pas fait suite à notre demande de rencontre.

Les rapports font état des activités de recherche effectuée spécifiquement sur leur territoire durant l'année 2019 soit : la stratégie d'échantillonnage, la remise des résultats aux participants, les résultats sur la qualité des eaux souterraines ainsi que la perception

des citoyens sur celle-ci et finalement les activités de représentation qui a eu lieu sur leur territoire tel que l'atelier de transfert de connaissance (section 7.2.1) et l'atelier du comité ES-KRT (section 7.2.3). De plus, ces rencontres ont permis de discuter avec les MRC des attentes qu'elles avaient pour la dernière année du projet ainsi que de nos prévisions terrains pour septembre. Nous avons donc pu adapter nos travaux afin de répondre davantage à leurs besoins. Les trois rapports susmentionnés sont remis sous format PDF au MELCC en même temps que ce rapport final.



Figure 7.1-Rencontres avec les acteurs des MRC de Rivière-Du-Loup le 17 juin 2020 (haut) et de Kamouraska le 15 juin 2020 (bas).

7.2. Activité de transfert de connaissances et de diffusions

7.2.1. Atelier RQES #1

Le premier atelier de transfert de connaissance donné par le RQES sur le territoire du PACES-KRT, intitulé « Découvrir notre PACES et le lien aux enjeux de notre territoire » s'est déroulé le 25 octobre 2018 à Pohénégamook. Durant cet atelier, 16 participants faisant partie des partenaires (MRC, OBVs, ZIP, Municipalités et MAPAQ) ont pu échanger avec l'équipe tout au long des différentes activités prévues à l'horaire (figure 7.2).

L'objectif premier de cet atelier était de présenter le projet PACES aux acteurs de l'aménagement du territoire et de l'eau, plus particulièrement de comprendre à quoi les connaissances produites par le PACES allaient servir, à identifier les attentes et les besoins face au PACES et à partager les enjeux de protection et de gestion des eaux souterraines. La majeure partie de cette journée a été consacrée à l'identification des enjeux de protection et de gestion des eaux souterraines sur le territoire ainsi qu'à la priorisation de ces enjeux.

Plusieurs enjeux sur le territoire ont été identifiés par les acteurs puis ont été priorisés en fonction du gain pour la collectivité. Ces enjeux ont été regroupés en trois groupes présentés dans le tableau 7.2 en fonction de leur impact sur la qualité ou la quantité d'eau souterraine disponible. Deux enjeux sont cependant ressortis de façon plus prioritaire pour les acteurs. Le premier concerne les activités agricoles dans les zones de recharge et autour des prises d'eau individuelles et municipales. Ces préoccupations concernent surtout les MRC de Rivière-du-Loup et du Kamouraska d'une part pour le risque de contamination biologique que cela représente, mais également pour le risque de contaminations aux pesticides ou aux engrais azotés, tel qu'observé dans quelques municipalités comme celle de St-Germain. Les champs qui sont de plus en plus drainés au printemps représentent également un obstacle à la recharge ainsi qu'un risque de contamination des eaux de surface plus importante. Dans un deuxième temps, compte tenu des deux derniers étés de sécheresses importantes observés au Bas-Saint-Laurent,

les changements climatiques pouvant entraîner une pénurie d'eau, est un thème qui préoccupe grandement les acteurs. Une majorité des puits sont des puits de surface et plusieurs personnes, entre autres les entreprises agricoles, ont dû forer davantage en profondeur afin de trouver de l'eau potable en quantité suffisante pour répondre à leurs besoins.

Tableau 7.2-Synthèse des enjeux identifiés par les acteurs du KRT ayant un impact sur l'eau souterraine

Impact sur la qualité	Impact sur la quantité	Autres
Activités agricoles (Pesticides, engrais azoté, drainage)	Activités agricoles (Drainage)	Tourbière (exploitation, drainage, valeur écohydrologéologique)
Eaux usées (fosse septique, surverse, rejet au plan d'eau)	Tourisme/Villégiature (augmentation du tourisme, transformation de chalet en maison, augmentation de chalet autour des lacs)	Manque de connaissance sur les zones vulnérables
Connectivité eau de surface/eau souterraine	Impacts anthropiques sur la recharge (carrière, sablière, chemin forestier)	Gouvernance mal identifiée
Impact anthropique (sel de route, anciens dépotoirs, dépôts à métaux, exploration gaz de schiste, voie ferrée)	Changement climatique (sécheresses, averses plus fréquentes, couvert de neige insuffisant, pluie hivernale)	

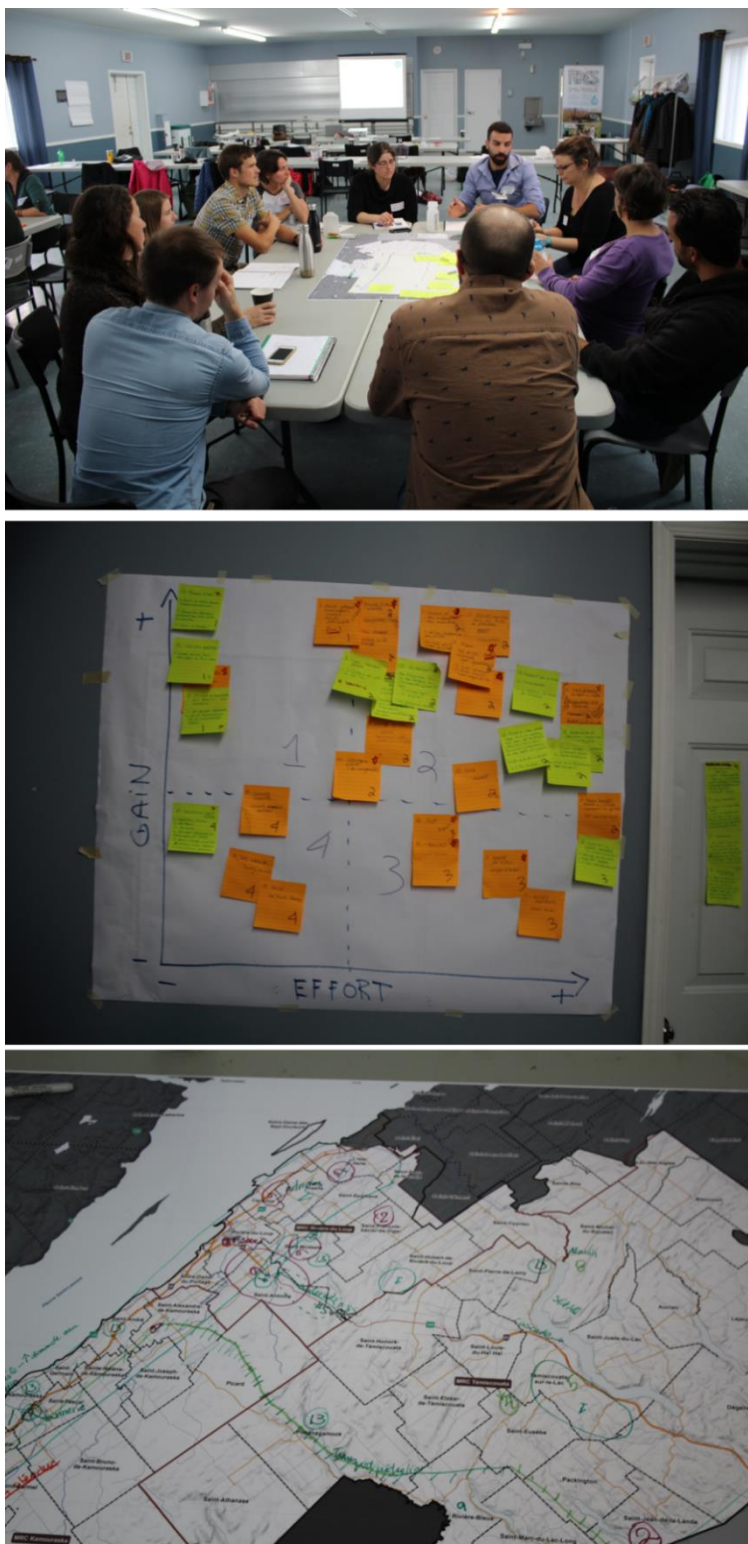


Figure 7.2-Activités d'identification des enjeux du territoire lors de l'atelier # 1 du RQES sur le territoire du KRT le 25 octobre 2018.

7.2.2. Atelier RQES #2

Le deuxième atelier de transfert de connaissance donné par le RQES sur le territoire du PACES-KRT, intitulé « Comprendre les données du projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES) » s'est déroulé virtuellement sur deux ½ journées les 28 et 29 octobre 2020. Durant cet atelier, 17 participants faisant partie des partenaires (MRC, OBVs, ZIP, Municipalités et MAPAQ) ont pu échanger avec l'équipe tout au long des différentes activités prévues à l'horaire (figure 7.3)

Les participants

Marie-Hélène Ouellet D'Amours	CRE BSL
Myriam Vallée	UQAR
Chantale Dubé	UPA
Katia Gaumond	MSP
Marie-Andrée Audet	MAPAQ
Maxime Levesque	MAPAQ
Mathieu Lehoux	MRC Témiscouata
Valérie Labrecque	MRC Kamouraska
Vincent Bélanger	MRC Rivière-du-Loup
Alain Marsolais	MRC Rivière-du-Loup
Gervais Darisse	Saint-André
Andréane Collard-Simard	Saint-Pacôme
Jessie Fradette	Saint-Antoine
Julie Paré	Saint-Hubert-de-Rivière-du-Loup
Marianne Gagnon	Rivière-du-Loup
Élie Desage	OBV Fleuve Saint-Jean
Antoine Plourde-Rouleau	OBAKIR

MRC

Municipalité

OBV

Figure 7.3-Rencontre virtuelle avec les partenaires dans le cadre du 2e atelier du RQES les 28 et 29 octobre 2020.

Cet atelier a permis de présenter l'avancée et les faits saillants du projet, mais aussi de travailler sur trois notions particulières (trois livrables) du projet soit les contextes hydrostratigraphiques, les conditions de confinement, et la piézométrie. Les données préliminaires sur la qualité de l'eau ont aussi été discutées. La première ½ journée était surtout axée sur l'échange et le partage de connaissance. La deuxième matinée était organisée autour de lecture de données cartographiques partagées à l'écran, de sondage en ligne, de travail par groupe dans des salles virtuelles ainsi que la mise en place d'un document commun. La synthèse de cet atelier est en cours de production par le RQES.

7.2.3. Atelier RQES #3

Le troisième atelier a eu lieu virtuellement les 8 et 9 juin 2021 et avait pour titre « Comprendre le fonctionnement hydrogéologique de notre territoire ». En tout, c'est 18 participants parmi nos partenaires qui s'y sont inscrits. Les objectifs étaient de :

- Poursuivre l'acquisition des notions de base en hydrogéologie
- Comprendre le fonctionnement des aquifères
- Apprendre à lire et à interpréter les résultats cartographiques du PACES pour répondre à des enjeux de protection et de gestion de l'eau souterraine.
- Développer des pistes d'action pour la protection et la gestion des eaux souterraines.

Afin d'atteindre ses objectifs, quatre nouvelles notions en hydrogéologie (livrables) ont été présentées aux participants : la géologie du quaternaire et la perméabilité des unités lithostratigraphique, l'épaisseur des dépôts meubles, la recharge ainsi que la vulnérabilité des aquifères. L'activité qui a le plus plu aux participants était celle visant à déterminer les zones de recharge à protéger ainsi que les zones favorables à l'implantation d'une activité polluante (figure 7.4).

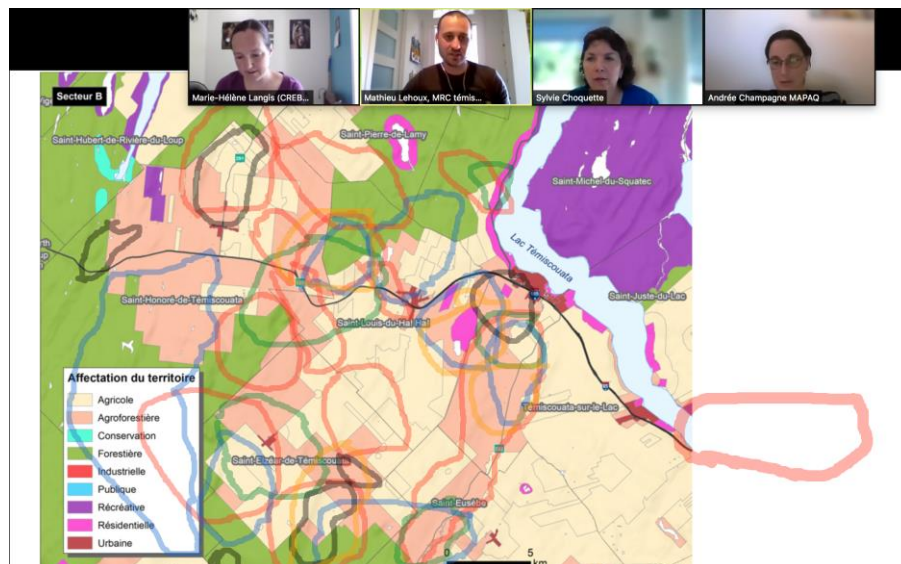


Figure 7.4-Synthèse de l'activité de groupe ayant pour but de déterminer une zone favorable à l'implantation d'une activité polluante. Chaque couleur de cercle correspondant à une carte attachée à un livrable présenté au paravent sur l'écran.

7.2.4. Activité de gouvernance de la ressource eau souterraine

Parallèlement aux ateliers du RQES et par souci d'applicabilité à l'échelle locale, l'équipe du PACES-KRT a mis en place un comité eau souterraine (ES-KRT) qui a pour objectif d'amorcer la démarche de gestion intégrée de la ressource à partir d'enjeux territoriaux et de problématiques locales. Cette démarche émane de commentaires des partenaires suite au PACES-NEBSL sur le manque d'exemples ou d'outils concrets pour faire de la gestion intégrée de la ressource. La démarche s'articule autour de rencontres sur le terrain où des enjeux/problématiques sont constatés. La composition du comité ES-KRT est variable selon la thématique abordée. Les représentants des MRC (aménagistes, gestionnaires de cours d'eau), des OBVs, de la municipalité concernée et des ministères sont invités à participer à l'activité. L'objectif premier du comité est que tous les participants contribuent à des éléments de réflexion sur la gestion et la résolution de l'enjeu. Ce type d'activités, plus difficile à organiser en condition de pandémie n'a cependant pas eu lieu en 2020. Elles seront reprises si les conditions le permettent.

Une première activité du comité a eu lieu le 26 novembre 2018 à St-Germain-de-Kamouraska. Depuis quelques années, la municipalité observe dans son réseau des dépassements de concentrations en nitrites (NO^{2-}) - nitrates (NO^{3-}) par rapport à la norme du *Règlement sur la qualité de l'eau potable* (RQEP) fixée à 10 mg/L. Les activités dans l'aire d'alimentation du puits de surface municipal sont principalement agricoles.

Au total, dix participants étaient présents à ce premier comité :

- L'équipe du PACES-KRT ;
- Maire de St-Germain-de-Kamouraska ;
- Représentants de chacune des MRC du territoire PACES-KRT ;
- OBVs du territoire ;
- Représentante du MAPAQ
- Intervenant externe

L'atelier s'est déroulé en quatre étapes. D'abord, une courte présentation de M. Daniel Laplante, maire de Saint-Germain, sur la problématique des nitrates rencontrée à la municipalité et des solutions envisagées, ensuite, une présentation de l'UQAR sur l'origine des nitrates dans l'eau, suivie d'une présentation de M. Éric Fillion (M.Sc géographie) sur le cas de Sainte-Luce et enfin, une discussion ouverte sur les causes et solutions envisageables pour le puits de Saint-Germain. Bien que la solution au problème semble être la révision complète des pratiques culturelles à l'amont de l'aire d'alimentation du puits (priorisation des cultures de couverture), plusieurs actions ont émergé de cette rencontre dont un projet piloté par un club conseil en agroenvironnement suite à un appel d'offres du MAPAQ, via un financement PAAR Prime Vert. Ce projet vise à mieux définir l'air d'alimentation ainsi que les activités et pratiques agricoles sur cette zone. Une première rencontre a eu lieu sur le terrain, en présence, le 30 octobre 2020. Cette rencontre regroupait la MRC de Kamouraska, le MAPAQ, l'UQAR, et les professionnels du club conseil en agroenvironnement.

Malheureusement, due à un manque de ressource, notre équipe n'a pas pu continuer les rencontres de ce comité.

7.3. Diffusion scientifique

Lors de la conférence du GAC-MAC-IAH (Geological Association of Canada, Mineralogical Association of Canada, International Association of Hydrogeologists) du 13 au 15 mai 2019, l'équipe du PACES-KRT a présenté une affiche dans la session d'hydrogéologie générale. L'affiche intitulée « Origine de la signature géochimique des eaux souterraines de la région du Bas-Saint-Laurent » (*"Origins of the geochemical fingerprint of shallow groundwaters in the Bas St- Laurent region"*) a été présentée le 14 mai en soirée. L'objectif de l'étude était de tester l'utilisation d'analyses statistiques multivariées de type canonique afin d'établir un modèle qui explique les signatures isotopiques selon des paramètres hydrogéologiques. Le résumé de l'affiche est présenté dessous. L'affiche est rapportée en annexe 7. Ces travaux ont été approfondis dans le

cadre du stage postdoctoral de Charles-Édouard Deschamps et un article vient d'être soumis à *Journal of Hydrology*. Le résumé de l'article est ci-dessous.

Hydrogeochemical evolution and groundwater mineralization in the eastern of Québec Province (Québec, Canada): a new in-depth analysis based on geochemistry and isotopes of shallow groundwater

Charles-Édouard Deschamps^{a, b*}, Gwendoline Tommi-Morin^a, Antoine Biehler^b, Jérôme Dubé^a, Thomas Buffin-Bélanger^a, Gwénaëlle Chaillou^b

^a Université du Québec à Rimouski, laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, 300 allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1, Canada

^b Institut des sciences de la mer de Rimouski, Québec-Océan, Canada Research Chair on geochemistry of coastal hydrogeosystems. Université du Québec à Rimouski, 310 allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 2Z9, Canada

*Corresponding author: C-E. Deschamps. E-mail address: deschampscharlesedouard@gmail.com

Abstract

Understanding spatial patterns of groundwater geochemistry at the regional scale over a long time period is challenging, due to the lack of data and effective statistical approaches to characterize complex natural processes and anthropogenic activities. We applied statistical methods to understand the controlling factors of groundwater geochemistry in the bedrock aquifer of the Kamouraska/Temiscouata/Rivière-du-Loup (Québec, Canada). Groundwater samples were collected at 146 sites and analyzed for major and minor ions as well as water isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$), DIC, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, and radon activities (^{222}Rn). Multivariate statistical methods were applied to the dataset to classify the groundwater samples, and to identify geochemical processes controlling groundwater geochemistry. The cluster analysis yielded a classification of five clusters (dominated by $\text{Ca-HCO}_3\text{-Ca-SO}_4^{2-}$, mixed-cation- HCO_3 , Ca-Cl , Na-HCO_3 facies), in agreement with the Piper diagram. The spatial distribution of the five clusters allows the separation of two geochemical zone: the Appalachians plateaus and the coastal plain. The integration of the multivariate analyses and ^{222}Rn activities provided a regional picture of the bedrock system aquifers and the evolution of groundwater. The study identified that carbonates dissolution and cation exchange are the main geochemical processes affecting groundwater chemistry in this region. Secondary processes, related to the bedrock geology, are responsible for high minor ions concentration. The highest activities of ^{222}Rn were detected in the highly fractured and faulted recharge zone, and the lowest activities were detected in the mineralized groundwater under the clay of the Goldthwait Sea. Decreasing activities of the ^{222}Rn were detected along the flow path due to a difference in radon activity in the geological terrain and with the mixing of fresh groundwater with higher ^{222}Rn activities.

8. Projets scientifiques connexes

L'échange de connaissances avec les partenaires du projet ainsi que les résultats acquis au cours du projet nous ont poussés vers l'exploration de nouvelles avenues de recherche. Ces travaux sont pour la plupart en cours de réalisation, mais le PACES nous a servi de levier pour élaborer de nouveaux projets. Ces nouveaux projets s'intéressent plus particulièrement à la connectivité de l'eau souterraine avec les eaux de surface en milieu continental et côtier ainsi qu'à la qualité de l'eau souterraine.

8.1. Bassin versant expérimental

8.1.1. Transport sédimentaire

Le transport des sédiments à travers un bassin versant se fait selon deux modes principaux : la charge de fond et la charge de sédiments en suspension. La charge de fond (CF) est généralement associée à l'évolution des morphologies fluviales en lien avec l'évolution (érosion/accumulation) des berges et du lit du cours d'eau. La CF comporte des sédiments grossiers (sables à galets) qui migrent lentement vers l'aval au rythme de crues mobilisatrices. La charge de sédiments en suspension (SS) est davantage liée à la qualité de l'eau et des habitats fluviaux et provient des processus d'érosion à l'échelle du bassin versant et est ainsi fortement liée à l'utilisation du sol dans ce dernier. Les SS comportent des matières organiques et inorganiques fines qui sont transportées dans le cours d'eau pendant les crues, mais également lors des périodes de débits plus faibles. Les sédiments en suspension transportés par les rivières représentent généralement 75 % à 90 % du budget sédimentaire des rivières (Walling et Fang, 2003). Les SS dans les rivières ont été largement étudiés au cours des dernières décennies étant donné qu'elles sont associées à d'importants problèmes socio-économiques et environnementaux (Vercruysse *et al.*, 2017). Les SS jouent un rôle essentiel dans la structuration du paysage, la création d'habitats écologiques et le transport des nutriments (Dean *et al.*, 2016). Bien que constituant un élément indispensable du système fluvial, les SS sont également liés à une série de problèmes tels que la pollution, la dégradation écologique, aux inondations

et aux dommages aux infrastructures dans un monde de plus en plus urbanisé (Taylor et Owens, 2009). De plus, l'érosion intensive dans des bassins versants agricoles peut entraîner de nombreuses catastrophes naturelles qui se produisent en raison de divers processus d'érosion qui entraînent des problèmes tels que la perte de sols fertiles, l'envasement des lits de rivières et des barrages, ainsi que des dommages aux infrastructures (Patault *et al.*, 2019).

Avec une superficie de 296 km², le bassin versant de la rivière Kamouraska est considéré comme un petit bassin versant et peut-être divisé en 4 sous-bassins versants avec les bassins versants de Saint-Denis (103km²), Dufour (38km²), Goudron (77km²) et Kamouraska (88km²). Le bassin versant de la Kamouraska se situe dans la province physiographique des hauts plateaux appalachiens et de la plaine côtière bordant le fleuve Saint-Laurent. Le bassin versant de la rivière Kamouraska est principalement occupé par la forêt, qui couvre un peu plus de la moitié (59 %) de la superficie du bassin. L'agriculture, qui se pratique plus en aval, occupe 35 % du territoire et les zones urbaines 5 %. Selon l'occupation du sol et la pédologie, la rivière Kamouraska pourrait être divisée en deux grands sous-bassins principaux. Le sous-bassin versant de la Kamouraska qui comprend les rivières Dufour, Saint-Denis et Kamouraska situé en milieu forestier dont les dépôts superficiels sont associés au till. À l'opposé, le sous-bassin de la rivière Goudron est situé en milieu agricole dont les dépôts superficiels correspondent aux argiles marines de la mer de Goldthwait.

