

Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC Les Moulins

RAPPORT FINAL

**Sylvain Gagné
Marie Larocque
Alice Morard
Marjolaine Roux**

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère

29 mars 2022

Équipe de réalisation

Auteurs du rapport

Sylvain Gagné	Agent de recherche, UQAM
Marie Larocque	Responsable du projet, ingénieure spécialisée sur l'eau souterraine, professeure, UQAM
Alice Morard	Agente de support à la recherche, UQAM
Marjolaine Roux	Agente de support à la recherche, UQAM

Collaborateurs

Daniele Pinti	Spécialiste des temps de séjour, professeur, UQAM
David Widory	Géochimiste isotopique, professeur, UQAM

Étudiants MSc

Samuel Bolduc, Jonathan Chabot-Grégoire, Frédérique Dubois, Rachel Laplante, MSc Sciences de la Terre, UQAM

Fanny Pithon, MSc Sciences de l'environnement, UQAM

Partenaires régionaux au projet

Organisme de bassin versant Abrinord

Organisme de bassin versant COBALI

Organisme de bassin versant RPNS

Organisme de bassin versant COBAMIL

MRC d'Antoine-Labelle,

MRC d'Argenteuil

MRC de la Rivière-du-Nord

MRC des Pays-d'en-Haut

MRC des Laurentides

MRC les Moulins

Référence à citer

Gagné, S., Larocque, M., Morard, A., Roux, M. 2022. Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC Les Moulins - Rapport final mars 2022, Rapport déposé au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada. 210 p.

AVANT-PROPOS

Ce rapport est le résultat de quatre années de travail de caractérisation des eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC les Moulins. Ce projet a été financé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), avec la contribution des MRC d'Argenteuil, de la Rivière-du-Nord, des Laurentides, Les Moulins, des Pays-d'en-Haut et d'Antoine-Labelle, ainsi qu'avec la contribution des organismes de bassin versant Abrinord (rivière du Nord), RPNS (rivières Rouge, Petite Nation et Saumon), COBALI (rivière du Lièvre), et du COBAMIL (Conseil des bassins versants des Mille-Îles).

Les auteurs remercient tous les partenaires pour leur implication financière et logistique dans le projet. Les auteurs désirent également remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation du projet, les collaborateurs scientifiques, les étudiants de maîtrise, les stagiaires ainsi que le personnel de soutien de l'UQAM. Les travaux de terrain n'auraient pas pu avoir lieu sans la collaboration des habitants de la région, des MRC, des municipalités et des ministères.

Il est important de souligner que toutes les cartes produites dans ce projet sont représentatives des conditions régionales à l'échelle 1/100 000 telles que définies à l'aide des données disponibles. Le portrait régional qui en découle pourrait s'avérer non représentatif localement compte tenu de la variabilité de la qualité et de la distribution spatiale et temporelle des données utilisées, et ce, malgré les efforts déployés lors de la collecte, de la sélection et de la validation des données pour assurer la plus grande qualité possible aux résultats. Par conséquent, les données acquises ne peuvent remplacer les études requises pour définir les conditions réelles à l'échelle locale. Les auteurs et leurs institutions d'attache ne donnent aucune garantie quant à la fiabilité ou à l'adaptation à une fin particulière de toute activité qui utiliserait les données du projet et n'assument aucune responsabilité pour les dommages qui pourrait découler de leur utilisation.

RÉSUMÉ

Le *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC Les Moulins* (PACES-LAULM), est financé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Ce projet avait pour but d'établir la cartographie hydrogéologique dans une portion de la région administrative des Laurentides et de la MRC Les Moulins, en incluant dans la cartographie les données d'un projet pilote de cartographie hydrogéologique *Aquifères fracturés du sud-ouest du Québec* (AFSOQ) complété il y a quelques années dans la partie la plus au sud de la région des Laurentides (superficie totale 11 477 km²). Il a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal en collaboration avec les organismes de bassin versant Abrinord (rivière du Nord), COBALI (rivière du Lièvre), RPNS (rivières Rouge, Petite Nation et Saumon) et COBAMIL (rivière Mille-Îles), et en collaboration avec les MRC d'Antoine-Labelle, d'Argenteuil, de la Rivière-du-Nord, des Laurentides, des Pays-d'en-Haut et des Moulins.