Au Québec, si la plupart des bassins versants de plus 1000 km² sont bien documentés, on connaît très peu la réponse hydrosédimentaire des petits bassins aux changements hydroclimatiques. On ne retrouve aucune station du Réseau de Suivi des Eaux souterraines Québec (RSESQ) dans ce bassin et nous ne détenons aucune chronique de niveaux d'eau d'un puits municipal. Dans le cadre des activités du PACES-KRT, un effort particulier est dédié au développement d'un bassin versant expérimental dans lequel les variabilités spatiales et temporelles des niveaux de nappe et de rivière, de la qualité de l'eau, de la recharge, de la réponse hydrologique et du transport sédimentaire seront

étudiées. La dynamique hydrogéologique de ce bassin versant est représentative de celle de l'ensemble des bassins versants de même superficie de la région du Kamouraska et de Rivière-Du-Loup. Selon Poesen (2018), très peu d'études ont mesuré la dynamique de l'érosion hydrique sur des bassins versants relativement petits (0,01-1000 ha). De plus, selon Grangeon *et al.* (2017), la dynamique spatiale et temporelle des flux sédimentaires doit être davantage étudiée pour mieux comprendre la connectivité entre l'hydrodynamisme et le transport sédimentaire, en particulier pour les zones où l'agriculture intensive est prédominante et le ruissellement peut être généré par saturation du sol (Gay *et al.*, 2015).

L'instrumentation des bassins versants a été utilisée dans plusieurs études (Estrany *et al.*, 2009; Giménez *et al.*, 2012; Sherriff *et al.*, 2015) pour quantifier les processus d'érosion dans les bassins versants agricoles et évaluer les relations entre les paramètres hydro-sédimentologiques. Ces études ont rendu compte des transferts de sédiments qui montrent de fortes variabilités temporelles et spatiales, et que seuls quelques événements érosifs sont responsables de la majorité de l'exportation de sédiments (Gay *et al.*, 2014; Grangeon *et al.*, 2017). Ils rapportent également des corrélations complexes entre les caractéristiques des précipitations et la réponse hydrosédimentaire. Dans ce contexte, sept stations de jaugeage dans le cours d'eau pour suivre les niveaux de la rivière et plus particulièrement les niveaux d'étiage liés aux contributions de la nappe phréatique. De plus des pièges à sédiments ont été installés dans le cours d'eau pour étudier la réponse hydrosédimentaire de la rivière Kamouraska. La sélection de ces sites répondait à plusieurs critères. Ils ont été choisis, car ils étaient à des sorties de sous-bassins versants ou dans des contextes hydrostratigraphiques particuliers. La position des différents instruments installés en été 2019 dans le bassin versant de la Kamouraska est présentée dans la section 3.2.4.

L'objectif général est de comprendre la dynamique et les variations du transport des SS dans le bassin versant de la rivière Kamouraska. Ainsi, la rivière Kamouraska sera surveillée afin de: (1) déterminer la variabilité spatio-temporelle de la dynamique du

transport SS, (2) quantifier les changements à court terme entre les différents événements de ruissellement, et (3) identifier les principaux facteurs de contrôle de la dynamique des SS.

- Les différences géologiques et d'occupation des sols entre les sous-bassins versants de la rivière Kamouraska seront utilisées pour comprendre la dynamique des SS à l'échelle saisonnière et annuelle. En effet, il a été démontré que les sols agricoles ont le facteur d'érodibilité le plus élevé (Panagos *et al.*, 2015) et la composition minéralogique des SS sera utilisée pour déterminer la provenance des sédiments dans le bassin versant de Kamouraska. Les objectifs seront de déterminer le principal contributeur des SS et d'observer les changements des sources de sédiments liés à la variabilité saisonnière et de déterminer la contribution globale des SS de la rivière Kamouraska à l'estuaire du Saint-Laurent.
- Les transferts de SS montrent de fortes variabilités temporelles et spatiales, et le fait que seuls quelques événements érosifs sont responsables de la majorité de l'exportation de sédiments (Gay *et al.*, 2014; Grangeon *et al.*, 2017). Comme résumé dans Patault *et al.* (2019), seulement 6 % de l'événement érosif a exporté 40 % du flux sédimentaire au cours de la période étudiée dans un petit bassin versant agricole. L'objectif est d'étudier l'origine et la concentration de SS lors des crues et la quantité de SS exportée.
- Les données météorologiques et hydro-sédimentaires seront utilisées avec des analyses statistiques pour comprendre les paramètres liés à la fluctuation de la SS pour les objectifs (1) et (2). En effet, plusieurs études ont montré que les réponses sédimentaires étaient très variables (Patault *et al.*, 2019). Cette variabilité n'est pas seulement due à la variabilité de la quantité de pluie, mais aussi à la variabilité temporelle des précipitations au cours de l'année.

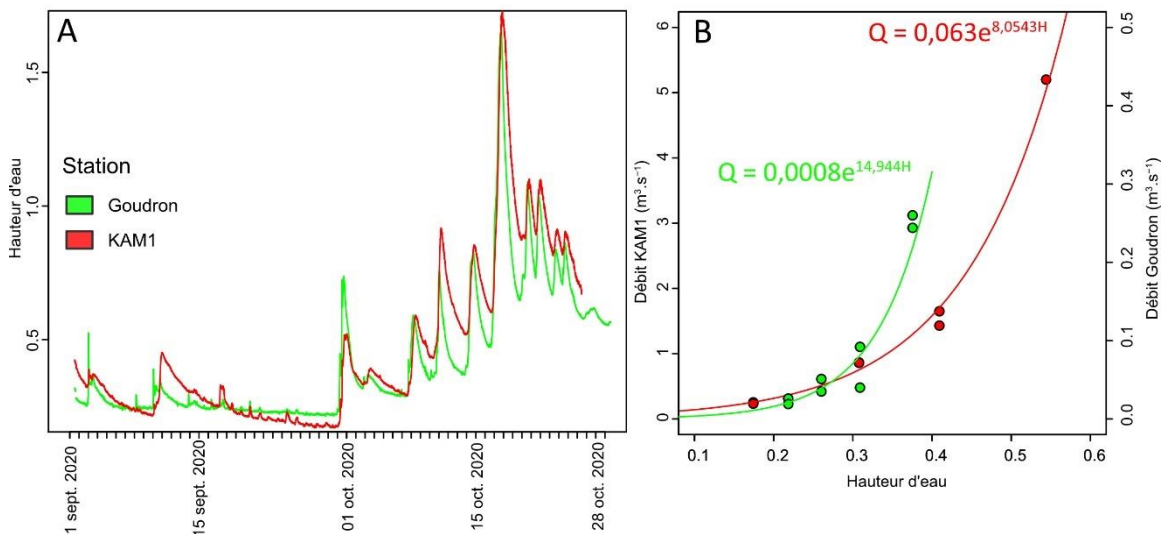


Figure 8.1-A Variations de la hauteur d'eau aux stations KAM1 (rouge) et Goudron (vert) et B courbe de tarage préliminaire pour les stations KAM1 (rouge) et Goudron (vert).

Résultats préliminaires

Les données de HOB0 mis en place en 2019 aux stations KAM1 et Goudron ont permis d'établir les variations de hauteurs d'eau à ces deux stations (figure 8.1A). Les mesures ponctuelles de débit (Q) à ces mêmes stations ont permis de réaliser des courbes de tarage préliminaire (figure 8.1B). Des mesures ponctuelles de débit auront lieu à partir du printemps 2021 pour affiner les courbes de tarage. Ces données permettront conjointement avec les données de concentration des SS d'établir le bilan sédimentaire des affluents de la rivière Kamouraska. La minéralogie totale des SS a été étudiée par diffraction quantitative des rayons X (qXRD) suivant la méthode développée par Eberl (2003). Nous nous sommes concentrés sur 8 minéraux clés (quartz, feldspath K, plagioclase, carbonates, chlorite, illite, smectite et vermiculite) qui représentaient plus de 96% de la composition minéralogique des SS.

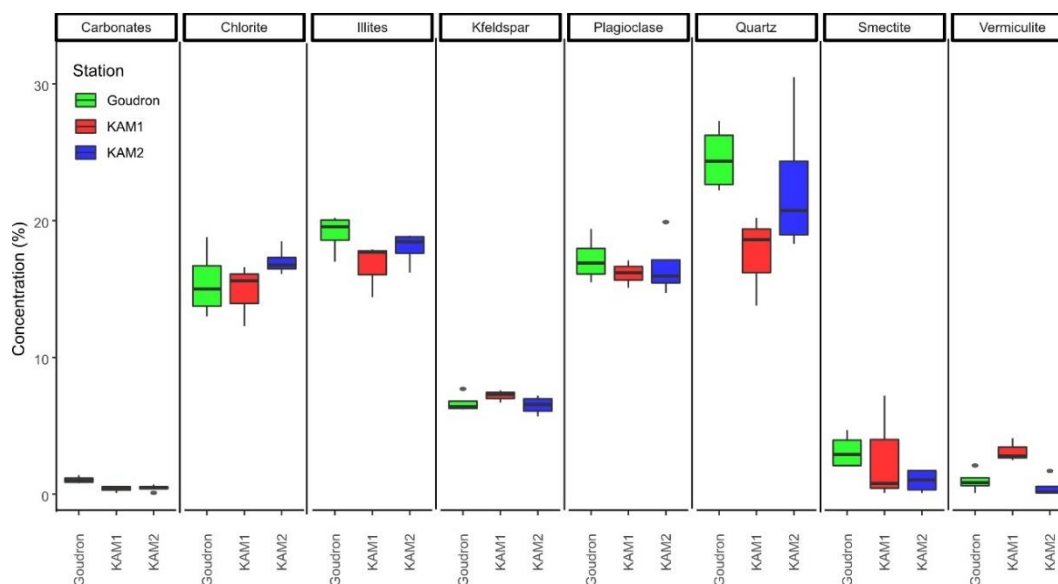


Figure 8.2- Boîte à moustache de la concentration des principaux minéraux des SS des affluents de la rivière Kamouraska

Les données préliminaires (figure 8.2) indiquent que la composition minéralogique est similaire entre les affluents de la Goudron et la Kamouraska pour le quartz (Goudron : 22,6 %; KAM2 25,3 %), les plagioclases (Goudron : 16,6 %; KAM2 17,5 %), les Kfeldspar (Goudron : 6,5 %; KAM2 6,8 %) et l'illite (Goudron : 18,0 %; KAM2 18,7 %). Cependant, la composition entre les affluents diffère pour la chlorite (Goudron : 17,0 %; KAM2 14,4 %), la vermiculite (Goudron : 0,5 %; KAM2 1,3 %) ainsi que la smectite (Goudron : 3,5 %; KAM2 1,0 %). Les données de minéralogies seront par la suite utilisées pour observer s'il est possible de discriminer l'origine des SS en fonction des sous-bassins versants de la rivière Kamouraska.

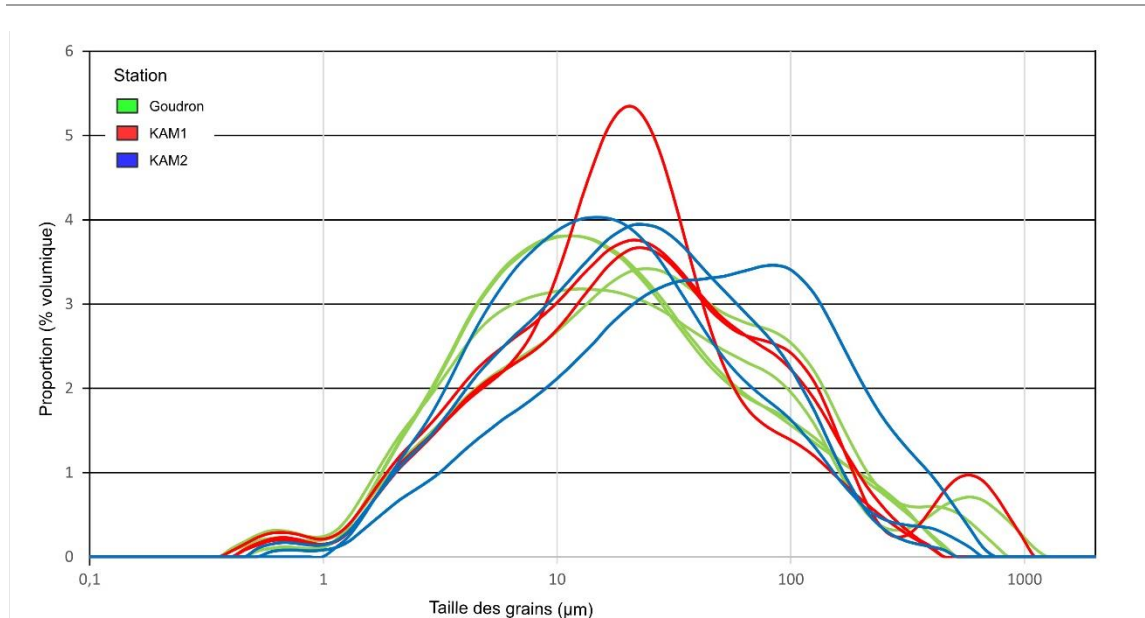
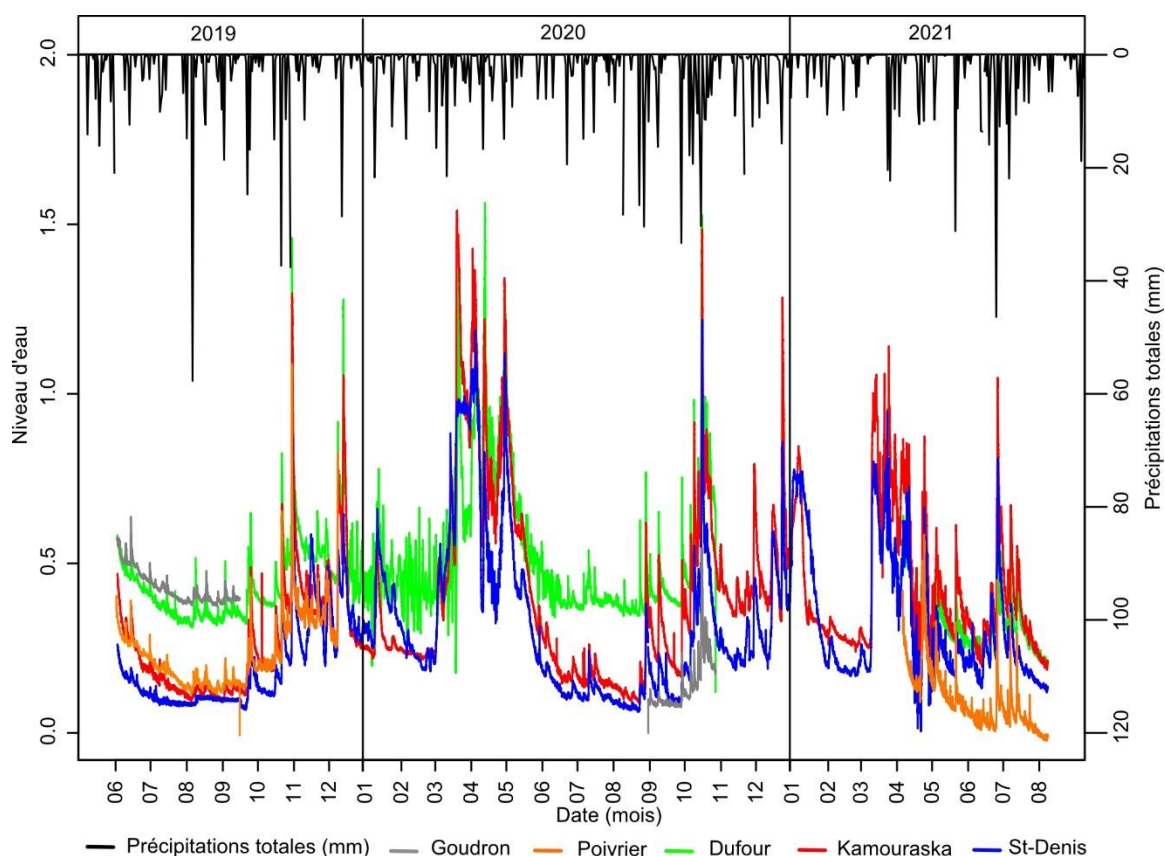


Figure 8.3-Distribution de la taille des grains des sédiments en suspension pour les 3 stations : Goudron (vert), KAM1 (rouge) et KAM2 (bleu).

Des analyses granulométriques des sédiments ont été effectuées sur la fraction totale des SS à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser Beckman Coulter LS13320. Les résultats préliminaires montrent une distribution polymodale de la granulométrie (figure 8.3). La distribution des grains montre que pour les SS des 3 stations, les argiles (<2 μm) et les silts (<63 μm) dominent la granulométrie. Cependant, certains échantillons ont des grains allant jusqu'à 1000 μm correspondant à la classe des sables. Ces résultats suggèrent que les sédiments en suspension sont associés aux argiles et aux silts, mais que des événements ponctuels, tels que les crues, permettent, par saltation, la remise en suspension de grains plus grossiers qui sont quand même captés par les pièges à sédiments. La distribution granulométrique et les paramètres statistiques (par exemple la moyenne et le tri) seront calculés à partir du logiciel GRADISTAT (Blott et Pye, 2001).

8.1.2. Réponses hydrologiques et hydrosédimentaires

Le diagramme montré à la figure 8.4 représente les niveaux d'eau enregistrés dans le BV expérimental durant les deux premières années du projet (figure 3.2). Ces données permettront la réalisation d'un article scientifique sur la réponse hydrologique et hydrosédimentaire de la rivière Kamouraska. Une attention particulière à la description de la réponse hydrologique de la rivière Kamouraska sera portée en fonction de la localisation de ses sous-bassins (agricole ou forestier).



La figure 8.5 représente la réponse hydrosédimentaire obtenue à partir du turbidimètre de la rivière Goudron. Ces données permettront de comprendre les variations des flux sédimentaires en fonction de la réponse hydrologique de la rivière Goudron. Malheureusement aucune donnée n'a pu être récupérée du turbidimètre de la rivière Kamouraska à la suite d'un bris du turbidimètre au cours du déploiement de l'instrument.

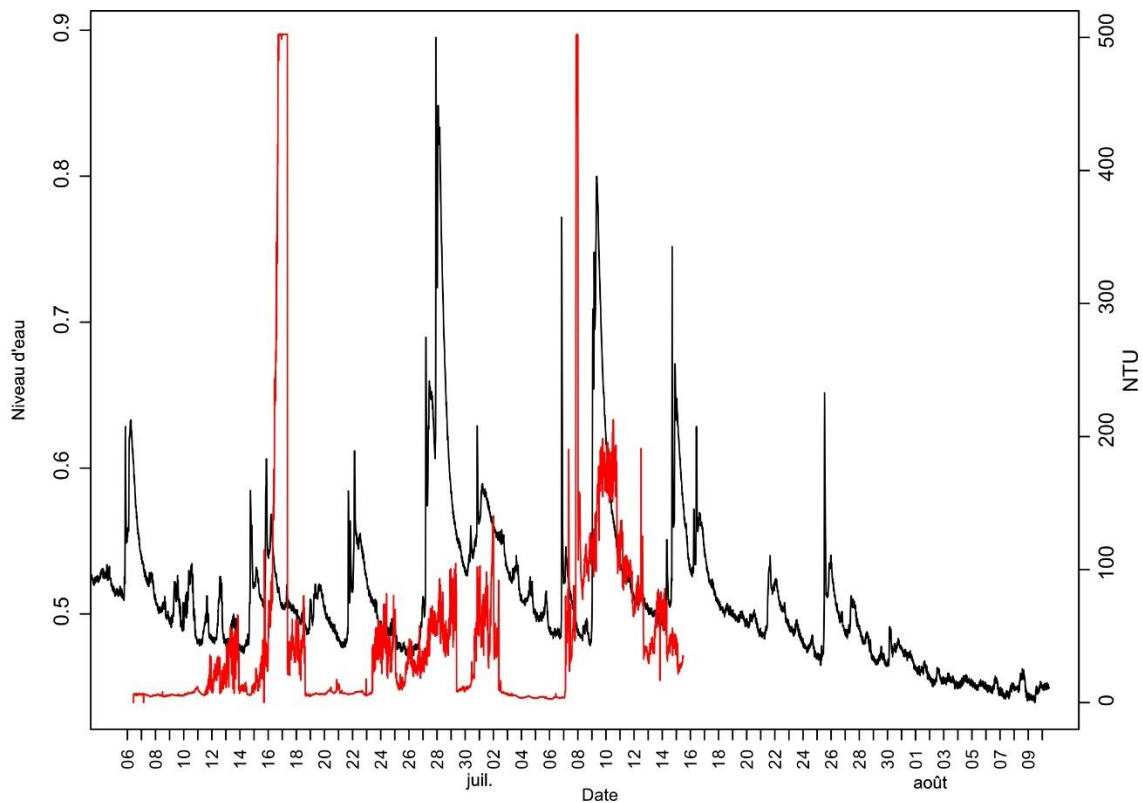


Figure 8.5: Graphique représentant les variations de la turbidité/réponse hydrosédimentaire (NTU) en fonction de la variation hydrologique de la rivière Goudron.

8.2. Résurgences d'eau souterraine en milieu côtier

Les résurgences d'eau souterraine sont communes en milieu côtier, mais encore difficilement quantifiables (figure 8.6). Pourtant ces apports souterrains sont des voies de transfert de composés chimiques du continent à l'océan qui, dans certaines conditions rivalisent avec les apports fluviaux. Jusqu'à présent, la quantification de ces apports se sont communément basés sur l'analyse de radio-isotopes tels que les isotopes du radium (^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra), du radon (^{222}Rn) et les isotopes stables de l'eau. Les bilans

hydrogéologiques régionaux et les données piézométriques sont également parfois utilisés. Ces données, bien que précises et essentielles pour quantifier les apports, ne permettent pas d'avoir une vue globale des panaches de décharge. La mesure de la température de surface de l'eau s'est alors avérée utile pour détecter les décharges d'eau souterraine. L'acquisition d'images infrarouges thermiques aéroportées permet de détecter et cartographier l'étendue des panaches à l'échelle d'un système (du mètre à quelques kilomètres) (figure 8.7). Dans les eaux froides des systèmes arctiques et subarctiques, cette détection est plus ardue.

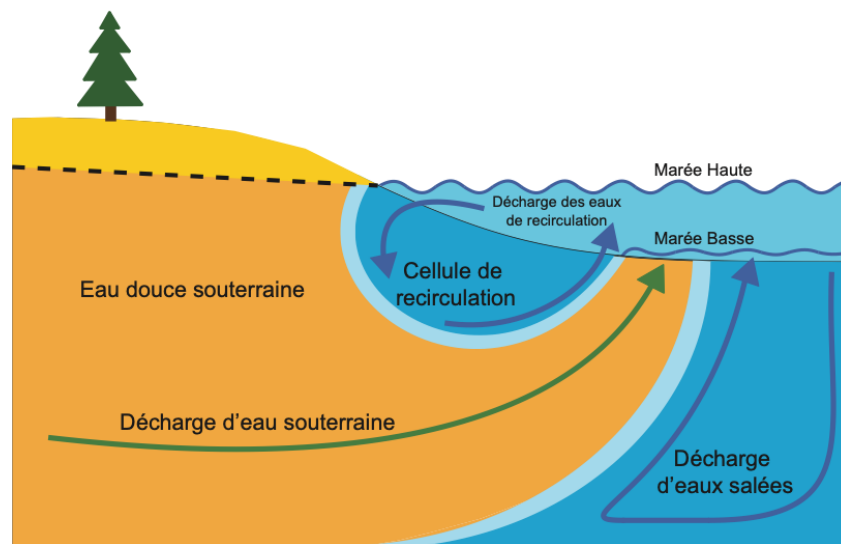


Figure 8.6-Schématisation d'un estuaire souterrain et de la connexion entre les eaux souterraines et les eaux côtières. Les flèches indiquent le déplacement théorique des masses d'eau et les zones de résurgences des eaux souterraines. Le trait pointillé représente la hauteur de la nappe d'eau douce de l'aquifère et sa pente le gradient hydraulique. Les flèches bleues représentent l'infiltration et l'exfiltration de l'eau de mer dans les sédiments perméables des plages (tiré de Sirois, 2018).

Fort de l'expérience développée au cours des dix dernières années dans le cadre de la chaire de recherche du Canada sur la géochimie des hydrogéosystèmes côtiers, et en collaboration avec la chaire en géosciences côtières de l'UQAR (Pascal Bernatchez) et le laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales de l'université Pascal Sabbatier à Toulouse (Pieter van Beek) un projet de thèse a été retenu pour un programme de bourses d'excellence internationale à l'institut des sciences de la mer de Rimouski. Une étudiante brésilienne, Laïsa Peixoto, a été sélectionnée en juin 2020 et a reçu une bourse de thèse de 60000\$ pour réaliser ce projet. Les conditions sanitaires n'ont pas permis à Laïsa de rejoindre l'équipe avant l'automne 2021. Deux campagnes de terrain ont malgré tout été réalisées au cours de l'été et l'automne 2020. La première a eu lieu du 4 au 9 août 2020 sur l'île Verte et la deuxième a été effectuée en collaboration avec l'équipe du Prof. Jean-Michel Lemieux, du 20 septembre au 3 octobre 2020 aux Îles-de-la-Madeleine.

**Développement technologique :
combiner des analyses de traceurs isotopiques avec des images
aéroportées**



Figure 8.7-Illustration du projet avec les outils et techniques développées pour l'analyse combinée d'images aéroportées et de traceurs isotopiques.

8.2.1. Travaux réalisés sur l'Île-Verte (MRC Rivière-du-Loup)

Ces travaux ont été effectués sur la plage du phare, au nord-est de l'île. Ce site a été sélectionné à la suite d'une analyse de la géomorphologie et de la géologie quaternaire du site. Sur ce site, 4 vols de drone muni d'une caméra multispectrale avec une bande en infrarouge thermique ont été réalisés à marée haute (2) et à marée basse (2) à des altitudes de 50 et 30 mètres. Ces vols ont été réalisés en milieu et fin de journées afin que les contrastes de température soient plus saisissants. Des cibles ont été déployées au sol afin de géoréférencer les mosaïques d'images et des mesures de température ont été réalisées à l'aide d'un capteur IR-thermique manuel. Des données de température ont aussi été mesurées dans l'eau de la baie.

Lors du passage du drone, une dizaine d'échantillons d'eau ont été prélevés dans la plage et dans la baie. Les paramètres physico-chimiques (température, conductivité/salinité, oxygène dissous et pH) ont été mesurés à l'aide de sondes multiparamétriques préalablement étalonnées. Des échantillons ont aussi collecté pour mesurer les isotopes du radon et de radium. Brièvement, l'eau a été collectée à l'aide d'une pompe submersible. Des bouteilles de 2L ont été prélevées pour l'analyse du radon. Les échantillons sont fermés hermétiquement et l'analyse s'effectue dans les 24 heures. Le radon est analysé à l'aide de 2 détecteurs de radon montés en série (RAD7 de la compagnie DurrIDGE) selon le protocole décrit par Biehler *et al.* (2020). Pour les isotopes du radium, 20L d'eau sont pompés puis filtrés à 1 L/min sur des fibres acryliques imprégnées de manganèse placées dans des cartouches de filtration spécifiques. Les isotopes de courtes $\frac{1}{2}$ vies (^{223}Ra $T_{1/2} = 11$ jours et ^{224}Ra $T_{1/2} = 3,66$ jours) sont analysés dans les heures suivantes sur des compteurs RaDeCC. Le RaDeCC, Radium Delayed Coincidence Counter, a été développé par Moore et Arnold (1996) sur la base des travaux de Giffin *et al.* (1963). Le RaDeCC est un scintillateur alpha spécialement adapté à l'analyse des isotopes du radium de courte période radioactive (^{223}Ra et ^{224}Ra). Les activités des deux autres isotopes (^{226}Ra $T_{1/2} = 1600$ ans et ^{228}Ra $T_{1/2} = 5,75$ ans) seront déterminées ultérieurement par spectrométrie gamma bas niveau au LEGOS.

Les analyses de radon ont aussi été systématiquement effectuées sur les échantillons d'eau souterraine prélevés à partir de puits privés (voir section 3.2.3). Deux puits, les plus proches de notre site d'étude, ont aussi été échantillonnés pour l'analyse du radium, un puits de surface et un puits au roc. En tout, ce sont 12 échantillons d'eau de mer et d'eau souterraine dans la zone de décharge et dans les puits privés qui ont été prélevés. Tous les résultats sont en cours d'analyse et de nombreux traitements sont encore à faire pour avoir des résultats robustes.

8.2.2. Travaux réalisés aux îles-de-la-Madeleine (en collaboration avec ULaval)

Malgré les conditions sanitaires, deux professionnels (Gwendoline Tommi-Morin et Antoine Biehler) ont pu rejoindre l'équipe de l'Université Laval du Professeur Jean-Michel Lemieux sur l'archipel au cours de l'automne. Les images en IR-thermiques ont été collectées avant notre arrivée sur deux sites d'intérêt: la plage de la Martinique sur le Chemin des Chalets et la plage du Bassin Est sur l'île de Grande-Entrée. Le premier site a déjà fait l'objet de nombreux travaux sur la dynamique biogéochimique et hydrogéologique par l'équipe de l'UQAR. Des flux d'eau souterraine y ont été calculés à deux reprises au printemps 2013 et 2015 et des analyses de radon et isotopes stables de l'eau ont permis de quantifier les apports à la baie. Le site de Grande Entrée est aussi d'intérêt, car non seulement l'équipe de Laval y a installé de nombreux instruments afin de caractériser la position du biseau salé et faire de la modélisation hydrogéologique, mais aussi un projet du PPO y est actuellement en cours avec l'organisme Attention Fragile.

Dans les deux sites, plusieurs piézomètres ont été installés sur des transects haut de plage – bas de plage, chacun instrumenté avec des capteurs de pression de type HOBO afin d'y suivre les niveaux d'eau. En parallèle, une douzaine d'échantillons ont été collectés dans les plages, en haut de plage et bas de plage, à différent temps de marée. Comme sur l'île Verte, les paramètres physico-chimiques ont été mesurés in situ, et les échantillons collectés afin d'y mesurer les isotopes du radon et du radium. Dans chaque site, des transects en mer ont été effectués à partir d'une petite embarcation

(collaboration avec MERINOV) afin de collecter des échantillons pour le radium. Ici, 40 L ont été pompés puis filtrés sur des fibres acryliques imprégnées de manganèse comme décrit précédemment. Avec cette approche, nous devrions non seulement effectuer des bilans de masse avec le radon et les isotopes de courte $\frac{1}{2}$ vie du radium, mais aussi calculer des coefficients de diffusion K_h à partir de la distribution du radium, qui nous permettront de quantifier les apports d'eau douce.

8.3. Salinisation et potabilité des eaux souterraines du Québec Maritime (RIISQ-RQM)

Au cours de l'automne 2020, le réseau Québec maritime (RQM) et le Réseau inondation intersectorielle du Québec (RIISQ) faisaient un appel à projet conjoint pour traiter de problématiques en lien avec la gestion des risques d'inondation sur l'ensemble du territoire maritime du Québec, incluant le système Saint-Laurent (continuum fleuve-estuaire-golfe) et les zones côtières du nord du Québec. Cet appel pour des projets intersectoriel (regroupant au moins 2 des 3 secteurs de recherche des fonds de recherche du Québec, FRQ) était pour nous l'opportunité de nous attaquer à une problématique émergente dans notre territoire côtier et lié à la potabilité des aquifères côtiers.

Nos partenaires du milieu provincial, municipal ainsi que les OBVs se sont rapidement mobilisés autour de ce projet, car l'accès à une eau potable de qualité est un enjeu crucial et bien connu dans l'est du Québec, tant pour la santé humaine que pour le développement socio-économique de la région. Ce projet est donc hautement complémentaire aux PACES du NEBSL, du KRT, mais aussi du projet pilote en Gaspésie. Il est aussi en adéquation avec les actions du programme sur les changements climatiques du MELCC. De plus, l'accès à une eau potable de qualité s'inscrit dans l'axe d'intervention portant sur l'adoption de modes de vie et la création d'environnements sains et sécuritaires du Programme national de santé publique 2015-2025. La problématique de qualité de l'eau est aussi au cœur des plans directeurs de l'eau des organismes de bassins versants (OBV) et a été identifiée par l'OBKIR et l'OBV-NEBSL comme un enjeu majeur

du territoire côtier du sud de l'estuaire. Nos partenaires des MRC de Kamouraska et Rivière-du-Loup participent déjà activement à toutes nos activités d'échanges de connaissances coorganisées avec le Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES) et bénéficient d'un accompagnement spécifique pour les problèmes de salinisation et de contamination à l'arsenic que nous avons relevés dans leurs territoires côtiers. L'échange de connaissances et l'élaboration de mesures d'adaptation et d'un plan d'action contribueront à sensibiliser les citoyens, mais aussi à outiller nos partenaires qui sont actuellement bien démunis face à cette problématique.

L'équipe est constituée de Gwénaëlle Chaillou (géochimiste - ISMER/UQAR), Pascal Bernatchez (géographe - UQAR), Lili Lessard (santé des communautés - UQAR), Bruno Molusky (communication du risque – UQAM), Thomas Buffin-Bélanger (géographe -UQAR) et Gwendoline Tommi-Morin (B.Sc. Chimie – UQAR). Le projet a été financé pour 2 ans. Un site internet (<https://osalis.ca/>) et une page facebook sont en cours de réalisation. Des capsules explicatives ont été tournées durant l'été 2021 (figure 8.8) et les vidéos sont actuellement en cours de montage. Un résumé du projet est présenté ci-dessous.



Figure 8.8-Tournage de capsule explicative avec le professeur Bernard Motulsky et Marylène Kouri.

Résumé du projet O'Salis: Le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie sont deux régions vulnérables à la salinisation des aquifères côtiers, la plus importante forme de contamination des eaux potables, en raison de la hausse du niveau marin et de la fréquence des inondations côtières, qui s'accroissent avec le changement climatique. Entre 30 et 50 % de leurs populations s'approvisionnent en eau potable à partir de puits qui extraient les eaux souterraines, la plupart situés à 5 km ou moins de la côte. La salinisation de ces puits oblige les citoyens à se tourner vers l'eau embouteillée ou vers des puits plus profonds, qui les exposent parfois à leur insu à des contaminants plus nocifs encore. Notre projet permettra d'évaluer la vulnérabilité et les risques de salinisation des eaux souterraines liés à la hausse du niveau marin et aux inondations marines en milieu côtier; et d'outiller les communautés côtières aux prises avec ces problèmes par des stratégies et des activités de communication adaptées. Ce projet contribuera à renforcer la résilience des communautés dans un contexte de changement climatique par la

documentation et la mitigation des impacts à court terme de la salinisation des aquifères côtiers et par la prévention de ses impacts à long terme sur la santé humaine. La collaboration des citoyens et l'implication dans le projet des acteurs locaux et régionaux des secteurs publics et privés contribueront à une meilleure compréhension de la vulnérabilité, de l'adaptation et de la résilience des communautés côtières de la zone sud de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

8.4. Changements CLimatiques et Qualité de l'Eau (CLIQUE): flux de matière et transformations biogéochimiques au sein d'un bassin versant appalachien

Au cours de l'automne 2021, le Consortium de recherche dédié à l'eau – Osmoz faisait un appel à projets pour traiter de problématiques en lien avec la qualité de l'eau en milieu naturel. Cet appel était pour nous l'opportunité de nous attaquer à une problématique émergente au Québec et dans notre territoire sur la qualité des eaux de surface. Nos partenaires du milieu provincial (MAPAQ), municipal (MRC de Kamouraska et les municipalités de Kamouraska et de St-Pascal) ainsi que l'OBV (OBAKIR) se sont rapidement mobilisés autour de ce projet, car la qualité des eaux de surface en lien avec les changements climatiques est un enjeu crucial, tant pour la santé humaine que pour le développement socio-économique de la région. Ce projet est donc hautement complémentaire aux PACES du KRT. Il est aussi en adéquation avec les actions du programme sur les changements climatiques du MELCC. L'équipe est constituée de Gwénaëlle Chaillou (géochimiste-ISMER/UQAR), Pascal Bernatchez (géographe-UQAR), Thomas Buffin-Bélanger (géographe-UQAR) et Charles-Edouard Deschamps (PhD-ISMER/UQAR).

Ce projet s'organise suite aux nombreuses années de collaborations, d'échange et de mobilisation des connaissances avec les acteurs locaux et régionaux, notre équipe a développé une expertise unique sur les enjeux de la qualité des eaux de surface (et souterraine) dans l'est du Québec, notamment en lien avec le Règlement sur le Prélèvement des Eaux et leur Protection (RPEP). Le projet que nous proposons s'appuie

sur des questions, et des inquiétudes, qui ont émergé au cours de diverses rencontres avec les organismes de bassin versant, les aménagistes et géographes des MRCs et les élus municipaux. Notre projet CLIQE s'intéresse à l'impact des changements climatiques sur la qualité de la ressource en eau de surface dans un petit bassin versant agroforestier appalachien dans le Bas-Saint-Laurent. Le projet que nous proposons nécessite des connaissances multidisciplinaires au croisement entre l'hydrogéologie, la géomorphologie et la géochimie et s'appuie sur le partage et la mobilisation des savoirs avec les acteurs locaux. Plus spécifiquement nous proposons un suivi et une caractérisation des concentrations et flux de MPS, des espèces azotées et du carbone. Les travaux s'organiseront selon les trois volets suivants: (1) Comprendre la dynamique et les variations du transport des MPS en lien avec la variabilité spatiale et temporelle de la réponse hydrologique du bassin versant de la Kamouraska. (2) Déterminer les sources d'azote et quantifier les flux et les processus de transformation biogéochimiques. (3) Dresser un bilan de carbone à l'échelle du bassin versant.

8.5. Mémoire de baccalauréat

Dans le cadre du cours « mémoire de baccalauréat (GEO41001) », l'étudiante en dernière année du baccalauréat en géographie de l'UQAR, Frédérique Dumont, a orienté sa recherche sur la caractérisation de la moraine de Saint-Antonin. La section 8.5.1 présente un résumé de son mémoire qui est disponible sur demande.

Dans le cadre du cours « Sujet spéciaux en géographie I (GEO42104) », du baccalauréat en géographie de l'UQAR, Yan Boulet, lui aussi étudiant en dernière année, s'est intéressé à une méthode alternative de cartographie des eaux souterraines à l'aide des modèles numériques d'élévations et de données géospatiales. Développée à petite échelle (l'île Verte, municipalité de Notre-Dame-des-Sept-Douleurs), nous espérons que son travail pourra ensuite être appliqué dans le cadre du projet pilote de la Gaspésie. La section 8.5.2 présente un résumé de son travail qui est disponible sur demande.

8.5.1. Cartographie et description des dépôts morainiques dans les monts Notre-Dame, Kamouraska, Frédérique Dumont

Le cadre stratigraphique régional du Bas-Saint-Laurent comprend trois étapes déterminantes : le recouvrement de l'ensemble du territoire par l'inlandsis laurentidien avec un écoulement sud-sud-est; l'inversion de l'écoulement glaciaire suite à la formation d'un courant de glace dans l'axe du Saint-Laurent; la scission entre l'inlandsis laurentidien et la calotte appalachienne par une baie de vêlage. Au niveau du Kamouraska, la proximité entre les deux rives du Saint-Laurent ainsi que la force plus faible du courant de glace entraîne une incertitude quant à l'origine laurentidienne ou appalachienne des dépôts meubles présents sur le territoire. Si les dépôts morainiques à proximité de la zone littorale ont été étudiés à plusieurs reprises, on constate un hiatus spatial dans l'identification des dépôts morainiques par manque de données terrain au niveau des hauts plateaux appalachiens.

Le mémoire de baccalauréat avait pour objectifs de : (1) préciser la cartographie des fronts morainiques à l'aide de modèles numériques d'élévation (MNE) de résolutions variant entre 1 et 10 m; (1) comparer les caractéristiques sédimentologiques de sites échantillonnés selon des axes est-ouest ainsi que nord-sud pour déterminer la cohérence entre les dépôts morainiques; (3) établir l'origine des dépôts par des comptages pétrographiques. La cartographie des segments morainiques sur les MNE a fait ressortir trois contextes de déposition morainique dans les hauts plateaux du Kamouraska: au contact de la mer de Goldthwait; en marge du piedmont appalachien; dans les vallées confinées des monts Notre-Dame. La cohérence des données sédimentologiques et des spectres pétrographiques pour l'ensemble des sites échantillonnés indique une même origine des dépôts. Ces résultats concordent avec le schéma de déglaciation proposé par Chauvin *et al.* (1985) qui est une adaptation de celui initialement proposé par LaSalle *et al.* (1977). Ainsi, les ceintures morainiques du Kamouraska auraient été déposées par un front glaciaire actif de glace appalachienne.

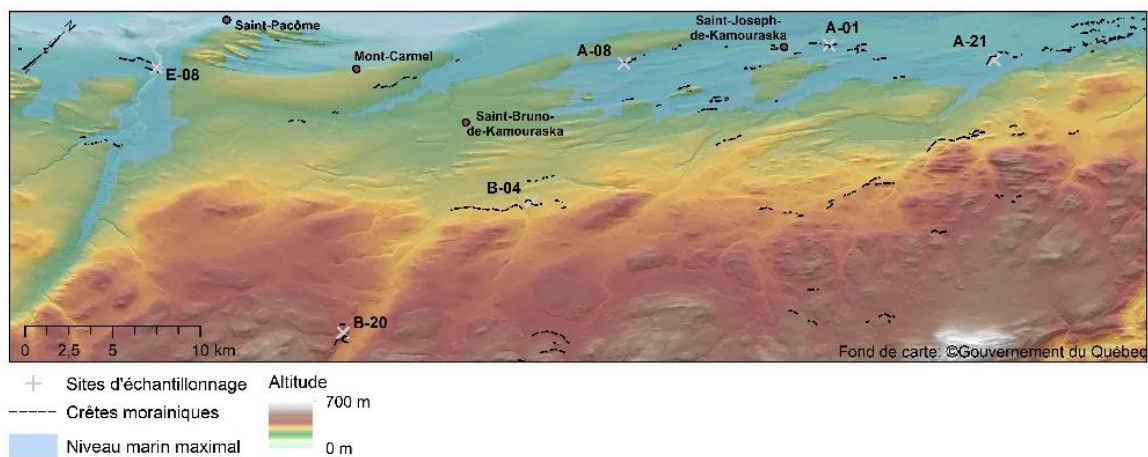


Figure 8.9- Crêtes morainiques identifiées à partir des cartes des ombres des MNE de résolutions 1m et 10m et localisation des sites échantillonnés

8.5.2. Élaboration d'une méthode de cartographie des eaux souterraines à partir de données géospatiales et de modèle numérique d'élévation, Yan Boulet, 2019

Les connaissances sur les eaux souterraines de l'est du Québec sont limitées. Certaines régions se prêtent bien à l'acquisition de mesures prises sur le terrain pour déterminer le niveau de la nappe phréatique, mais ce n'est pas le cas de la Gaspésie. En effet, la population étant concentrée le long du littoral (route 132) et de deux routes transversales (routes 198 et 299), le réseau routier ne permet pas un accès facile à l'entièreté de ce vaste territoire. Des méthodes alternatives existent comme le *depth water table interface* DTWI (White *et al.*, 2012; Tiwari *et al.*, 2016), l'interpolation spatiale (Minnesota DNR, 2016) et la fusion de données bayésienne (Fasbender *et al.*, 2008). En utilisant les données disponibles, différentes méthodes ont été testées sur le territoire de la municipalité de Notre-Dame-des-Sept-Douleurs (MRC de Rivière-du-Loup) pour déterminer la méthode la plus exacte et la plus efficace afin de déterminer le niveau de la nappe phréatique à l'aide de système d'information géographique. Cette méthode pourrait ensuite être appliquée au territoire de la Gaspésie et ailleurs. La figure 8.10 montre le type de données obtenues avec cette méthode.

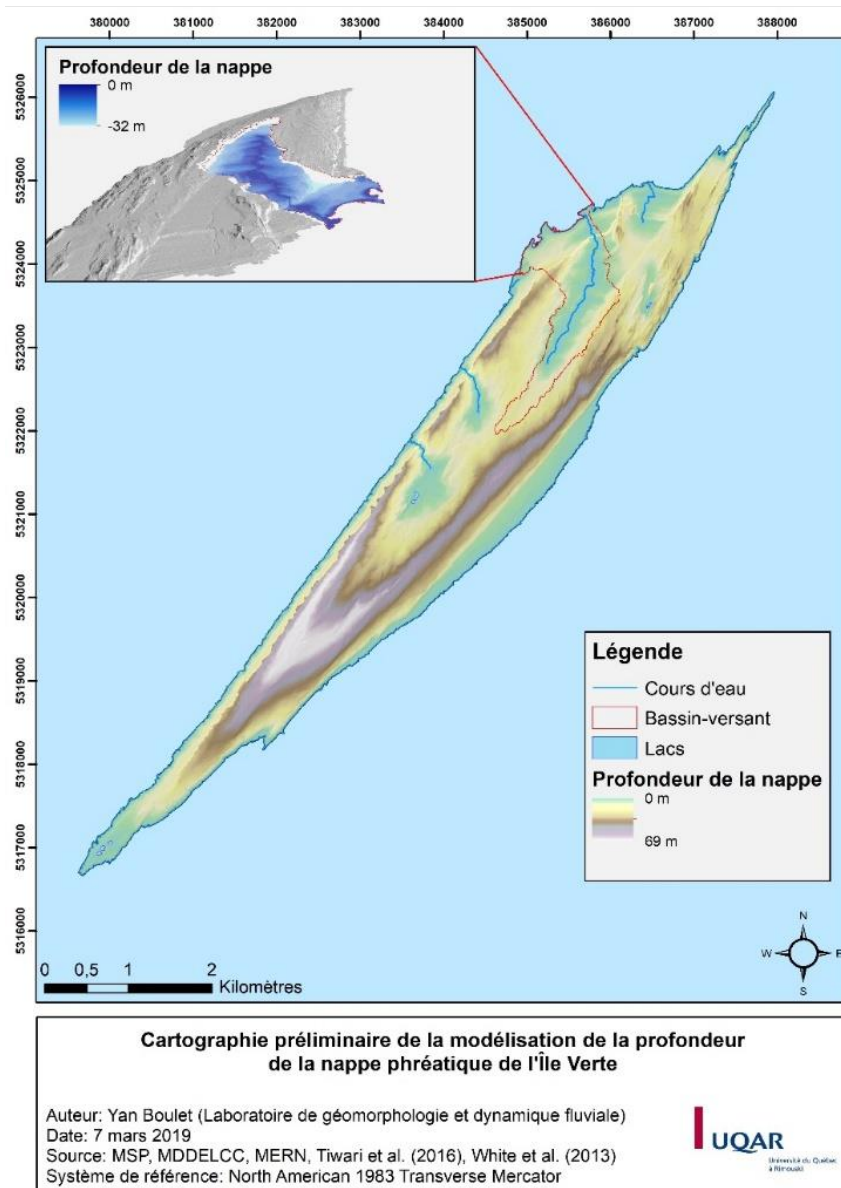


Figure 8.10- Cartographie non ajustée de la modélisation à l'aide du depth to water index (DTWI) sur le territoire de Notre-Dame-des-Sept-Douleurs.