Les résultats montrent que l'aquifère de roc fracturé du Bouclier canadien est dans l'ensemble peu productif et que les principaux aquifères sont dans les dépôts granulaires situés dans les vallées. L'eau souterraine s'écoule des sommets vers les vallées des grandes rivières. Une partie importante de cet écoulement souterrain est intercepté par les nombreuses rivières de la région qui drainent le territoire vers la rivière des Outaouais. À l'échelle régionale, la recharge de l'aquifère fracturé est estimée à 198 mm/an. Les volumes d'eau souterraine utilisés par les particuliers, les villes, l'agriculture et l'industrie représentent environ 0,5 % de la recharge potentielle. Il ne semble donc pas y avoir de pressions majeures sur les quantités d'eau souterraine disponibles régionalement. Toutefois, l'analyse des temps de séjour montre que l'eau souterraine est un mélange entre des eaux relativement jeunes et des eaux plus anciennes, ce qui souligne l'importance de développer avec parcimonie la ressource.

L'eau souterraine de la zone d'étude est de bonne qualité. Le petit nombre de dépassements des normes pour la qualité de l'eau potable (baryum, fluor, manganèse et uranium) seraient d'origine naturelle. Certaines problématiques ont été identifiées concernant les critères esthétiques et notamment les concentrations en manganèse. Des dépassements de normes bactériologiques ont été observés à 29% des puits échantillonnés. Les concentrations en nitrates ne dépassent pas la norme pour l'eau potable, mais reflètent l'impact anthropique des activités agricoles. De la même manière, la présence de pesticides et de produits pharmaceutiques montre un impact anthropique et confirme que les temps de séjour de l'eau souterraine peuvent être courts. L'activité ²²²Rn dans l'eau souterraine est également importante dans certains secteurs, ce qui indique la présence d'un enjeu possible de santé publique en lien avec la présence de radon dans l'air des résidences. Les risques de contamination de l'eau souterraine dans la région ne sont pas négligeables, ce qui est souligné par une vulnérabilité DRASTIC moyenne sur la majorité de la zone d'étude.

Le développement résidentiel, touristique et industriel de la région, combiné aux pressions des changements climatiques, apportera des défis importants dans la région au cours des prochaines décennies. Les données acquises, les cartes produites et les analyses qui en découlent seront directement utiles pour la gestion durable de la ressource en eau et du territoire à l'échelle de toute la région.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Contexte de réalisation du projet et objectifs	1
1.2	Équipe de réalisation et partenaires	2
1.2.1	Équipe de réalisation	2
1.2.2	Partenaires	3
1.3	Organisation du rapport	4
2	PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	5
2.1	Localisation.....	5
2.2	Milieu naturel	7
2.2.1	Topographie et modèle numérique altimétrique	7
2.2.2	Pente du sol.....	7
2.2.3	Hydrographie et limites des bassins	10
2.2.4	Couverture végétale	13
2.2.5	Milieus humides	17
2.2.6	Pédologie.....	19
2.3	Réseau de surveillance et programme de suivi	21
2.3.1	Données météorologiques.....	21
2.3.2	Données hydrométriques.....	22
2.3.3	Données piézométriques	23
2.4	Population, centres urbains et activités.....	28
2.4.1	Limites administratives, axes routiers et municipalités	28
2.4.2	Occupation du sol.....	30
2.4.3	Affectation du territoire.....	32
3	ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION	34
3.1	Compilation des informations existantes	34
3.2	Travaux de caractérisation	36
3.2.1	Géophysique	38
3.2.2	Installation de puits d'observation.....	38
3.2.3	Essais hydrauliques sur les puits.....	39
3.2.4	Échantillonnage d'eau souterraine	40
3.3	Saisie, validation et archivage des données	45
3.4	Géologie du socle rocheux.....	46
3.4.1	Histoire géologique et contexte général	46
3.4.2	Lithologies et structures régionales	48
3.5	Géologie du Quaternaire.....	51