Conclusion et recommandations

Les résultats présentés dans ce rapport sont 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 KRT qui ont donné accès non seulement à leurs puits pour l'échantillonnage, mais aussi à leur terrain pour l'installation de piézomètres, de forages et la réalisation d'essai de perméabilité. **L'objectif du PACES-KRT était de compiler, d'uniformiser, d'actualiser et de bonifier les connaissances sur les eaux souterraines de la région ouest du Bas-Saint-Laurent.** Suites aux multiples rencontres avec nos partenaires, le PACES KRT a mis l'emphasis sur :

- 1) dresser un portrait de la qualité et la vulnérabilité de l'eau souterraine (métaux traces, salinité, bactériologies) des MRC du Kamouraska, Rivière-du-Loup et Témiscouata,
- 2) assurer l'échange de connaissances avec les partenaires régionaux en leur offrant un accompagnement en bonifiant les livrables PACES, en personnalisant l'analyse des résultats obtenus lors des campagnes terrains et en misant sur l'écoute active de leurs besoins.

À la suite de nos travaux, plusieurs recommandations émergent et sont classées en trois catégories.

Recommandations générales quant à la gestion de l'eau souterraine

- Alors que les règlements et les financements qui concernent la gestion des ressources en eau s'intéressent aux eaux de surface et aux eaux souterraines comme des entités distinctes, il est recommandé de continuer à intégrer et à considérer ces deux entités comme une unique et même ressource connectée.
- Le PACES-KRT dresse un portrait ponctuel des aquifères régionaux. Basé sur nos observations, il est recommandé de bonifier et mettre à jours les bases de données aux cinq (5) ans afin de suivre le devenir de la ressource face à différents changements, qu'ils soient anthropiques ou climatiques.
- La gestion de la ressource en eau se fait par la participation et l'implication des instances mandatées. Il est recommandé d'assurer une concertation régionale entre les organismes intéressés à assurer la gouvernance de la ressource. Il est aussi recommandé de clarifier le rôle des organismes déjà présents sur le territoire dans cette concertation pour assurer la pérennisation des démarches et des livrables émanant du projet PACES.
- Il est recommandé d'assurer la formation des acteurs qui œuvrent dans la gestion de l'eau dans la région du KRT. Cette mobilisation initiée dans le cadre du PACES devrait valoriser les connaissances acquises et les faire percoler dans les formations générales et continues des acteurs de la gestion de l'eau.
- Les études géochimiques ont démontré une problématique généralisée de manganèse sur le territoire du KRT en fonction des recommandations pour la qualité de l'eau potable émise par Santé Canada en juin 2019. Quoique le Québec soit déjà en examen de cette problématique, il est recommandé que les ministères se positionnent rapidement afin de prévenir toute insécurité chez les citoyens touchés par cette problématique.
- Des dépassements de norme en arsenic ont localement été détectés sur le territoire du KRT. Face à cette contamination naturelle alarmante, il est recommandé de clarifier le rôle des instances mandatées afin d'informer et

- d'assurer un suivi auprès des citoyen.ne.s. Il est recommandé que les entités dont c'est le rôle aient les moyens et le leadership pour assurer la santé des citoyens.es.
- Il est recommandé d'entreprendre la couverture des territoires non municipalisés et faiblement habités qui, dans notre région, abritent les zones de recharge préférentielle de l'aquifère au roc.
 - Il est recommandé de développer des outils de gestion de la ressource en fonction des enjeux régionaux.

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

- Les cartes émanant du projet PACES-KRT 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.
- Sur le territoire KRT, les aquifères au roc sont majoritairement exploités. Ces aquifères sont dépendants de leurs zones de recharge. Il est recommandé d'assurer leur protection par un suivi des activités se déroulant dans les zones d'alimentation qui se trouvent sur les hauts plateaux suivant les monts Notre-Dame, indépendamment des limites municipales.
- Il est recommandé de mieux intégrer les connaissances acquises lors du PACES-KRT 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 au roc 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.
- Bien que la qualité de l'eau soit généralement bonne sur le territoire du PACES-KRT, les travaux ont révélé des dépassements localement, tant pour les critères esthétiques que pour les concentrations maximales acceptables pour la santé. Ainsi, il est recommandé de créer une base de données sur la qualité de l'eau souterraine centralisée au MELCC pour chacun des puits privés et publics forés par les puisatiers, au même titre que la base de données du SIH. Les données géochimiques pourraient par exemple être transmises par les laboratoires d'analyse, après signature d'une clause de partage. Un groupe de discussion devrait être mis en place afin de déterminer les paramètres qui devraient être systématiquement analysés. Ces données faciliteraient et assureraient une mise à jour constante de la base de données initiée par les PACES.

Recommandations scientifiques

- Il est recommandé de poursuivre l'échantillonnage d'eaux de pluie, souterraines et de neige afin de 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, sa dynamique dans l'espace et sa trajectoire dans le temps.
- La haute qualité des données recueillies dans le cadre du projet 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.

- Afin d'optimiser l'utilisation des données de forages, il est recommandé de mettre en place un protocole afin d'uniformiser et ainsi assurer une qualité optimale des données transmises au SIH.
- Basés sur les connaissances des types de dépôts de surface, les monadnocks joueraient probablement un rôle de zone de recharge locale préférentielle dans la plaine côtière. Il est recommandé d'effectuer des recherches plus approfondies sur le rôle essentiel des monadnock dans la plaine côtière du KRT.
- Dans le KRT, nos études aux échelles régionales et annuelles ne révèlent pas de problématique en réponse aux changements climatiques, par exemple, en lien avec la hausse des niveaux marins et l'évolution des recharges. Cependant, à l'échelle locale, certaines conséquences sont déjà visibles. Il est donc recommandé de raffiner les résolutions spatiales et temporelles des études portant sur les conséquences des changements environnementaux sur la ressource en eau.

Recommandations relatives aux travaux PACES

- Il est recommandé de transformer les projets pilotes des territoires non couverts par des projets adaptés aux réalités et problématiques de la Gaspésie, de la Côte-Nord et du Nord-du-Québec.
- Afin d'assurer la pérennisation des savoirs et le développement des connaissances dans les pôles régionaux mis en place par les projets PACES, il est recommandé de mettre en place un programme de financement ciblé qui permet de répondre à des problématiques plus locales.

Références

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). 2008. Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique. Collection cours de formation no 32. 613 p.

Aitchison, J. 1990. Relative variation diagrams for describing patterns of compositional variability. *Mathematical Geology* 22: 487-511.

Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.J., Hackett G. 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA600/2-87-035

Asadi Mohammad Abadi, A., Rahimi, M., et Jabbari Koopaei, L. 2015. The effect of geological structure on radon concentration dissolved in groundwater in nearby Anar fault based on a statistical analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 308(3): 801-807.

Association forestière bas-laurentienne. 2019. Site internet consulté janvier 2019. <http://www.afbl.info/flash-foret/>

Banks, D., et Frengstad, B. 2006. Evolution of groundwater chemical composition by plagioclase hydrolysis in Norwegian anorthosites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1337-1355.

Berthot L., Pinti D.L., Larocque M., Gagné S., Ferlatte M., Cloutier V. 2016. Exploring ²²²Rn as a tool for tracing groundwater inflows from eskers and moraines into slope peatlands of the Amos region of Quebec, Canada. *J Environ Radioact* 164:344–353

Biehler, A., Chaillou, G., Buffin-Bélanger, T., et Baudron, P. 2020. Hydrological connectivity in the aquifer–river continuum: Impact of river stages on the geochemistry of groundwater floodplains. *Journal of Hydrology* 590: 125379.

Blott, S.J., et Pye, K. 2001. GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistic Package For the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 1237-1248.

Bourque, P.-A., Gosselin, C., Kirkwood, D., Malo, M. et St-Julien, P. 1993. Le Silurien du segment appalachien Gaspésie-Matapédia-Témiscouata : stratigraphie, géologie structurale et paléogéographie. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, MB 93-25, 115 p.

Brisebois, D. et Brun, J. 1994. La plate-forme du Saint-Laurent et les Appalaches. p. 95-120. *In* Hocq, M. (coordonnateur) et Dubé, C. (éditeur). Géologie du Québec. Les Publications du Québec, MM 94-01, 154 p.

Buffin-Bélanger T et Hétu B. 2008. Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'est du Québec. *Proceeding of the 4ème Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion*. Presse de l'Université Laval: Québec, Canada. 359–366.

Buffin-Bélanger, T., Chaillou, G., Cloutier, C-A., Touchette, M., Hétu, 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. 199 p.

Buteau, P., 1985. Propriétés physico-chimiques de la tourbe du Québec méridional en vue d'utilisations industrielles. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la Géologie, ET 85-09, Québec.

Cane, G., et Clark, I.D. 1999. Tracing ground water recharge in an agricultural watershed with isotopes. *Ground water* 37: 133-139.

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. et 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, l'IRDA et Géomont, Rapport final INRS, soumis au MDDEFP et aux partenaires régionaux du projet en mars 2013.

Chaillou, G., Touchette, M., Buffin-Bélanger, T., Cloutier, C.A., Hétu, B., et Roy, M.A. 2018. Hydrogeochemical evolution and groundwater mineralization of shallow aquifers in the Bas-Saint-Laurent region, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 43: 136-151.

Chauvin, L., Martineau, G. et LaSalle, P. 1985. Deglaciation of the Lower St. Lawrence Region, Quebec. *Geological Society of America, Special Paper* 197: 111-123.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Bourque, É., et Therrien, R. 2006. Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Québec, Canada. *Hydrogeology Journal* 14(4): 573-590.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., et Savard, M.M. 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology* 353(3-4): 294-313.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., et Therrien, R. 2010. Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. *Environmental Earth Sciences* 59(5): 977-994.

Croteau, A. 2006. Détermination de la distribution spatiale et temporelle de la recharge à l'aquifère régional transfrontalier du bassin versant de la rivière Châteauguay, Québec et États-Unis. Québec: Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de la terre. 345p.

Dalton, A.S., Margold, M., Stokes, C.R., Tarasov, L., Dyke, A.S., Adams R.S., Allard, S., Arends, H.E., Atkinson, N., Attig, J.W., et al. 2020. An updated radiocarbon-based ice margin chronology for the last deglaciation of the North American Ice Sheet Complex *Quaternary Science Review*. 234: 106223.

David, J., Chabot, N., Marcotte, J., Lajoie, J. et Lespérance, P.J. 1985. Stratigraphy and sedimentology of the Cabano, Pointe aux Trembles, and Lac Raymond formations, Témiscouata and Rimouski counties, Quebec. *In Current Research, Part B, Geological Survey of Canada* 85(1B): 491-497.

Dean, D.J., Topping, D.J., Schmidt, J.C., Griffiths, R.E., et Sabol, T.A. 2016. Sediment supply versus local hydraulic controls on sediment transport and storage in a river with large sediment loads. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121(1): 82-110.

Dionne, J.-C. 1977. La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et quaternaire* 31: 61-80.

Dionne, J.-C. 2001. Relative- sea-level changes in the St. Lawrence Estuary from deglaciation to present day. In: *Deglacial History and Relative Sea-Level Changes, Northern New England and Adjacent Canada* (Ed. by T.K. Weddle & M.J. Retelle), pp. 271-284 *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 351, Boulder, Colorado

Dionne, J.-C. 2002. Une nouvelle courbe du niveau marin relatif pour la région de Rivière-du-Loup (Québec). *Géographie physique et quaternaire* 56: 33–44.

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*. 61 : 195-210.

Drolet, J.P., Martel, R., Poulin, P., Dessau, J.C., Lavoie, D., Parent, M., et Lévesque, B. 2013. An approach to define potential radon emission level maps using indoor radon concentration measurements and radiogeochemical data positive proportion relationships. *Journal of Environmental Radioactivity* 124: 57-67.

Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S. et Meyzonnat, G. 2021. Simulation of long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge: Contributions of a water budget approach in southern Quebec, Hydrology and Earth System Science.

Dumais, P., Poirier J. et Rousseau, G. 1998. La préhistoire du Témiscouata, trente ans plus tard. *Paléo-Québec*. 27: 53–80

Dumont, F. 2019. Cartographie et description des dépôts morainiques dans les Monts Notre-Dame, Kamouraska. Mémoire de BSc., Module de géographie, Université du Québec à Rimouski, 24 p.

Eberl, D.D. 2003. User guide to RockJock—A program for determining quantitative mineralogy from X-ray diffraction data. USGS Open File Report OF 03-78: 40.

Estrany, J., Garcia, C., et Batalla, R.J. 2009. Suspended sediment transport in a small Mediterranean agricultural catchment. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 929-940.

Fasbender, D., Tuia, D., Bogaert, P., et Kanevski, M. 2008. Support-Based Implementation of Bayesian Data Fusion for Spatial Enhancement: Applications to ASTER Thermal Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5(4): 598-602.

Filzmoser, P., Hron, K., et Reimann, C. 2009. Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics* 20: 621-632.

Financière Agricole du Québec. 2018. Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées. [Données numériques vectorielles]. 1/20 000, Québec, Québec.

Gagné, G., Beaudin, I., Leblanc, M., Drouin, A., Veilleux, G., Sylvain, J., et Michaud, A. 2013. Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. *Rapport final*. Québec, Canada.: IRDA. 81 p.

Gay, A., Cerdan, O., Delmas, M., et Desmet, M. 2014. Variability of suspended sediment yields within the Loire river basin (France). *Journal of Hydrology* 519: 1225-1237.

Gay, A., Cerdan, O., Mardhel, V., et Desmet, M. 2015. Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils and Sediments* 16(1): 280-293.

Gibbs, R.J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 170: 1088-1090.

Giffin, C., Kaufman, A., et Broeker, W. 1963. Delayed coincidence counter for the assay of actinon and thoron *Journal of Geophysical Research*. 68(6): 1749-1757.

Giménez, R., Casalí, J., Grande, I., Díez, J., Campo, M.A., Álvarez-Mozos, J., et Goñi, M. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre (Spain). *Agricultural Water Management* 110: 1-8.

Gorman, W.A. 1961. Escourt-Baker Lake area. Ministère des Richesses Naturelles, Exploration Géologique, Gouvernement du Québec, Rapport final, DP-472, 29 p.

Grangeon, T., Manière, L., Foucher, A., Vandromme, R., Cerdan, O., Evrard, O., Pene-Galland, I., et Salvador-Blanes, S. 2017. Hydro-sedimentary Dynamics of a Drained Agricultural Headwater Catchment: A Nested Monitoring Approach. *Vadose Zone Journal* 16(12): 1-12.

Gröning, M., Lutz, H.O., Roller-Lutz, Z., Kralik, M., Gourcy, L. et 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: 195-200.

Henderson, T. 1984. Geochemistry of ground water in two sandstone aquifer systems in the Northern Great Plains in parts of Montana, Wyoming, North Dakota, and South Dakota. U.S. Geological Survey Professional Paper (United States).

Hétu, B. 1998. La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-St-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): 1-23.

Hubert, C. 1973. Région de Kamouraska : La Pocatière / Saint-Jean-Port-Joli. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'exploration géologique, Gouvernement du Québec, R.G. 151, 205 p.

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. et Stuckenrath, R. 1989. Postglacial evolution of drainage in the middle and upper St. John River Basin, Maine and New Brunswick. In *Quaternary geology studies in Maine Geology*. Edited by R. D. Tucker and R. G. Marvinney. Maine Geological Survey 6, Augusta, Maine, pp. 35–42.

Ladson, A., Brown, R., Neal, B., et Nathan, R., 2015. A Standard Approach to Baseflow Separation Using The Lyne and Hollick Filter. *Australasian Journal of Water Resources*, 17(1): 25-34.

LaSalle, P., Martineau, G. et Chauvin, L., 1977. Morphologie, stratigraphie et déglaciation dans la région de Bauce – Monts Notre-Dame – Parc des Laurentides. Ministère des richesses naturelles, Québec, DPV-516, 74 p.

Lavoie, D. 2008. Appalachian Foreland Basin of Canada. 65-103 p. *in* Miall, A.D. (éditeur) *Sedimentary Basins of the World – United States and Canada*, Vol. 5, Elsevier Science, 624 p.

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. Superficial geology: Grand Falls, Madawaska and Victoria counties, New-Brunswick. Geological Survey of Canada. Map 24-1959.

Lefebvre, R., Ballard, J.-M., Carrier, M.-A., Vigneault, H., Beaudry, C., Berthot, L., Légaré-Couture, G., Parent, M., Laurencelle, M., Malet, X., Therrien, A., Michaud, A., Desjardins, J., Drouin, A., Cloutier, M.H., Grenier, J., Bourgault, M.-A., Larocque, M., Pellerin, S., Graveline, M.-H., Janos, D. et Molson, J. 2015. Portrait des ressources en eau souterraine en Chaudière-Appalaches, Québec, Canada. Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). 300 p.

Lespérance, P.-L. et Greiner, H.R. 1969. Région de Squatec-Cabano : Compté de Rimouski, Rivière-du-Loup et Témiscouata. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'exploration géologique, Gouvernement du Québec, R.G. 128, 122 p.

Lyne, V., et Hollick, M., 1979. Stochastic timevariable rainfall-runoff modelling. *Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium*. Perth: Institution of Engineers National Conference Publication. p. 89-92.

Mace RE (2001) Estimating transmissivity using specific-capacity data. Geological Circular 01–2, Bureau of Economic Geology, The University of Texas, Austin, TX, USA

Malo, M., Kirkwood, D., De Broucker, G. et St-Julien, P. 1992. A reevaluation of the position of the Baie Verte – Brompton Line in the Quebec Appalachians : the influence of Middle Devonian strike-slip faulting in Gaspé Peninsula. *Canadian Journal of Earth Science*, 29: 1265-1273.

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. 1979. 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., Corbeil, P., 1983. Réinterprétation d'un segment de la moraine de Saint-Antoine, Québec. *Géographie Physique quaternaire*. 37 : 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.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). Direction du patrimoine écologique et des parcs (DPEP). 2019 Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) [Données numériques vectorielles]. MDDEFP-DPEP, 1/20 000, Québec, Québec.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). 2019. Répertoire des réseaux municipaux de distribution d'eau potable. Gouvernement du Québec. Site internet consulté en janvier 2019.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/distribution/index.asp>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). 2019. Atlas interactif de la qualité des eaux et des écosystèmes aquatiques. Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA).

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). 2019. Répertoire des dépôts de sols et de résidus industriels. Gouvernement du Québec. Site internet consulté en janvier 2019.
http://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/residus_ind/recherche.asp

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). 2019. Répertoire des terrains contaminés. Gouvernement du Québec. Site internet consulté en janvier 2019.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>

Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH). 2019. Le Portrait provincial en aménagement du territoire (PPAT). [Données numériques vectorielles].

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). 2019. Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. Site internet consulté en janvier 2019.
<https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/inventaire-zones-carte.jsp#sapBouleauJaune>

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). 2003. Le Système d'information écoforestière.
<http://www.MRN.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-car>

Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), 2009, Portrait territorial Bas-St-Laurent.

https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/environnement/territoire/Documents/Bas-St-Laurent/RA_portrait-BSL_MERN.pdf?1592581964

Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN), 2019. SIGEOM (Système d'information géominières). Site internet consulté en janvier 2019. http://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/l1102_indexAccueil?l=f

Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN). La Base de données pour l'aménagement du territoire (BDAT). Données numériques vectorielles à l'échelle de 1/100 000.

Minnesota Department of Natural Resources. 2016. Methods for Estimating Water-Table Elevation and Depth to Water Table. 8 p.

Monfet, J. 1979. Évaluation du coefficient de ruissellement à l'aide de la méthode SCS modifiée. Québec: Ministère de Richesses Naturelles, Service de l'hydrométrie.

Moore, W. S., and Arnold, R. 1996. Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using a delayed coincidence counter, *Journal of Geophysical Research*, 101(C1): 1321– 1329.

Morin, R. (1985). Région de Saint-Honoré – Kamouraska - Témiscouata. Ministère de l'Énergie des Ressources, Québec, ET 83-15, 36 p.

Monteil, C., Zaoui, F., Moine, N., et Hendrickx, F., 2020. Multi-objective calibration by combination of stochastic and gradient-like parameter generation rules – the caRamel algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6): 3189–3209.

Morissette, A., Hétu, B., Lajeunesse, P. 2020. Chapter 17. Quaternary Heritage and Landscape in the Témiscouata-Madawaska Valley Eastern Québec. 381-399 p. *In* Slaymaker, O. et Catto, N. *Landscapes and Landforms of Eastern Canada*. World Geomorphological Landscape, Springer Nature, 597 p.

Murphy, P. N.C., Ogilvie J., Connor, K. et Arp, P. A. 2007. Mapping Wetlands: A Comparison of two Different Approaches for New Brunswick, Canada. *Wetlands*, 27: 846-854.

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., et Alewell, C. 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54: 438-447.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., et Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology* 303(1-4): 290–306.

Patault, E., Alary, C., Franke, C., Gauthier, A., et Abriak, N.E. 2019. Assessing temporal variability and controlling factors of the sediment budget of a small agricultural catchment in Northern France (the Pommeroye). *Heliyon* 5(3): e01407

Phillips, J.M., Russell, M.A., et Walling, D.E. 2000. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: A simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes* 14: 2589-2602.

Pinti, D.L., Gélinas, Y., Larocque, M., Barnetche, D., Retailleau, S., Moritz, A., Helie, J.-F. et Lefebvre, R., 2013. Concentrations, sources et mécanismes de migration préférentielle des gaz d'origine naturelle (méthane, hélium, radon) dans les eaux souterraines des Basses- Terres du Saint-Laurent. Strategic Environmental Evaluation Committee on Shale Gas. Report E3-9, 104 p.

Pinti, D.L., Retailleau, S., Barnetche, D., Moreira, F., Moritz, A.M., Larocque, M., Gélinas, Y., Lefebvre, R., Hélie, J.F., et Valadez, A. 2014. ²²²Rn activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: Relation with local geology and health hazard. *Journal of Environmental Radioactivity* 136: 206-217.

Poesen, J. 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms* 43(1): 64-84.

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.

Procéan Inc. 1991. Révision des critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent. Préparé pour le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada. 36p.

Przylibski, T.A. 2000. Estimating the radon emanation coefficient from crystalline rocks into groundwater. *Applied Radiation and Isotopes* 53: 473-479.

Przylibski, T.A., et Zebrowski, A. 1999. Origin of radon in medicinal waters of Ladek Zdroj (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity* 46: 121-129.

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

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. 227 p.

Roireau, N., et Zikovsky, L. 1989. Determination of radon in groundwater of Quebec. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters* 137: 79-85.

Seminsky, K.Z., et Seminsky, A.K. 2019. Radon concentration in groundwater sources of the Baikal region (East Siberia, Russia). *Applied Geochemistry* 111: 104446.

St-Julien, P. et Hubert, C. 1975. Evolution of the Taconian Orogen in the Québec Appalachians. *American Journal of Science*, 275A: 337-362.

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

Sherriff, S.C., Rowan, J.S., Melland, A.R., Jordan, P., Fenton, O., et Ó hUallacháin, D. 2015. Investigating suspended sediment dynamics in contrasting agricultural catchments using ex situ turbidity-based suspended sediment monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(8): 3349-3363.

Sirois, M. 2018. Interaction entre la matière organique et le fer dans un estuaire souterrain : exemple des plages de sédiments perméables. Université du Québec à Rimouski, Institut des sciences de la mer de Rimouski, mémoire de maitrise. 124 p.

Taylor, K.G., et Owens, P.N. 2009. Sediments in urban river basins: a review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities. *Journal of Soils and Sediments* 9(4): 281-303.

Thorstenson, D.C., Fisher, D.W., et Croft, M.G. 1979. The geochemistry of the Fox Hills-Basal Hell Creek Aquifer in southwestern North Dakota and northwestern South Dakota. *Water Resources Research* 15: 1479-1498.

Tiwari, T., Lundström, J. Kuglerova, L., Laudon H., Öhman, K. et Agren, A. M. 2016. Cost of riparian buffer zones: A comparison of hydrologically adapted site-specific riparian buffers with traditional fixed widths. *Water Resources*, 52: 1056-1069.

Tremblay, P. et Bourque, P.-A. 1991. Carte géotouristique du sud du Québec, Bas-Saint-Laurent et Gaspésie. Les Publications du Québec, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, GT 91-03.

U.S. Department of Agriculture. (1986). Urban Hydrologyfor Small Watersheds. Natural Resources Conservation Service.
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf

Vallières, A. 1976. Région de Saint-Modeste, Quart Nord-Ouest : Comté de Rivière-du-Loup. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'exploration géologique, Gouvernement du Québec, Rapport géologique intérimaire, DPV-363, 7 p.

Vallières, A. 1977. Géologie de la région de Cacouna à Saint-André-de-Kamouraska : Comtés de Rivière-du-Loup et de Kamouraska. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'exploration géologique, Gouvernement du Québec, Rapport préliminaire, DPV-513, 31 p.

Van Den Boogaart, K.G., et Tolosana-Delgado, R. 2008. "compositions": A unified R package to analyze compositional data. *Computers and Geosciences* 34(4): 320-338.

Veillette, J. J., Dyke, A. S. et Roy, M. 1999: Ice-flow evolution of the Labrador Sector of the Laurentide Ice Sheet: a review, with new evidence from northern Quebec. *Quaternary Science Reviews* 18: 993–1019.

Veillette, J.J., Cloutier, M., Hétu, B., Cloutier, C.-A., Houde-Poirier, M., Paradis, S.J. et Buffin-Bélanger, T. 2017. Géologie des formations en surface et histoire glaciaire du Bas-Saint-Laurent, Québec. Commission géologique du Canada, version préliminaire, échelle 1:250 000

Vercruysse, K., Grabowski, R.C., et Rickson, R.J. 2017. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews* 166: 38-52.

Walling, D.E., et Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 39: 111-126.

White, B., J. Ogilvie, D. M.H. Campbell, D. Hiltz, B. Gauthier, H. Kyle, H. Chisholm, H. K. Wen, P. N.C. Murphy et P. A. Arp. 2012. Using the Cartographic Depth-to-Water Index to Locate Small Streams and Associated Wet Areas across Landscapes, *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne des ressources hydriques*, 37: 333-347.

Williams, H. 1979. Appalachian Orogen in Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, (6): 792-807.

William, H. 1995. Géologie de l'orogène appalachien-calédonien au Canada et au Groenland. Commission géologique du Canada, Collection Geology of North America, Vol. F-1, Géologie du Canada n° 6, 1032 p.