3.5.1	Histoire du Quaternaire.....	51
3.5.2	Couverture des dépôts quaternaires	54
3.6	Épaisseur des dépôts meubles	55
3.7	Topographie du socle rocheux	56
3.8	Contextes hydrostratigraphiques des dépôts meubles	59
3.9	Épaisseur des dépôts perméables en nappe libre	59
3.10	Indices de confinement.....	60
4	CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES	64
4.1	Propriétés hydrauliques	64
4.1.1	Essais hydrauliques disponibles pour les forages municipaux.....	64
4.1.2	Essais de pompage réalisés dans le cadre du projet	65
4.2	Piézométrie et écoulement	68
4.3	Coupes hydrostratigraphiques	70
4.3.1	Rivière du Lièvre – secteur amont de la zone d’étude (# 1)	71
4.3.2	Rivière du Lièvre – secteur aval de la zone d’étude (# 2).....	72
4.3.3	Rivière Rouge – secteur amont de la zone d’étude (# 3)	73
4.3.4	Rivière Rouge – secteur centre de la zone d’étude (# 4)	74
4.3.5	Rivière du Nord – secteur aval de la zone d’étude (#5).....	75
4.3.6	MRC Les Moulins – secteur aval de la zone d’étude (# 6)	76
4.4	Recharge	78
4.4.1	Débits obtenus par séparation des hydrogrammes	78
4.4.2	Recharge par analyse des fluctuations de niveaux de nappe	79
4.4.3	Recharge spatialisée simulée par bilan hydrique spatialisé	80
4.4.4	Zones de recharge préférentielle et de résurgence.....	84
4.5	Bilan hydrique régional.....	90
4.6	Géochimie de l’eau souterraine	93
4.6.1	Détermination des types d’eaux	93
4.6.2	Isotopes stables de l’eau (^2H et ^{18}O).....	97
4.6.3	Isotopes stables des nitrates (^{18}O et ^{15}N)	99
4.6.4	Radon (^{222}Rn)	100
4.6.5	Datation et traçage isotopique	102
5	RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE	105
5.1	Usage de la ressource	105
5.2	Qualité de la ressource	111
5.2.1	Normes de potabilité.....	111
5.2.2	Objectifs esthétiques	115
5.2.3	Pesticides et produits pharmaceutiques (PPP)	116
5.3	Indice de vulnérabilité DRASTIC	118

5.4	Densité du risque anthropique.....	120
5.5	Contextes hydrogéologiques régionaux.....	122
5.5.1	Hydrostratigraphie et confinement.....	123
5.5.2	Recharge	124
5.5.3	Vulnérabilité, activité anthropique et qualité de l'eau souterraine.....	124
5.5.4	Prélèvement en eau	126
5.6	Gestion durable de la ressource	129
5.6.1	Principes de gestion durable	129
5.6.2	Indicateurs de quantité	130
5.6.3	Indicateurs de qualité	131
6	CONCLUSIONS	133
7	RÉFÉRENCES	136
8	ANNEXE A – Photographies des travaux de terrain	142
9	ANNEXE B – Schémas des puits d'observation installés dans le cadre du projet...	146
10	ANNEXE C – Protocole d'échantillonnage de l'eau souterraine.....	159
11	ANNEXE D – Calcul de l'épaisseur des dépôts meubles et des contextes hydrostratigraphiques	162
12	ANNEXE E – Méthodologie utilisée pour le calcul de l'utilisation de l'eau.....	166
13	ANNEXE F – Pesticides et produits pharmaceutiques (PPP).....	171
14	ANNEXE G – Méthodologie du calcul de l'indice DRASTIC	173
15	ANNEXE H - Calcul de l'indice du risque anthropique	179
16	ANNEXE I – Carte des paramètres de la norme de qualité esthétique de l'eau souterraine.....	185
17	ANNEXE J – Datation et temps de résidence de l'eau souterraine (MSc Samuel Bolduc)	194
18	ANNEXE K – Émergence de l'eau souterraine dans les bassins versants amonts (MSc Frédérique Dubois)	199
19	ANNEXE L – Quantification de la recharge de l'eau souterraine (MSc Jonathan Chabot-Grégoire)	207
20	ANNEXE M – Indicateurs de vulnérabilité de l'eau souterraine et indice d'impacts anthropiques (MSc Fanny Pithon)	208
21	ANNEXE N – Connectivité hydrologique et hydrogéologique des milieux humides (MSc Rachel Laplante).....	210

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du site d'étude.....	6
Figure 2 : Topographie de la surface du sol.....	8
Figure 3 : Pente de la surface du sol.....	9
Figure 4 : Hydrographie (GRHQ, 2019).....	11
Figure 5 : Limites des bassins versants (MELCC, 2019a).....	12
Figure 6 : Couverture végétale – types de peuplements forestiers (SIEF, 2018)	14
Figure 7 : Couverture végétale – type de cultures (BDPPAD, 2020)	15
Figure 8 : Superficie relative de la couverture forestière (SIEF, 2018).....	16
Figure 9 : Superficies relatives des types de cultures (BPPAD, 2020)	16
Figure 10 : Répartition relative des milieux humides (CIC, 2016; MELCC, 2019b).....	17
Figure 11 : Milieux humides (CIC 2016 ; MELCC 2019b)	18
Figure 12 : Proportion des types de drainage sur la zone d'étude (IRDA, 2018a ; 2018b ; SIEF, 2018)	19
Figure 13 : Pédologie (IRDA, 2018a ; 2018b ; SIEF, 2018)	20
Figure 14 : Débit total annuel pour les rivières Rouge (station 40204), du Nord (station 40110) et du Lièvre (40624).....	23
Figure 15 : Réseau de suivi météorologique, hydrologique et piézométrique.....	25
Figure 16 : Distribution spatiale des températures annuelles moyennes (1961-2017).....	26
Figure 17 : Distribution spatiale des précipitations annuelles moyennes (1961-2017).....	27
Figure 18 : Limites des municipalités, des MRC et réseau routier (MAMH, 2020 ; BDTQ, 2016)	29
Figure 19 : Pourcentage des différents types d'occupation du sol (MELCC, 2019c)	30
Figure 20 : Occupation du sol (MELCC, 2019c).....	31
Figure 21 : Pourcentage des différents types d'affectation du territoire (MAMH, 2020)	32
Figure 22 : Affectation du territoire (MAMH, 2020).....	33