ANNEXES

Annexe 1–Description des sondages dans les dépôts meubles

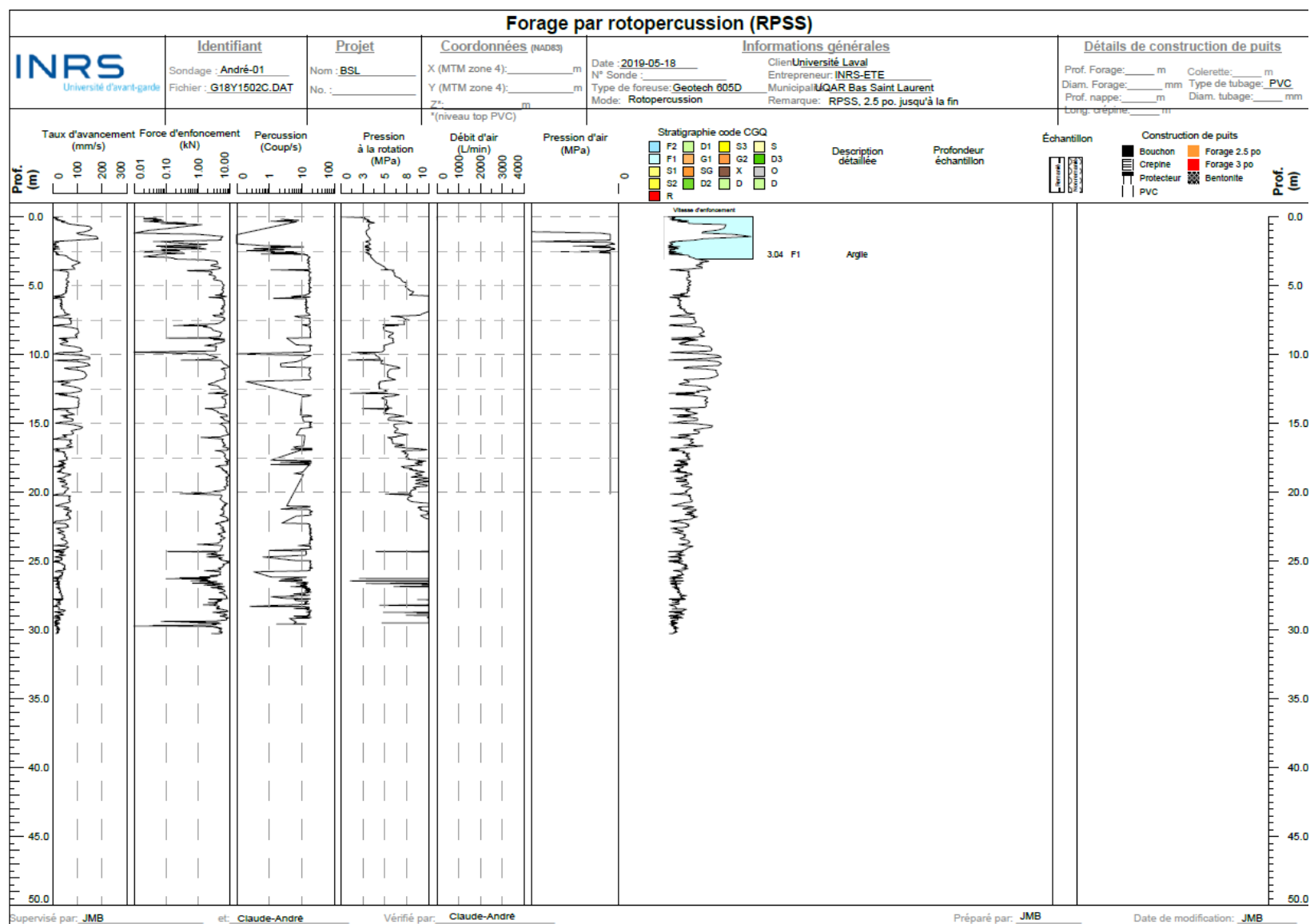


Figure 0.1-Stratigraphie de forage André-01

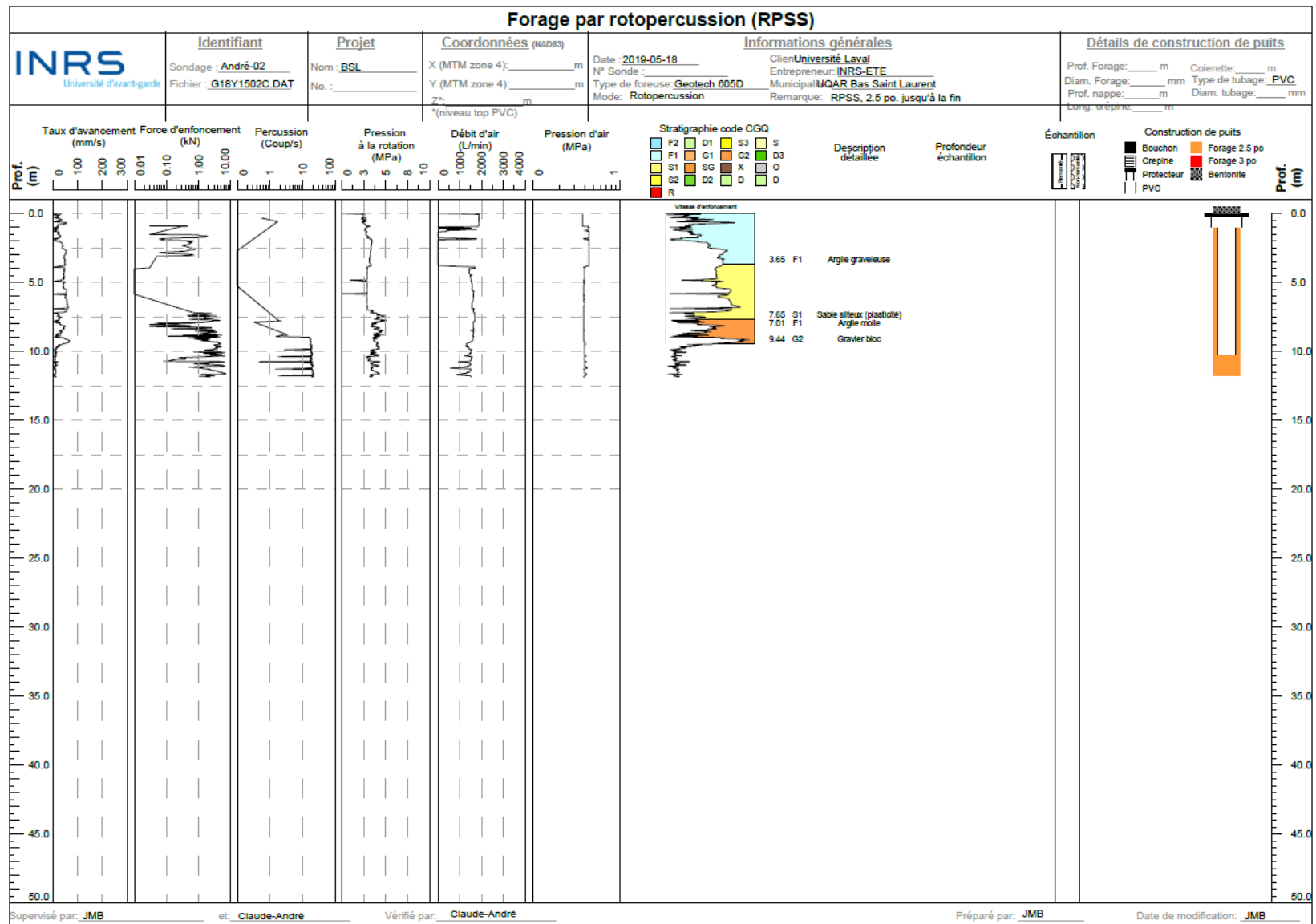


Figure 0.2-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage André-02

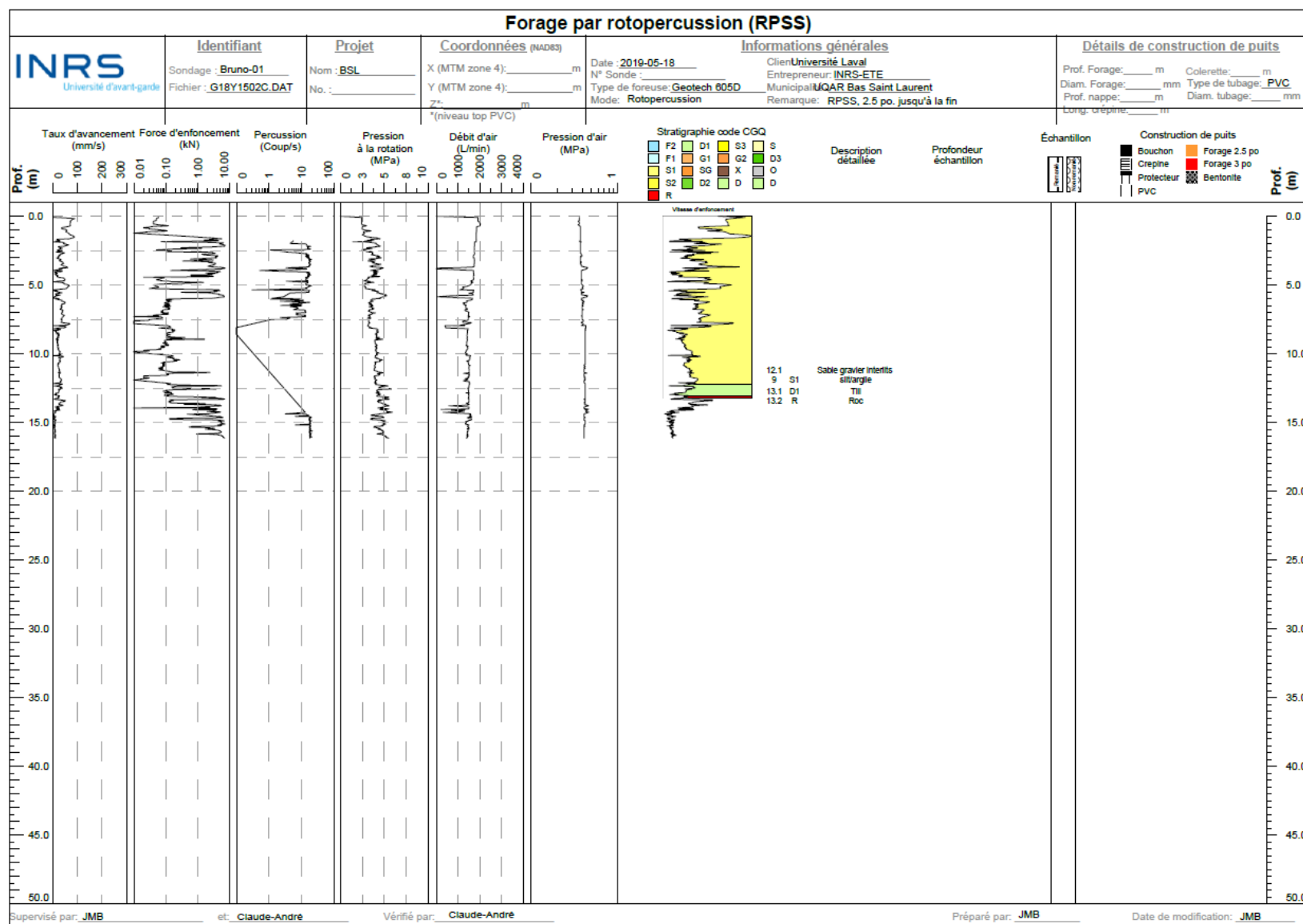


Figure 0.3-Stratigraphie du forage Bruno-01

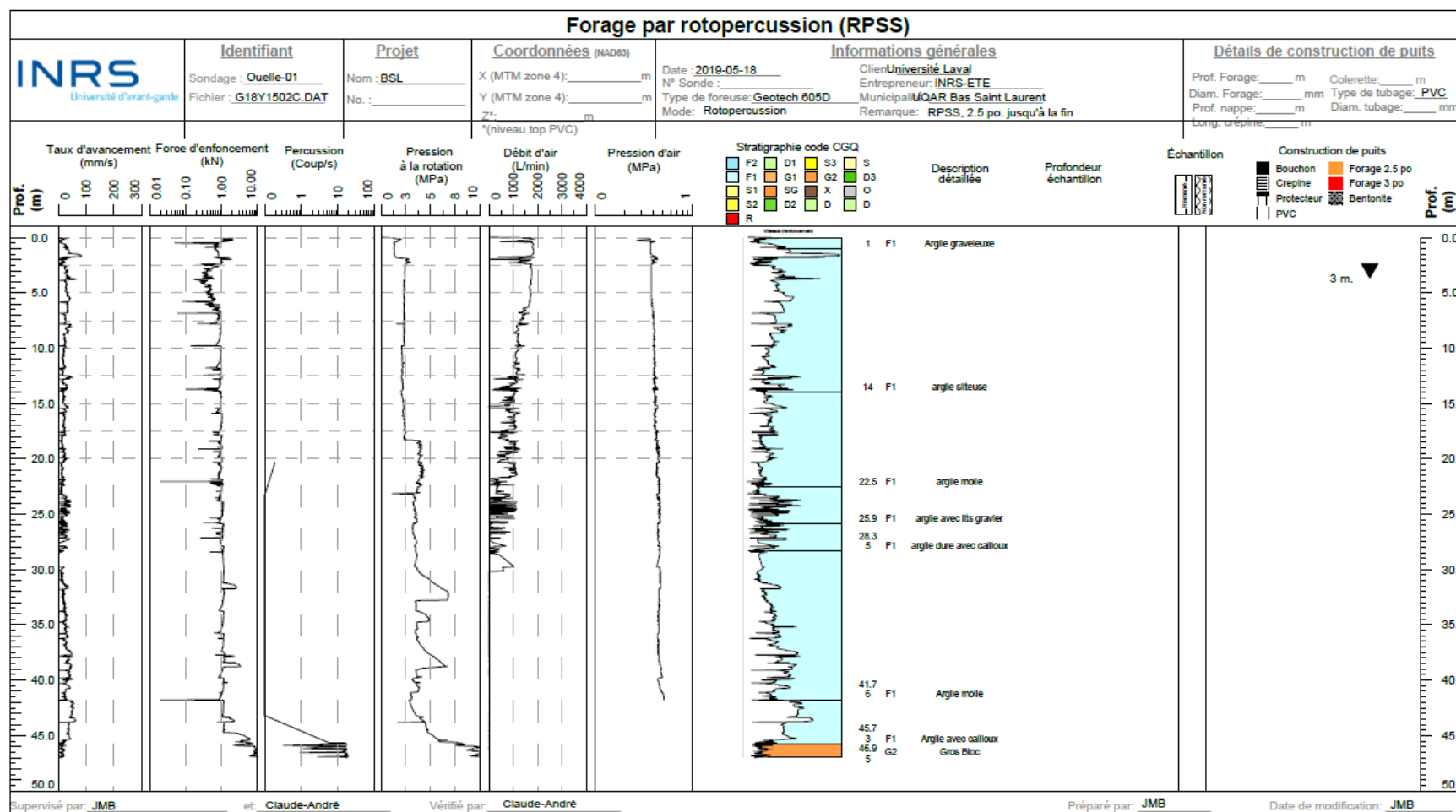


Figure 0.4-Stratigraphie du forage Ouelle-01



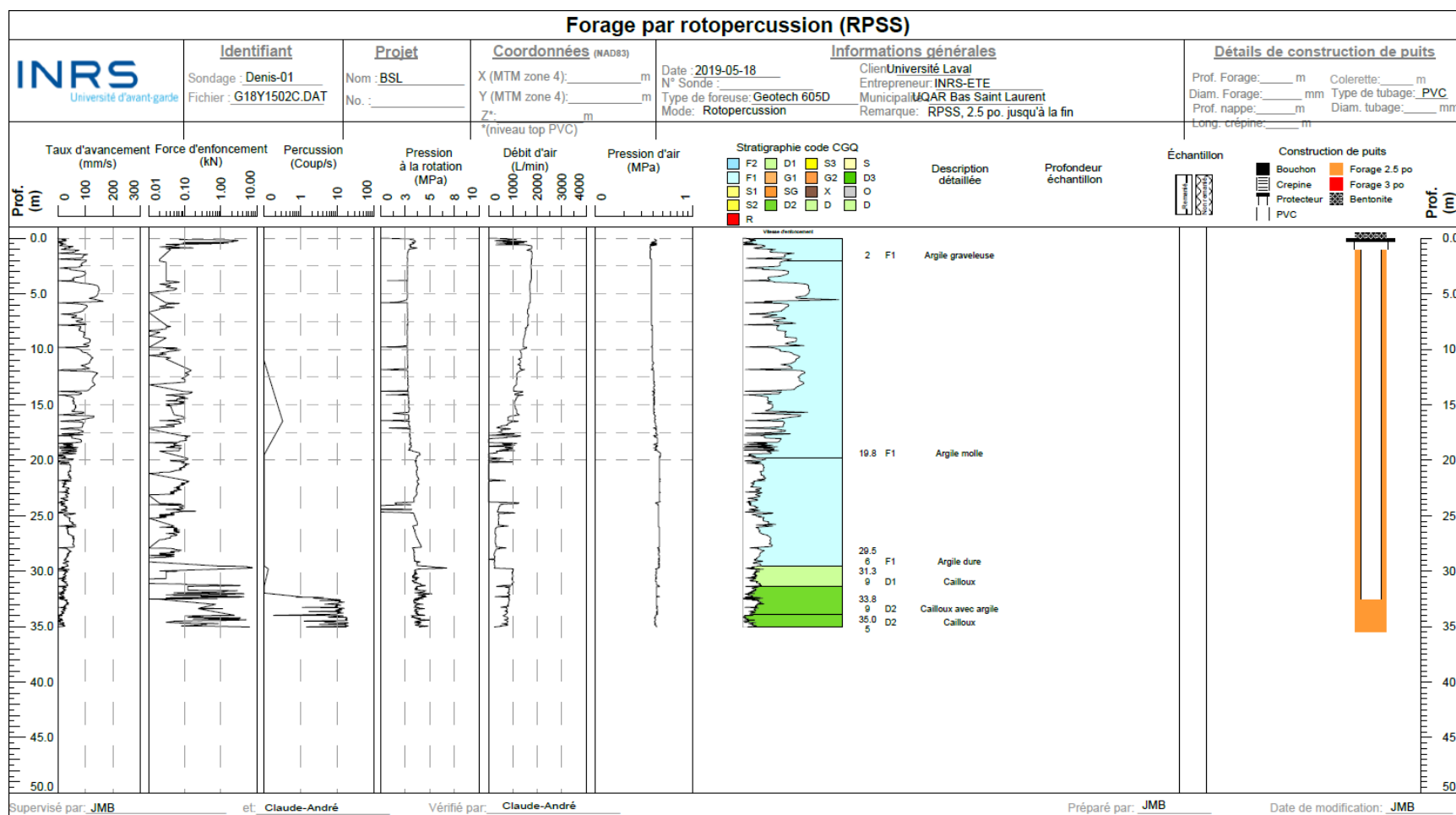


Figure 0.6-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Denis-01

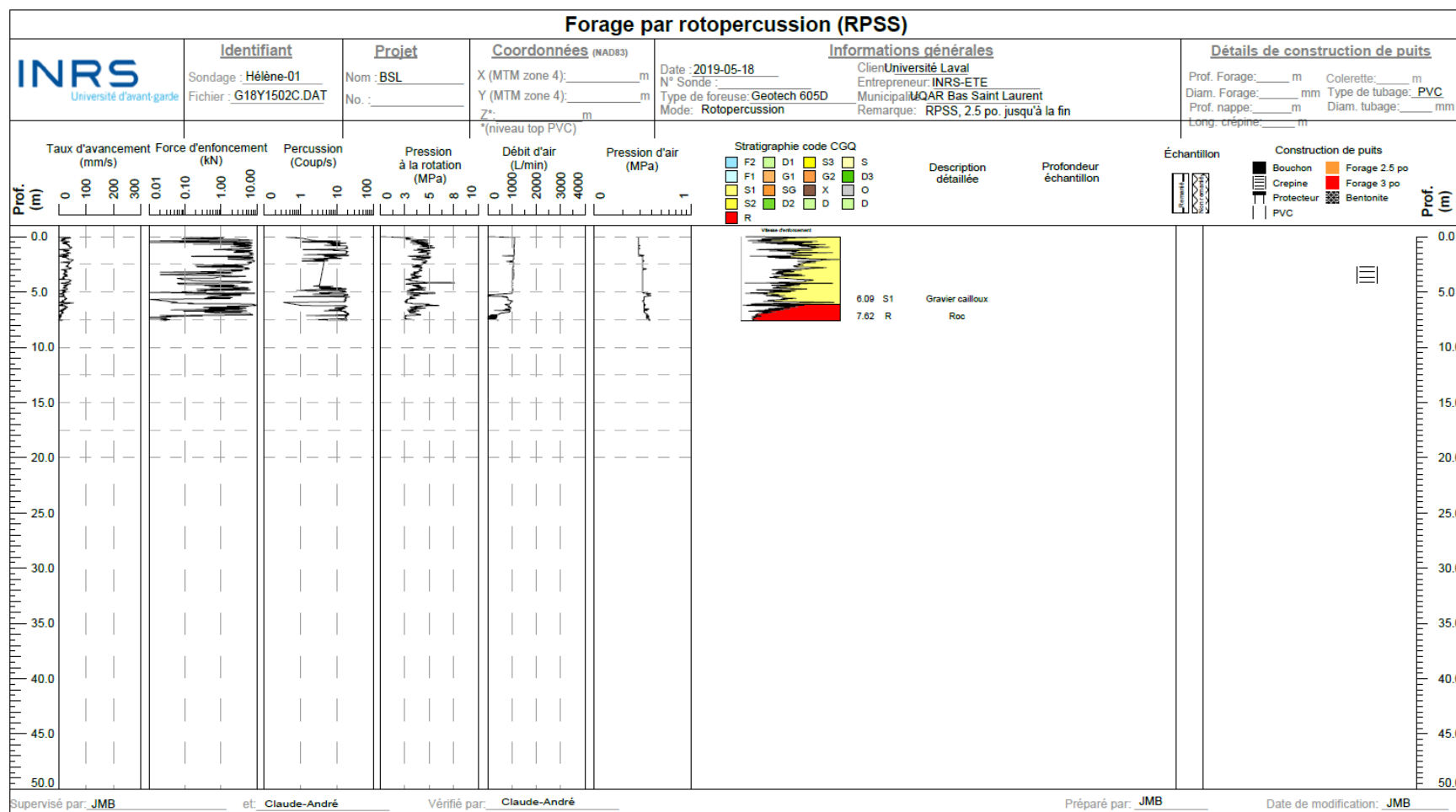


Figure 0.7-Stratigraphie du forage Hélène-01

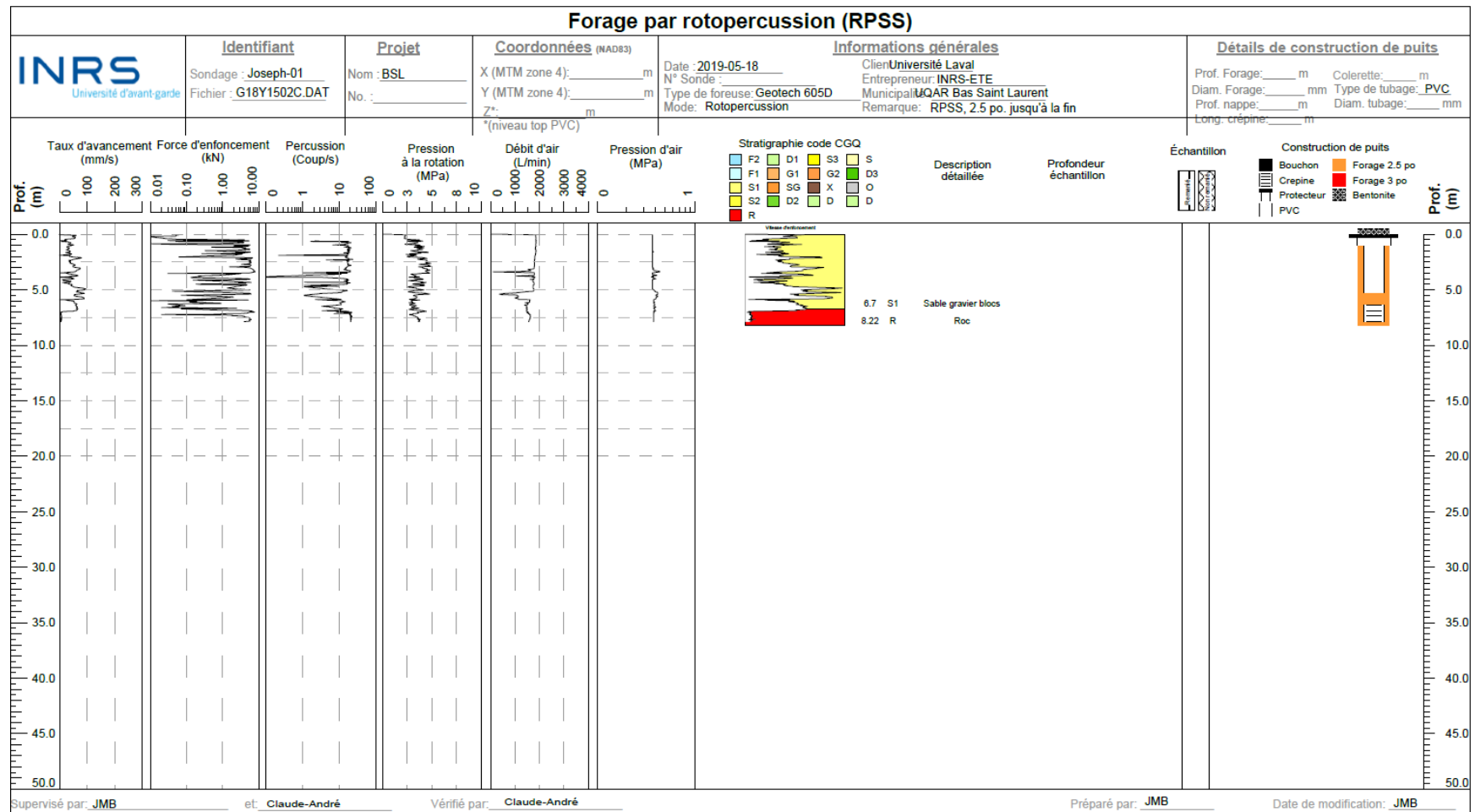


Figure 0.8-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Joseph-01

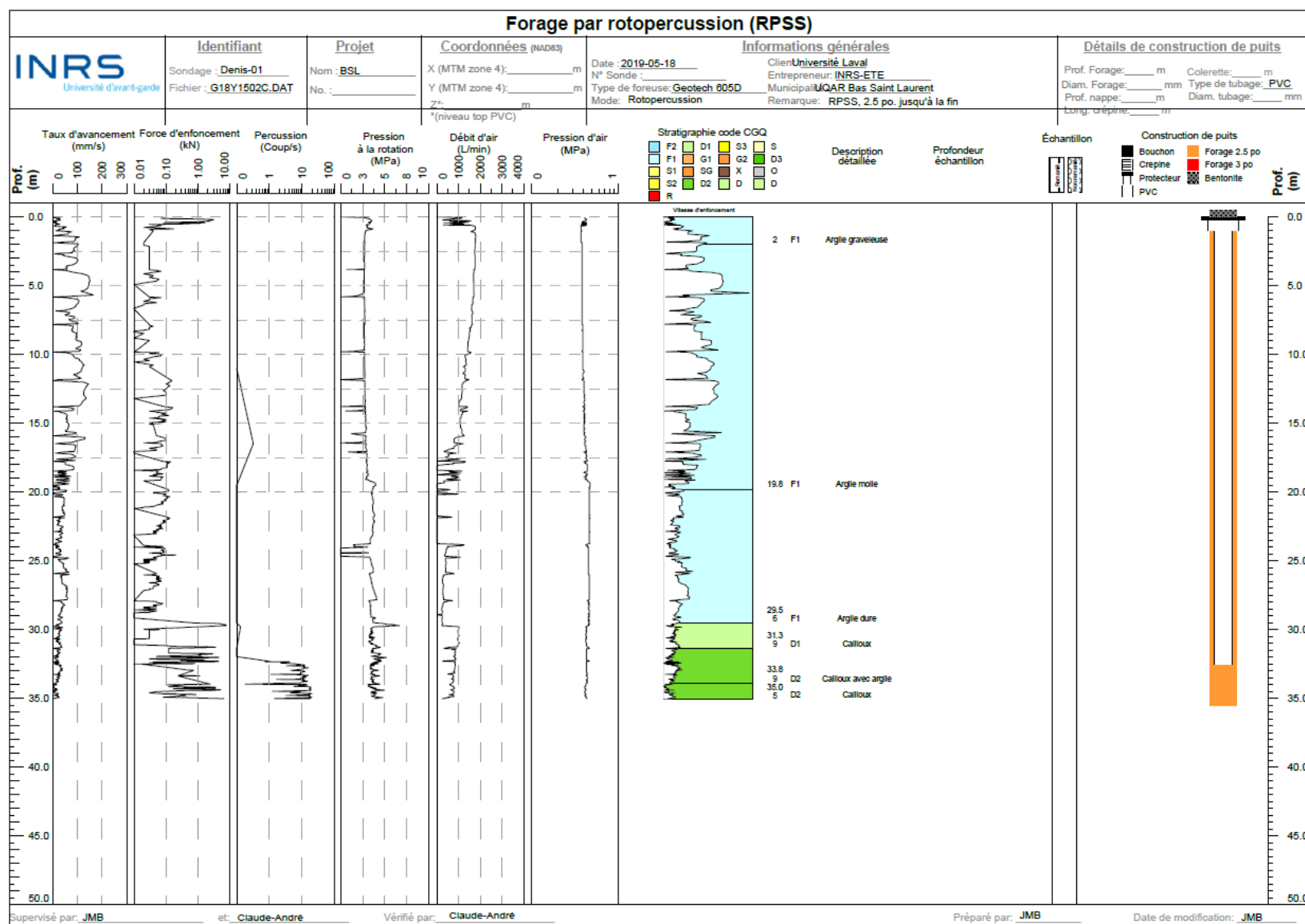


Figure 0.9-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Denis-01

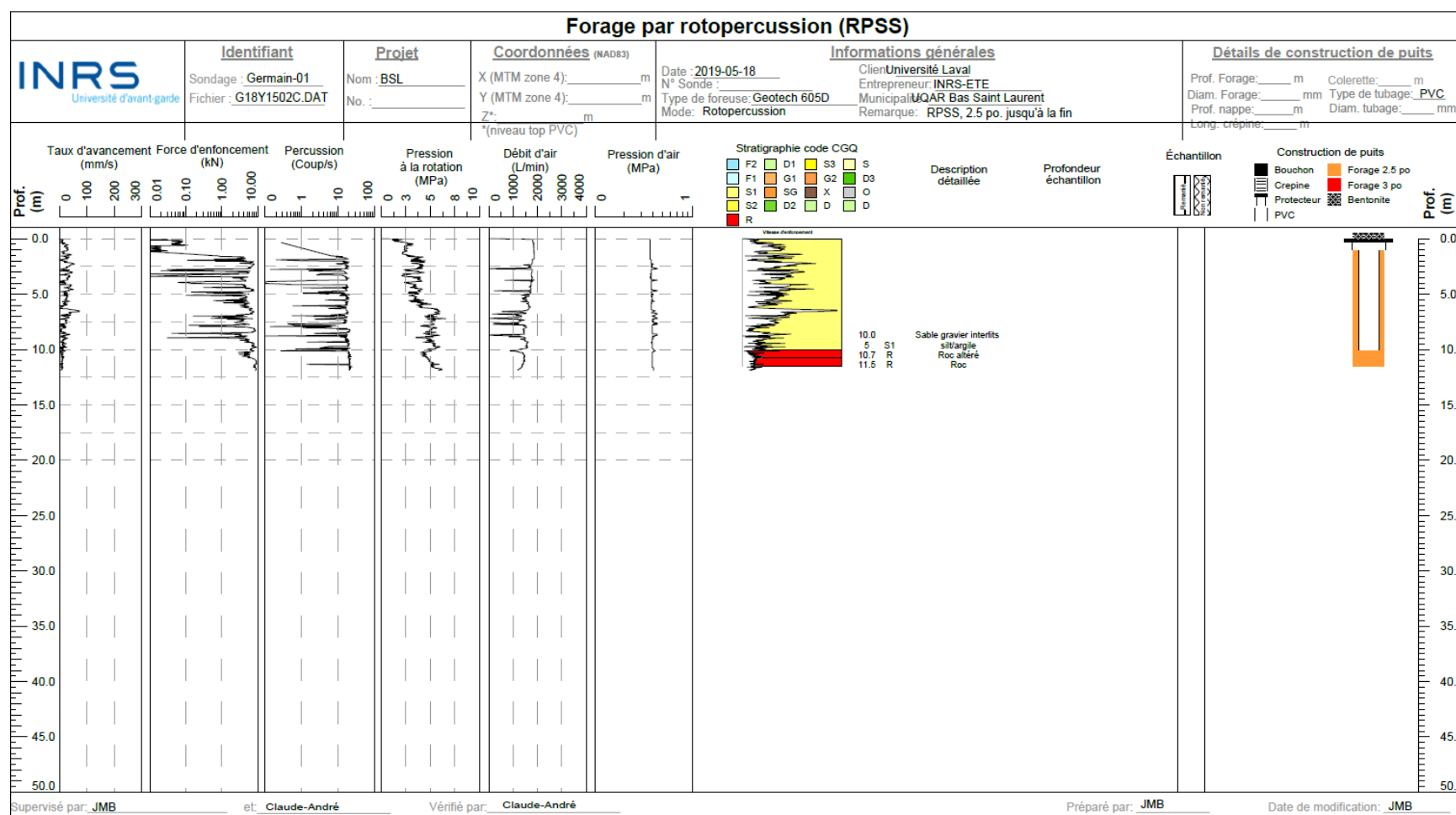


Figure 0.10-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Germain-01

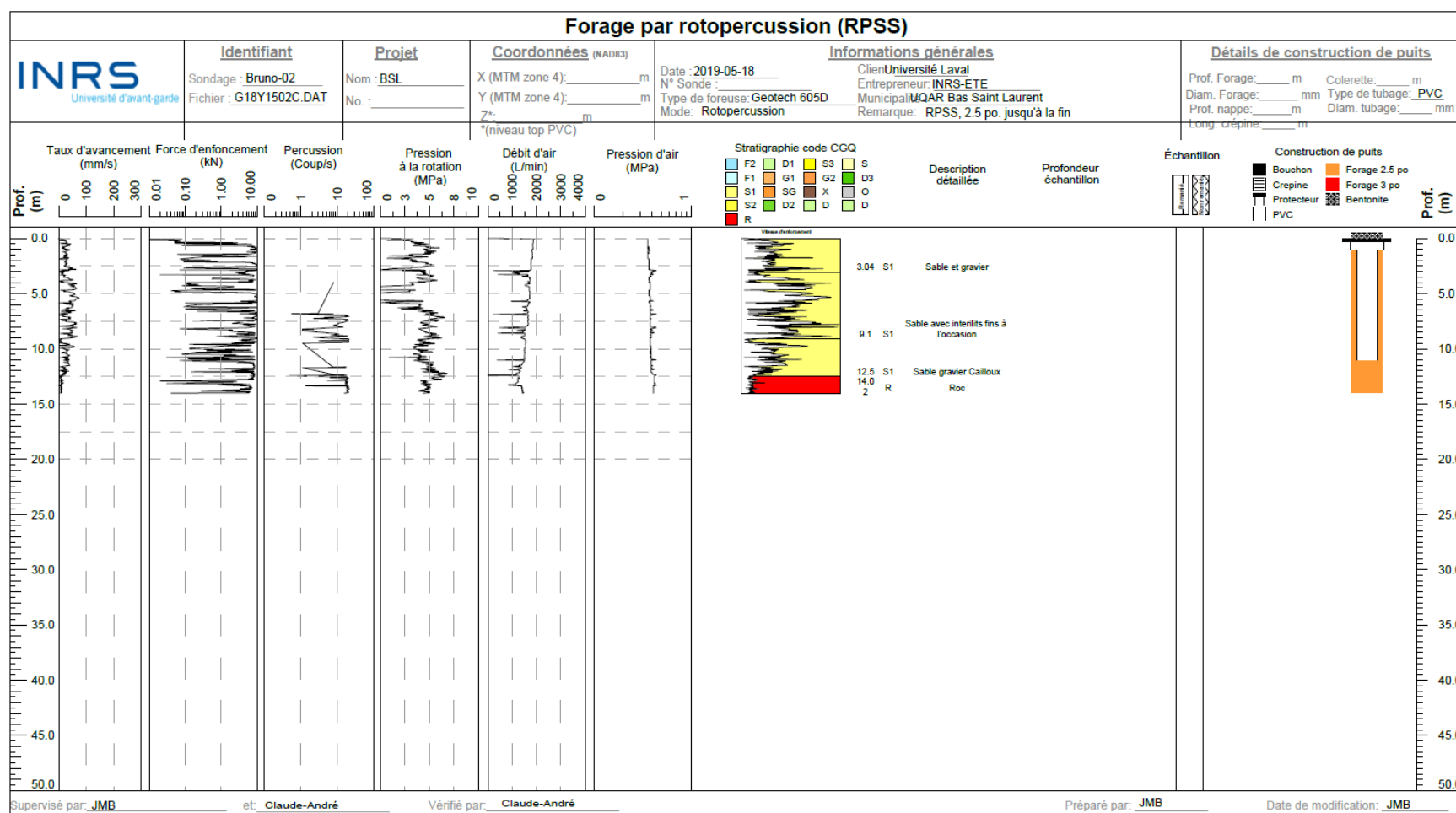


Figure 0.11-Stratigraphie et conception du piézomètre du forage Bruno-02

Annexe 2–Méthode d'analyses et limite de détection

Éléments	Appareil d'analyse	Méthode d'analyse	Limite de détection (µg/L)
Aluminium (Al)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	10,0
Antimoine (Sb)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	1,0
Argent (Ag)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,10
Arsenic (As)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,30
Baryum (Ba)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	2,00
Béryllium (Be)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,40
Bismuth (Bi)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,25
Bore (B)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	20,00
Calcium (Ca)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	300,00
Chrome (Cr)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,50
Cobalt (Co)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,50
Cuivre (Cu)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,50
Étain (Sn)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	1,00
Fer (Fe)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	60,00
Lithium (Li)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	3,00
Magnésium (Mg)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	100,00
Manganèse (Mn)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,40
Molybdène (Mo)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,50
Nickel (Ni)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	1,00
Plomb (Pb)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	0,10
Potassium (K)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	100,00
Sélénium (Se)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	1,00
Silicium (Si)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	100,00
Sodium (Na)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	100,00
Strontium (Sr)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	2,00
Titane (Ti)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	10,00
Uranium (U)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	1,00
Vanadium (V)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	2,00
Zinc (Zn)	ICP-MS ¹	MA.200-MET 1.2 R5 m	5,00
Alcalinité totale	Titrimétrie	SM 23 2320 -B m	1,00
Bromures	Chromatographe ionique	MA. 300 - Ions 1.3 R3 m	100
Chlorures	Chromatographe ionique	MA. 300 - Ions 1.3 R3 m	50
Fluorures	Électrode ion spécifique	SM 22 4500 - F m	10
Nitrites+Nitrates	Chromatographe ionique	MA. 300 - Ions 1.3 R3 m	20
Sulfates	Chromatographe ionique	MA. 300 - Ions 1.3 R3 m	300
Azote ammoniacal	Colorimétrie	MA. 300 - N 2.0 R2 m	20
Phosphore total inorganique	Colorimétrie	MA. 300 - P.Ino 2.0 R1 m	30
Sulfures totaux	Colorimétrie	MA. 300 - S 1.2 R3 m	20
Coliformes totaux	Filtration	AEL-I-EAU-005-A	
Bactéries atypiques		AEL-I-EAU-005-A	
Escherichia coli	Filtration	AEL-I-EAU-005-A	
Entérocoques		AEL-I-EAU-005-A	
Isotopes stables de l'eau	Isoprime AquaPrep	UQAM	
Isotopes stables du carbone inorganique dissous	Isoprime 100 DI -MicroGas	UQAM	
Isotope du radon	Radset-mini bottle	UQAR	
Méthane	GC-FID ²	UQAR	

Annexe 3–Dépliant informatif remis aux propriétaires de puits échantillonné

DESCRIPTION DU PROJET

Depuis l'automne 2018, l'UQAR réalise une étude visant à caractériser les eaux souterraines des MRC du Kamouraska, de Rivière-du-Loup et du Témiscouata en collaboration avec plusieurs partenaires régionaux. Le projet s'inscrit dans le cadre d'un engagement du Gouvernement du Québec pour dresser le portrait de l'eau souterraine à travers le Québec municipalisé, afin d'en assurer la pérennité et la saine gestion. Cette quatrième phase du projet prendra fin en 2021.

Cette étude prend tout son sens quand on considère que près de 60% de la population de la région s'approvisionne en eau souterraine et que les pressions anthropiques sur la ressource sont en constante croissance.

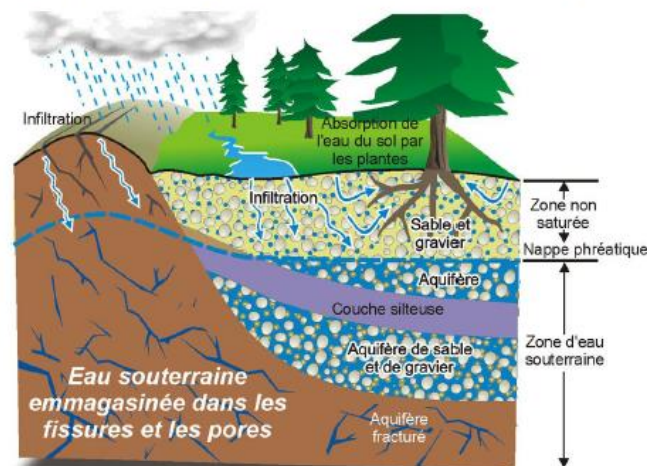
La qualité de l'eau de votre puits et vos responsabilités

- ❖ Faire analyser deux fois par année les paramètres bactériologiques (automne et printemps);
- ❖ Procéder à un entretien annuel de votre puits;
- ❖ Vérifier régulièrement l'état de votre installation septique.

Pour plus d'informations:
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm>

D'OÙ PROVIENT L'EAU SOUTERRAINE ?

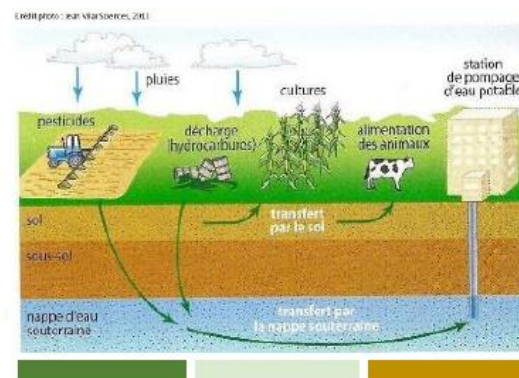
L'eau souterraine provient de l'infiltration des précipitations dans le sol. Elle traverse le sol perméable ou le réseau de fractures du socle rocheux pour atteindre un point de résurgence caractérisé par une source ou un cours d'eau de surface.



Source: Environnement Canada

QU'EST-CE QUI AFFECTE LA QUALITÉ DE L'EAU SOUTERRAINE ?

- ❖ La nature du sol dans lequel l'eau circule;
- ❖ Installations septiques mal conçues ou mal entretenues;
- ❖ Épandage excessif de fumier, d'engrais chimiques ou de pesticides;
- ❖ Lieux d'enfouissement sanitaires mal contrôlés ou mal gérés;
- ❖ Fuites de réservoirs d'hydrocarbures ou déversements accidentels, etc.



Annexe 4–Entente de collaboration

ENTRE : UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI, personne morale instituée par lettres patentes en vertu de la *Loi sur l'Université du Québec* (L.R.Q., c. U-1) ayant son siège au 300, allée des Ursulines, Rimouski, QC, G5L 3A1, représentée par monsieur François Deschênes, vice-recteur à la formation et à la recherche, dûment autorisé aux fins des présentes, tel qu'il le déclare;

(Ci-après désignée l'« UQAR »)

D'une part

ET

Nom : _____

Adresse : _____

Code Postal : _____

Téléphone : _____

, dûment autorisé aux fins des présentes, tel qu'il le déclare;

(Ci-après désignée le «Propriétaire »).

D'autre part

(L'UQAR et le Propriétaire ci-après collectivement désignés les « Parties »)

ATTENDU que l'UQAR, en collaboration avec l'institut national de recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE), doit réaliser des travaux sur certains terrains privés dans le cadre du Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du Kamouraska, de Rivière-du-Loup et du Témiscouata;

ATTENDU que les organismes de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup et du fleuve Saint-Jean, de même que la Conférence régionale des élus, le Conseil régional de l'environnement et les MRC de Kamouraska, de Rivière-du-Loup et du Témiscouata sont tous partenaires au projet;

ATTENDU que l'UQAR doit obtenir l'accord des propriétaires de terrains qui sont concernés par ces travaux, notamment un droit de passage et d'utilisation d'une parcelle de terrain;

Les parties conviennent de ce qui suit :

1. OBJET DE L'ENTENTE

Le propriétaire accepte que les travaux suivants soient réalisés sur son terrain qui est situé à l'endroit ci-après désigné :

Adresse du terrain où auront lieu les travaux :

- a) Sondage avec une foreuse (ci-après désigné le « Sondage ») qui implique l'enfoncement d'une tige métallique instrumentée dans le sol de la Propriété. Cette tige permettra de renseigner sur la nature et l'épaisseur du sol, et sera ensuite retirée et il ne reste rien dans le sol de la Propriété. Le Sondage seul n'implique pas de visite subséquente de la Propriété;

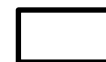


- b) Si la nature du sol le permet :

Installation d'un puits d'observation (ci-après désigné le « Puits »). Le puits représente un tubage de plastique de 3,5 cm de diamètre installé dans le sol et qui dépassera du sol sur une hauteur de 50 cm. L'installation d'un Puits implique de deux (2) à trois (3) visites du Puits par le personnel du Projet sur la Propriété la première année (été 2019), pour effectuer des travaux de la nature suivante : mesure du niveau d'eau, échantillonnage de l'eau souterraine, essais de perméabilité, instrumentation du Puits pour le suivi du niveau de l'eau souterraine. Il est possible qu'une (1) à deux (2) visites supplémentaires soient faites dans les années suivantes (2020 et 2021) pour refaire des travaux de même nature ou vérifier l'instrumentation du Puits. À la fin du projet, le puits ensuite retiré et il ne restera rien dans le sol de la Propriété.



- c) Prélèvement des données hydrologiques et hydrogéochimiques provenant du puits pour les intégrer dans une base de données à référence spatiale afin de permettre notamment de tracer des cartes de la qualité de l'eau souterraine. Transmission de cette base de données au ministre de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques et mise à la disposition aux partenaires du projet. Les échantillons prélevés sont analysés dans le laboratoire accrédité, Maxxam, pour une quarantaine de paramètres physico-chimique de qualité de l'eau. Les paramètres bactériologiques sont analysés par le laboratoire accrédité AgroEnviroLab. Une copie des résultats d'analyse sera remise à chaque propriétaire de puits échantillonné qui en fera la demande.



2. RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Les responsables du Projet sont M. Thomas Buffin-Bélanger et Mme Gwenaëlle Chaillou, professeurs à l'Université du Québec à Rimouski.

3. ATTESTATION

Le Propriétaire atteste par la présente être le propriétaire du terrain décrit à l'article 1 et avoir pleine autorité pour conclure la présente entente.

Le Propriétaire atteste également avoir lu et compris les termes de la présente entente.

4. ENGAGEMENTS DE L'UQAR

- L'UQAR s'engage à n'utiliser les lieux faisant l'objet de la présente entente que pour ce qui est décrit à l'article 1.
- L'UQAR s'engage à occuper la Propriété paisiblement et à la garder propre en tout temps.
- L'UQAR s'engage à ne pas obstruer le passage à la circulation sur la Propriété.
- L'UQAR s'engage à remettre la Propriété dans son état original après chaque visite de cette Propriété.
- L'UQAR s'engage à dégager le Propriétaire de toute responsabilité quant aux bris de toute nature que pourraient subir les équipements installés sur la Propriété.
- L'UQAR s'engage à rendre disponible, les données découlant des relevés effectués sur la Propriété.
- L'UQAR s'engage à dégager le Propriétaire de toute responsabilité advenant que l'UQAR soit poursuivie en relation avec les travaux réalisés sur la Propriété dans le cadre du Projet.

- L'UQAR s'engage à ne charger aucuns frais au Propriétaire dans le cadre de cette entente.

5. ENGAGEMENTS DU PROPRIÉTAIRE

- Pour le Sondage tel que décrit à l'article 1 (a), le Propriétaire s'engage à accorder à l'UQAR un droit de passage à pied et avec ses équipements, incluant une foreuse, par l'entrée actuelle de la Propriété, afin que l'UQAR ait accès à la Propriété pendant les travaux.
- Pour le Puits tel que décrit à l'article 1 (b), le Propriétaire s'engage à accorder à l'UQAR, pour toute la durée de la présente entente, un droit de passage avec un véhicule par l'entrée actuelle de la Propriété, afin que l'UQAR ait accès au Puits en tout temps.
- Pour le Puits tel que décrit à l'article 1 (b), pour toute la durée de la présente entente, le Propriétaire s'engage à laisser le Puits en place et à ne pas l'endommager ou y introduire des solides ou liquides.
- Pour le Puits tel que décrit à l'article 1 (b), à la fin du projet, le Propriétaire s'engage à accorder à l'UQAR un droit de passage et avec ses équipements, incluant une foreuse, pour enlever les infrastructures hors sol.

6. DURÉE DE L'ENTENTE

La présente entente entre en vigueur à la date de sa dernière signature et se termine le 31 août 2021.

7. CONTREPARTIE

Aucune somme ne sera accordée au Propriétaire dans le cadre de la présente entente.

8. RÉSILIATION

L'UQAR et le Propriétaire ont tous deux la possibilité de résilier la présente entente après le début de la présente entente.

Pour ce faire, la partie voulant résilier l'entente doit fournir à l'autre partie un avis écrit de son intention au moins trois (3) mois avant la date effective de l'application souhaitée de la date de la résiliation.

En cas de résiliation, le Puits prévu à l'article 1 (b) sera retiré du sol dès que les conditions le permettront.

9. MODIFICATION DU STATUT DE LA PROPRIÉTÉ

Le Propriétaire doit aviser l'UQAR, par écrit et sans délai, de tout changement au statut de la propriété de son terrain pouvant affecter la présente entente.

10. COMMUNICATION

Tout avis exigé en vertu de la présente entente, pour être valide et lier les parties, doit être donné par écrit à l'adresse de la partie concernée :

Pour l'UQAR : Monsieur Petro-Luciano Buono, Doyen à la recherche
Université du Québec à Rimouski
300, allée des Ursulines
Rimouski (Québec) G5L 4A1
Téléphone : (418) 723-1986 # 1540
Télécopieur : (418) 725-1525

Pour le Propriétaire :

Nom :	_____
Adresse :	_____
Adresse	_____
courriel	_____
Code postal :	_____
Téléphone	_____
cellulaire :	_____
Téléphone	_____
résidence :	_____

Tout changement d'adresse de l'une des Parties doit faire l'objet d'un avis écrit à l'autre partie.

11. DISPOSITIONS FINALES

La présente entente constitue l'accord entier intervenu entre les Parties relativement à ses objets et remplace tout accord, entente, proposition, représentation et négociation, tant verbaux ou écrits, faits avant la conclusion de cette entente.

Aucun amendement, changement ou modification du Contrat ne liera les Parties à moins d'avoir été agréé, par écrit, par les représentants dûment autorisés des Parties.

Sous réserve de ce qui précède, la présente entente lie toutes les Parties, ainsi que leurs successeurs et ayants droit autorisés.

Le Contrat est interprété et régi selon les lois en vigueur dans la province de Québec et les lois fédérales du Canada qui s'y appliquent.

Pour toute question pouvant être soumise aux tribunaux aux termes de ce Contrat, les Parties à la présente entente s'en remettent irrévocablement à la compétence des tribunaux de la province de Québec, du district judiciaire de Rimouski.

12. SIGNATURES :

Cette entente pourra être signée par les parties avec des signatures originales et/ou numérisées par voie électronique, chacune d'elles sera considérée comme une signature originale à l'entente.

EN FOI DE QUOI LES PARTIES, APRÈS AVOIR PRIS CONNAISSANCE DE L'ENTENTE, ONT SIGNÉ EN TROIS (3) EXEMPLAIRES, À LA DATE INDIQUÉE CI-DESSOUS :

Pour l'Université du Québec à Rimouski

Pour le Propriétaire

À _____, LE

À _____, LE

François Deschênes
Vice-recteur à la formation et à la
recherche

M. ou Mme
(Indiquer le prénom et le nom)

À _____, LE

M. Thomas Buffin-Bélanger ou Mme
Gwenaëlle Chaillou
Université du Québec à Rimouski

Annexe 5–Fiche technique d'échantillonnage

Échantillon :

Fiche technique d'échantillonnage

Nom du propriétaire : _____

Téléphone : _____

Adresse complète : _____

Adresse courriel : _____

Entente signée : Oui ☐ → Électronique ☐ Papier ☐
Non ☐

Code puits du SIH : Clé année _____ No projet _____ Clé puits _____

Perception de la qualité de l'eau

Excellente ☐
Bonne ☐
Moyenne ☐
Mauvaise ☐

Présence de :

Sulfure ☐ (Odeur)
Fer ☐ (Dépôts rougeâtres)
Manganèse ☐ (Dépôts noirâtres)
Sel ☐ (Goût)
Couleur ☐ _____ (Visuelle)
Calcaire ☐ (Dépôts blancs)

Présence de traitements : _____

Présence de réservoir : _____

Commentaires : _____

Information sur le puits

Type : Privé ☐
Municipal ☐
Provincial ☐

Profondeur : _____

Diamètre : _____

Matériel : _____
(acier, pvc ...)

Nb de personnes desservies : _____

Type d'aquifère : Granulaire ☐
Roc ☐

Activités potentiellement polluantes : _____

Échantillon :

Date d'échantillonnage : _____ Heure d'échantillonnage : _____

Échantillonneurs : _____

Coordonnée GPS du puits (UTM 19) : X : _____
Y : _____
Z : _____

Description de l'environnement immédiat (champs, route, cours d'eau, boisé...)

Conditions météorologiques : _____

Mesure in situ (sonde YSI)	Échantillonnage
Température : _____	Au puits <input type="checkbox"/> Au robinet <input type="checkbox"/>
pH : _____	Volume d'eau purgée : _____ (avant l'échantillonnage)
Conductivité : _____	Pompe utilisée : _____ (s'il y a lieu)
Salinité : _____	
Oxygène dissous : _____	

Check list échantillonnage :

MAXXAM (filtré 0,45µm)	AUTRES (non filtré)
Sulfure <input type="checkbox"/>	DIC <input type="checkbox"/> (Falcon 15 mL)
Nutriments <input type="checkbox"/>	Isotope DIC <input type="checkbox"/> (Verre 30 mL)
Azote ammoniacal <input type="checkbox"/>	Méthane <input type="checkbox"/> (Verre 30 mL)
Métaux <input type="checkbox"/>	Isotopes eau <input type="checkbox"/> (Pillulier)
Anions (2X) <input type="checkbox"/>	Radon <input type="checkbox"/> (Verre 250 mL)

Annexe 6–Exemple de lettre envoyée lors de dépassement des normes de potabilité



lundi, 15 juillet 2019

À l'attention de Nom du propriétaire

Suite à l'échantillonnage de l'eau de votre puits le 6 juin dernier, nous vous faisons parvenir les résultats des analyses faites par le laboratoire Maxxam Analytique ainsi que ceux faits chez Agro-Enviro-Lab.

Nous vous prions de porter une attention particulière aux pages 3 à 5 du rapport d'analyse Maxxam. La 1^{re} colonne contient les éléments analysés, la 3^e colonne c'est pour les concentrations maximales acceptées selon les recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. La 4^e colonne (commençant par un numéro KRT00XXXX) représente les résultats obtenus pour chaque élément dans votre eau de puits. Lorsque celui-ci est grisé, c'est qu'il dépasse les normes maximales recommandées.

Depuis juin 2019, une nouvelle norme pour le manganèse a été établie à 120 µg/L. Les analyses démontrent que l'eau de votre puits enregistre un dépassement en manganèse avec une concentration de 1100 µg/L. Vous trouverez dans cet envoi un document explicatif sur la nature du manganèse, ses effets sur la santé ainsi que des conseils de prévention et de protection. Afin d'avoir plus d'information sur le type de contamination rencontrer dans votre puits, je vous invite à contacter la Direction de la Santé Publique du Bas-Saint-Laurent au : 418-724-5231 poste 219 ou par courriel à sante.environnementale.dspublique.cisssbsl@ssss.gouv.qc.ca

Pour ce qui est des analyses bactériologiques, celles-ci démontrent des résultats hors-normes pour ce qui est de coliformes totaux. Bien que ces coliformes n'affectent pas la santé humaine, il est recommandé d'effectuer une désinfection de votre puits et de vos canalisations selon le protocole que vous trouverez dans cet envoi.



Finalement, nous avons également joint à votre envoi le contrat signé par toutes les parties concernées. Aussi, nous vous rappelons qu'afin d'assurer la qualité de l'eau de votre puits et d'en prévenir la contamination il est recommandé de :

- Faire analyser deux fois par année les paramètres bactériologiques (automne et printemps).
- Procéder à un entretien annuel de votre puits
- Vérifier régulièrement l'état de votre installation septique.

Pour plus d'information ou pour des questions, n'hésitez pas à nous contacter :

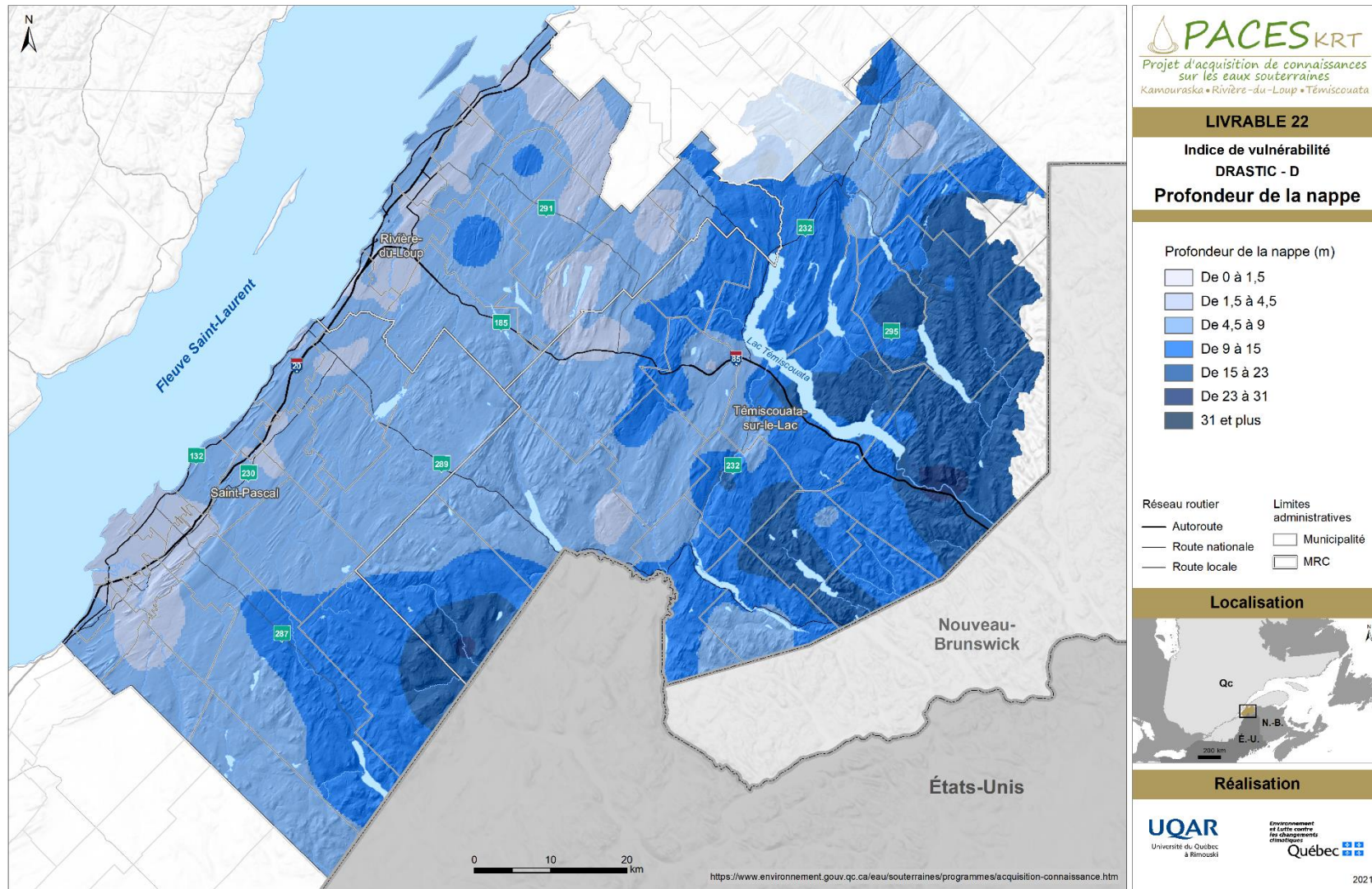
Gwendoline Tommi-Morin ou Claude-André Cloutier

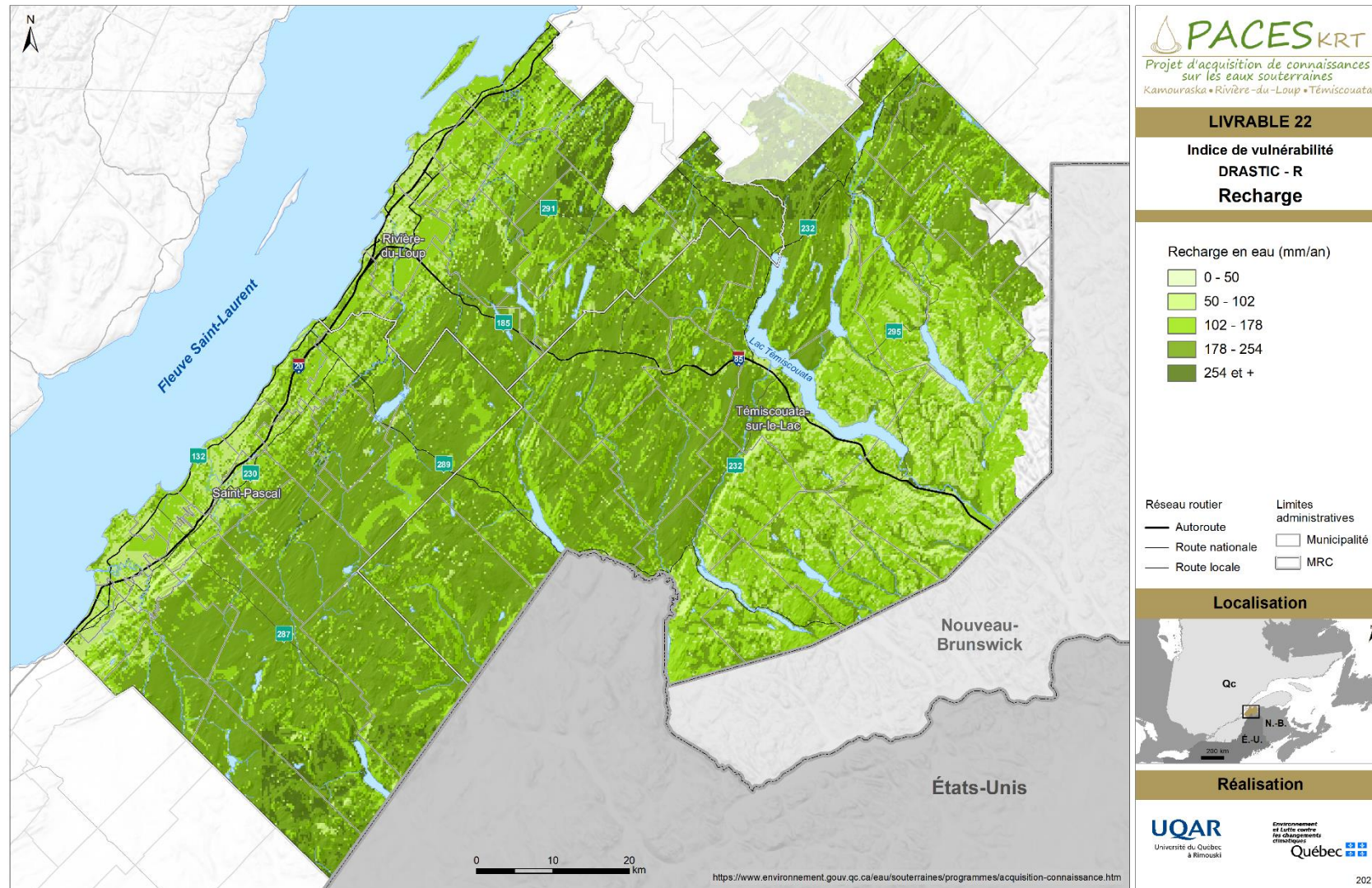
Par téléphone : 4187-723-1986 poste 1733

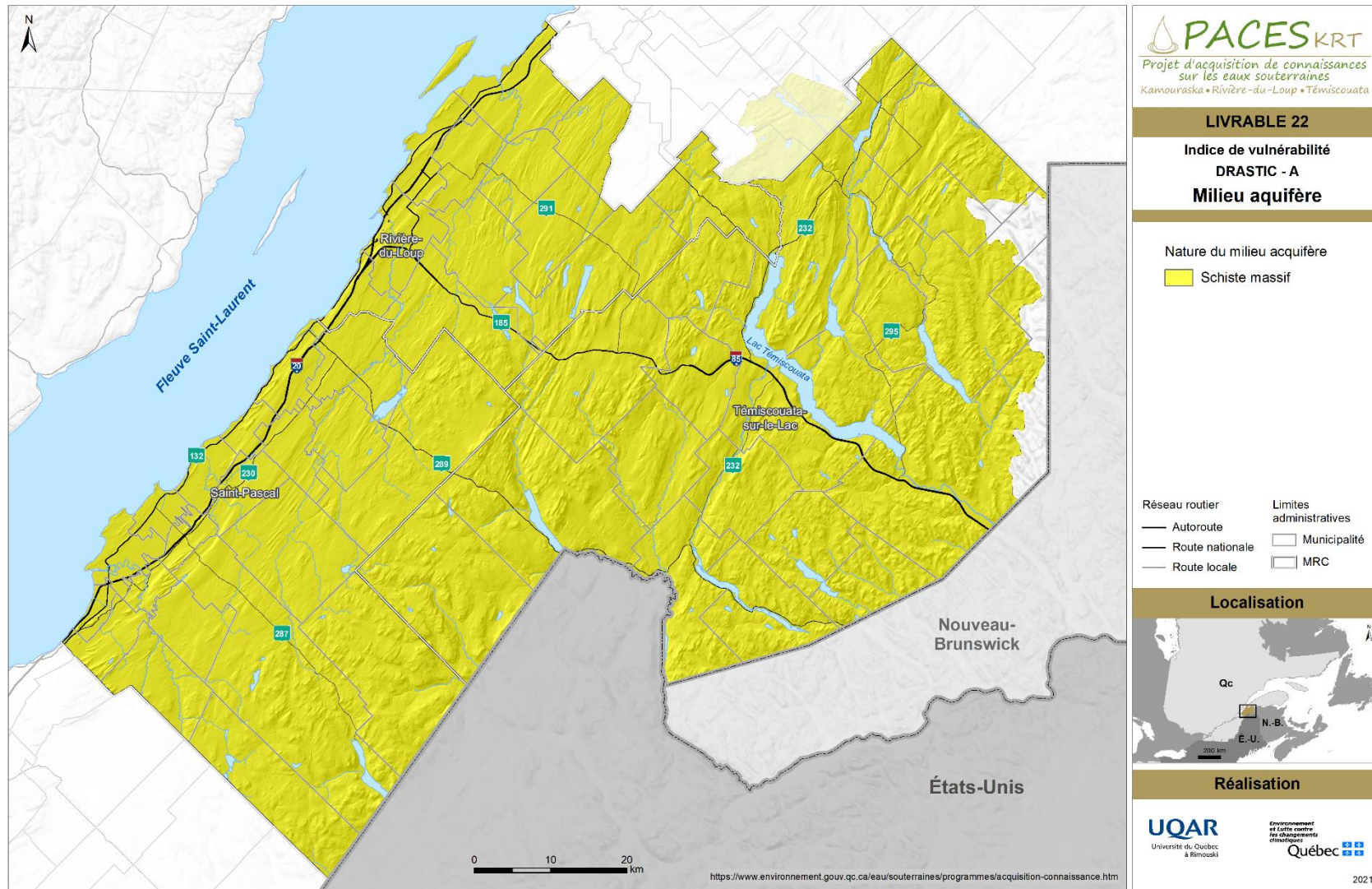
Cordialement,

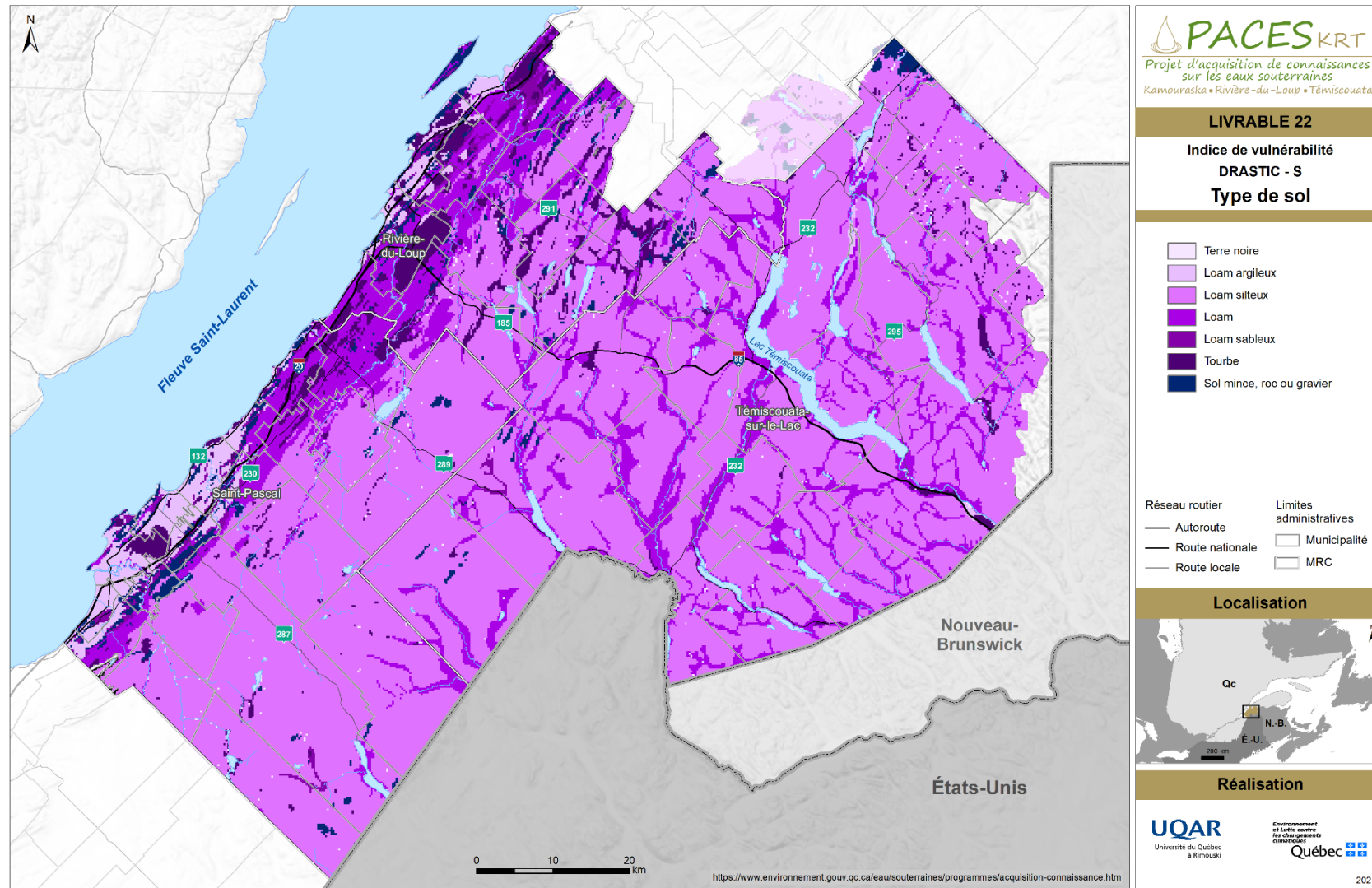
L'équipe du PACES-KRT

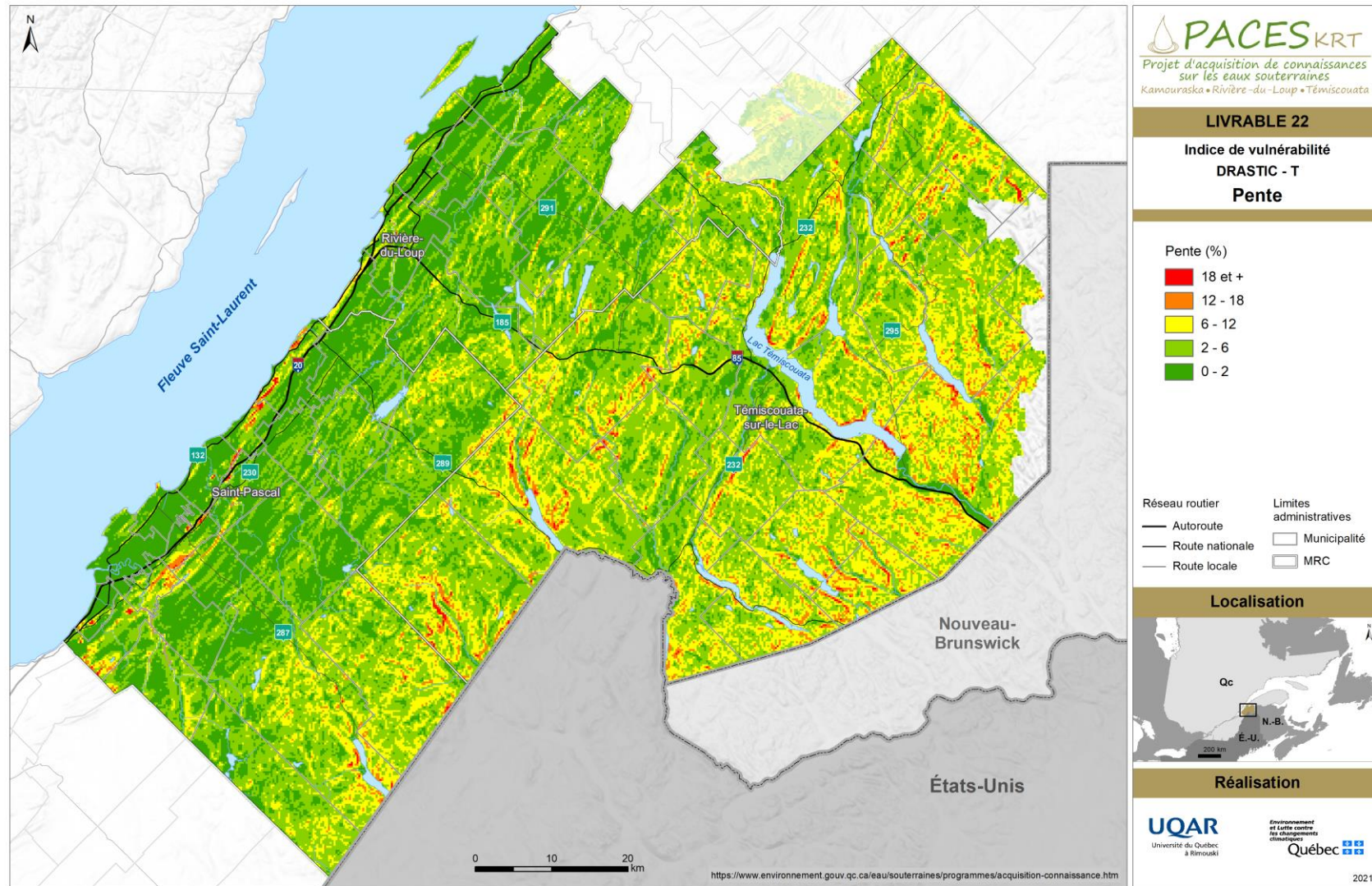
Annexe 7- Cartes des paramètres utilisée pour le calcul de l'indice DRASTIC

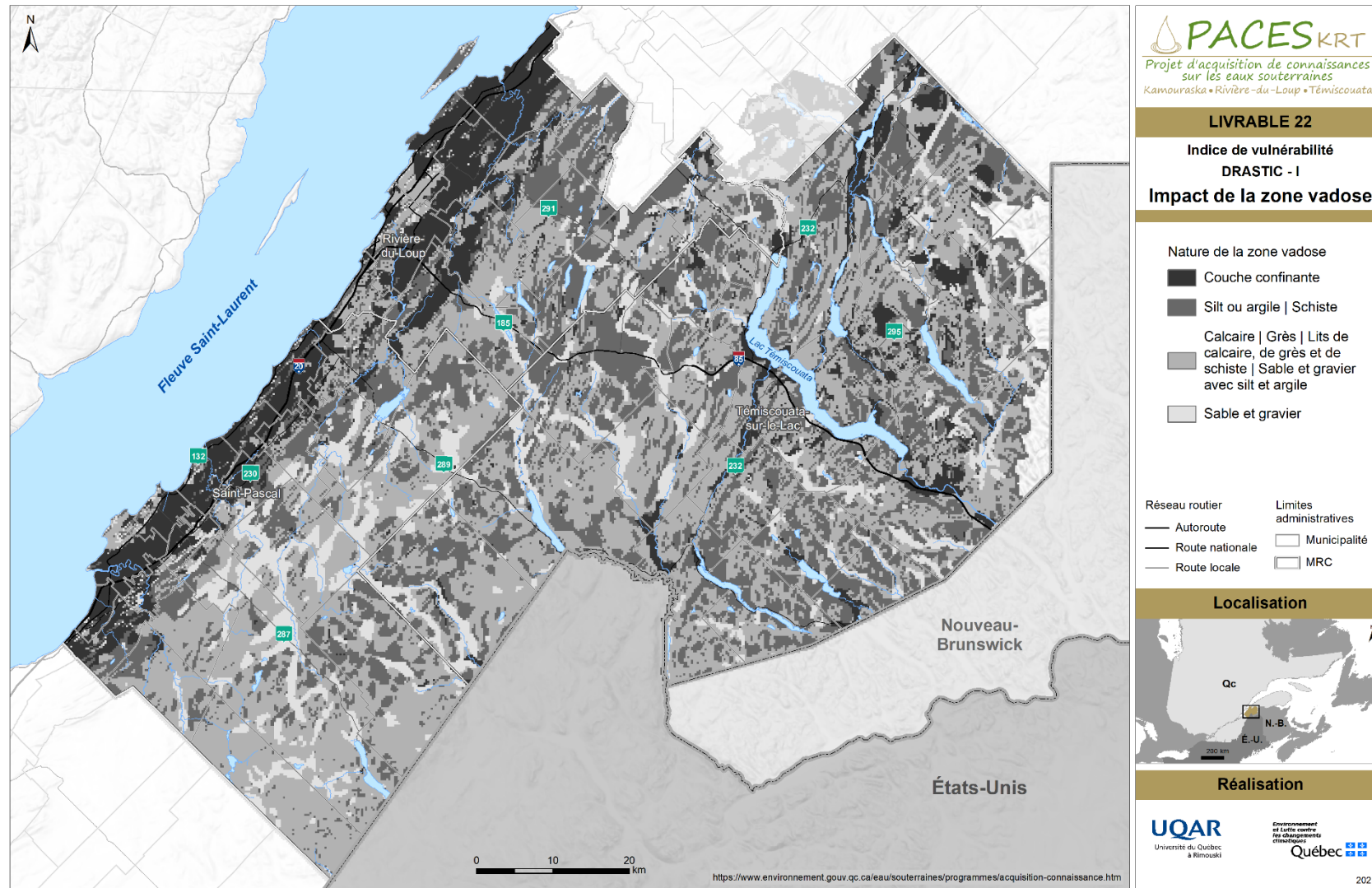


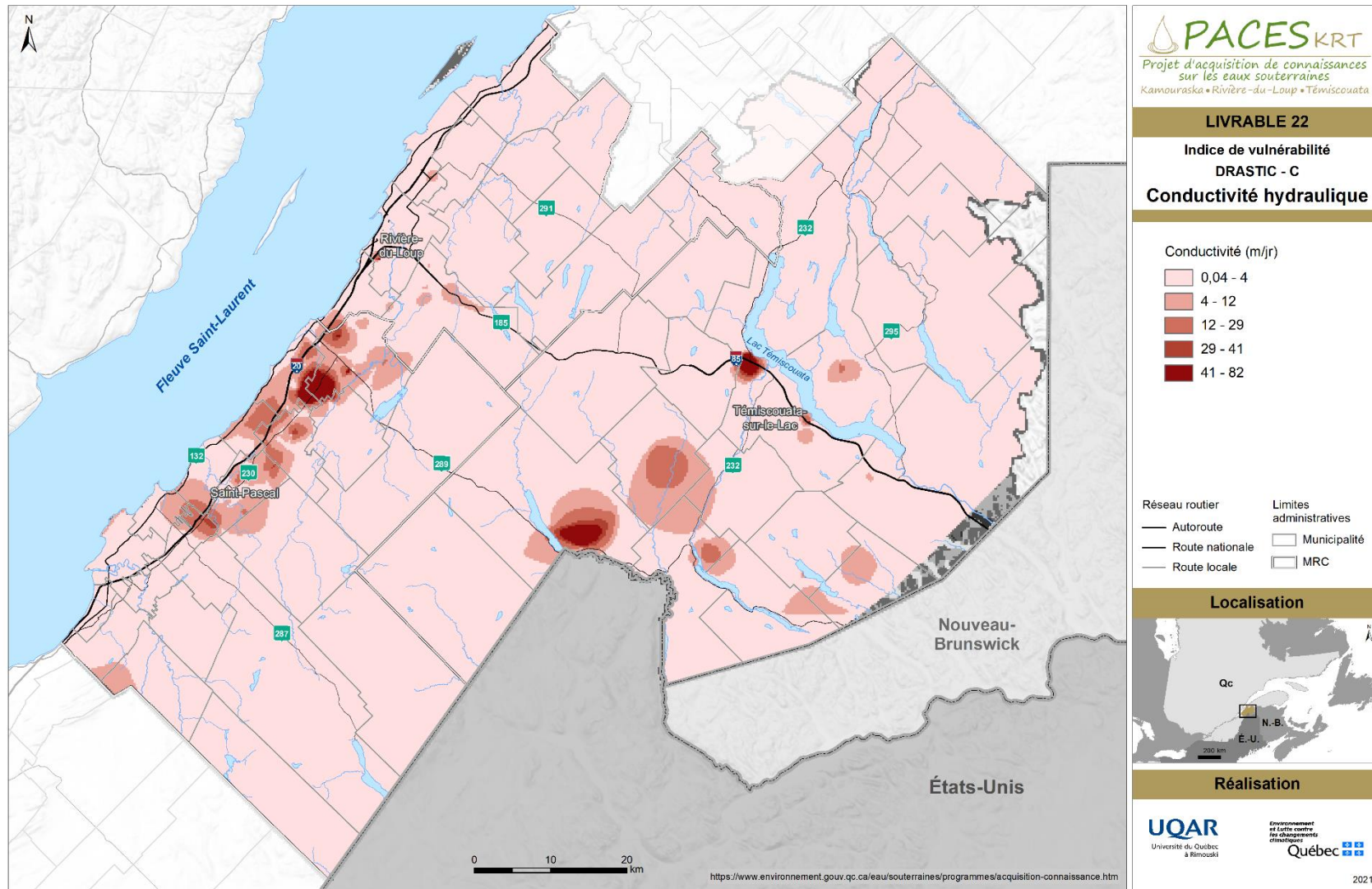












Annexe 8–Affiche présentée lors du congrès GAC-MAC-IAH en mai 2019



Origins of the geochemical fingerprint of shallow groundwaters in the Bas St-Laurent region

Gwénaëlle Chaillou¹, Gwendoline Tommi-Morin², Claude-André Cloutier², Thomas Buffin-Bélanger²

¹Institut des sciences de la mer, Université du Québec à Rimouski, Rimouski; ²Département de Biologie, Chimie, Géographie, Université du Québec à Rimouski, Rimouski



Context of the study

Groundwater provides the primary source of water supply in the eastern part of the Bas-Saint-Laurent region (BSL), a region shaped by the Appalachians, a strong Quaternary glacial heritage, and coastal dynamics from the St. Lawrence Estuary. Groundwater hydrogeochemistry of the BSL aquifer system was extensively studied over the last 5 years as part of a regional hydrogeological characterization project. Around 150 groundwater samples were collected in private and municipal wells distributed evenly over the study area (Figure 1). A hierarchical cluster analysis, based on the distribution of major and trace elements, revealed the occurrence of four distinct geochemical groups: from less mineralized groundwater in the Appalachian recharge areas to more mineralized water in the coastal areas. We proposed that most of the groundwater mineralization was induced by the mixing with evaporated or remnant seawater originated from past transgressions and cation exchange processes along the groundwater flow. However, discriminate the role of geological and hydrogeological contexts on this evolution were not possible. Here, we propose to explore the use of canonical analyses to understand the control of hydrogeological factors (aquifer confinement conditions, stratigraphy, piezometric level, recharge area surface, depth of wells, ...) on the geochemical groundwater fingerprints. Using this approach, we hope to propose a model to divide the BSL territory with distinct groundwater quality, with a minimum of groundwater samples. This work is a contribution to the *Programme d'Acquisition des Connaissances sur les Eaux Souterraines* (PACES), a vast program studying groundwater in municipal regions in the province of Québec.

Hydrogeological context

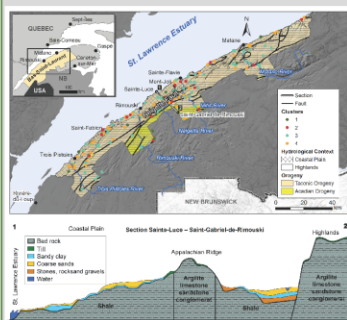


Figure 1: (top) Location of the study area in the Bas-Saint-Laurent region, Québec Canada, with the geological and hydrogeological context of the study area and (bottom) schematic drawing of the principal hydrostratigraphic units present along cross section 1-2, from the coastal plain to the highlands.

The locations of the four geochemical water clusters revealed by a hierarchical cluster analysis (HCA) was also reported. This analysis was performed on bedrock groundwater based on 20 parameters that included major and trace elements with significant concentrations in the studied area



Hydrogeochemistry of regional aquifer

Table 1: Mean geochemical parameter values characterizing the four geochemical groups identified by hierarchical cluster analysis (HCA) in granular (N=52) and bedrock (N=113) aquifers.

High TDS	clusters		T	pH	DO	HCO3	Cl	Na	Ca	Mg	SO4	Br	Si	F	B	K	Sr	Fe	Mn	Ba	Al	Zn	Sc		
	1	2	8.50	7.81	19.99	368.03	250.91	232.73	61.33	9.88	61.33	0.50	3.15	0.02	0.28	5.23	0.35	0.02	0.02	0.15	0.01	0.04	1.23		
	3	4	8.51	7.77	7.16	340.45	44.24	92.22	58.58	13.13	34.62	0.00	4.28	0.49	0.24	6.29	0.73	0.07	0.12	0.16	0.07	0.03	0.68		
	5	6	8.61	7.41	18.74	212.21	24.51	23.49	61.06	9.35	19.95	0.01	3.64	0.12	0.05	2.96	0.39	0.21	0.17	0.13	0.00	0.04	0.44		
	7	8	8.50	7.09	17.89	89.54	13.20	14.11	28.68	5.89	15.77	0.00	4.06	0.06	0.02	3.26	0.19	0.13	0.08	0.10	0.01	0.04	0.26		
Low TDS																									

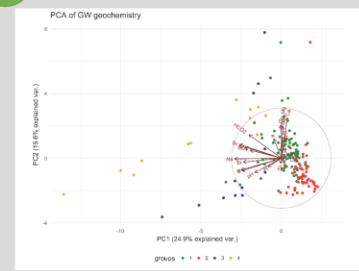


Figure 2: Biplot of PCA results on groundwater geochemistry. PCA analysis was performed on R using the « Vegan » package. The first two PCs only represented 40.5% of the variance.

Major ions (Na, Cl, Ca, Mg and HCO₃) combined to some trace elements (Sc, B, F and Sr and Ba) controlled the distribution of groundwater samples.

Hydrogeological control on geochemistry

How do hydrogeological factors control the geochemical fingerprint of bedrock groundwater?

The canonical correspondences analysis (CCA) searches for a relationship between groups of variables. Specifically, the CCA can be used to identify and measure associations among two sets of variables or two matrices. One of them has observations (for example, the distribution of major and trace elements). The other matrix has gradients (for example, measurements of hydrogeological parameters, such as well depth in the bedrock, the elevation of the sampled well, the type of aquifer,...). CCA can also be used to relate a qualitative explanatory variable to unimodal response data (Legendre and Legendre, 1998).

Here we test the use of CCA to determine how depth, elevation and type of aquifer (confined and unconfined) control 1) the distribution of Na, Cl, Ca, Mg, HCO₃, and SO₄, the major geochemical variables that influences groundwater groups; and 2) Na, Cl, Ca, Mg, HCO₃, and Sc, B, F, Sr and Ba the major elements that lead the PCs.

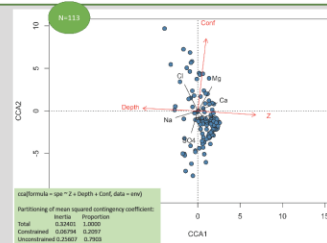


Figure 3: Biplot of CCA results on major ions. CCA analysis was performed on R using the « Vegan » package. This statistical model only explains 20% of the variance of major ions distribution in the bedrock. However, based on permutation test (steps = 1000), the CCA model (Z, depth, conf) is significant with a p value = 0.05.

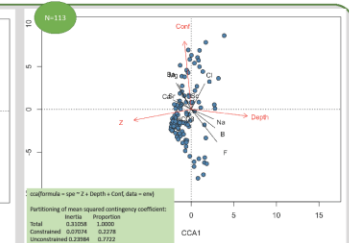


Figure 4: Biplot of CCA results on major and trace ions. CCA analysis was performed on R using the « Vegan » package. This statistical model only explains 22% of the variance of ions distribution in the bedrock. However, based on permutation test (steps = 1000), the CCA model (Z, depth, conf) is significant with a p value < 0.05.

Concluding remarks: The model including the elevation and depth of sampled wells and the type of aquifers significantly controls the distribution of major ions and some trace elements associated to processes of water-rock interaction and groundwater mineralization. However, it only explains ~20% of the variance, suggesting that other parameters are missing. The next steps is to include the geology, the stratigraphy, the recharge surface area...