Figure 23 : Localisation de tous les travaux de caractérisation réalisés dans le cadre du projet PACES-LAULM	37
Figure 24 : Géologie du socle rocheux (MERN, 2020a)	47
Figure 25 : Carte géologique des roches plutoniques et complexes gneissiques dans les marbres de la ceinture centrale métasédimentaire et de la suite AMCG de Morin située dans le terrane de Morin (Corriveau et Morin, 2001)	49
Figure 26 : Géologie du Quaternaire (MERN, 2020b). Les dépôts quaternaires correspondant aux abréviations sont décrits dans MERN (2014).	53
Figure 27 : Épaisseur des dépôts meubles	57
Figure 28 : Topographie du socle rocheux.....	58
Figure 29 : Contextes hydrostratigraphiques.....	61
Figure 30 : Épaisseur des dépôts perméables en nappe libre.....	62
Figure 31 : Indices de confinement	63
Figure 32 : Conductivités hydrauliques provenant des rapports de consultants et des rapports gouvernementaux pour les aquifères de roc fracturé et de dépôts meubles	65
Figure 33 : Localisation et gamme de conductivités hydrauliques pour les aquifères de roc fracturé et les aquifères de dépôts meubles provenant des rapports de consultants et des rapports gouvernementaux.....	67
Figure 34 : Élévation piézométrique de l'eau souterraine.....	69
Figure 35 : Localisation des coupes hydrostratigraphiques	70
Figure 36 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière du Lièvre dans le secteur de Ferme-Neuve et du puits RSESQ 04060004.....	71
Figure 37 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière du Lièvre dans le secteur de Notre-Dame-du-Laus et du puits RSESQ 04060002	73
Figure 38 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière Rouge dans le secteur de L'Ascension et du puits RSESQ 04020002	74
Figure 39 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière Rouge dans le secteur de La Conception et du puits RSESQ 04020004.....	75

Figure 40 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière du Nord dans le secteur des puits d'alimentation en eau potable de Saint-Sauveur	76
Figure 41 : Coupe nord-ouest/sud-est dans la MRC Les Moulins dans le secteur du puits RSESQ 040646001	77
Figure 42 : Fonctionnement du modèle HydroBudget utilisé pour calculer la recharge potentielle (Dubois et al., 2021).....	81
Figure 43 : Répartition spatiale de la recharge potentielle moyenne annuelle de 1961 à 2017	83
Figure 44 : Variations interannuelles de la recharge pour toute la zone d'étude de 1961 à 2017	84
Figure 45 : Variation intermensuelle de la recharge pour toute la zone d'étude de 1961 à 2017	84
Figure 46 : Zones de recharge préférentielle (> 265 mm/an).....	86
Figure 47 : Potentiel d'échange nappe-rivière pour le réseau hydrologique du GRHQ	87
Figure 48 : Variations des niveaux d'eau et des profondeurs de l'eau à différents puits ..	89
Figure 49 : Composante du bilan hydrique moyenne mensuelle pour la période de 1961 à 2017 pour toute la zone du PACES-LAULM.....	91
Figure 50 : Bilan hydrique par ZGIE a) COBALI, b) RPNS, c) ABRINORD et d) COBAMIL. La colonne de gauche représente les valeurs moyennes mensuelles 1961-2017 des composantes du bilan hydrique et la colonne de droite représente les recharges moyennes annuelles 1961-2017.....	92
Figure 51 : Types d'eau selon le type d'aquifère	95
Figure 52 : Types d'eau selon le confinement de la nappe	95
Figure 53 : Répartition spatiale des types d'eau et de l'indice de confinement.....	96
Figure 54 : Relation Na^+/Cl^- dans l'eau souterraine.....	97
Figure 55 : Composition isotopique $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau dans la zone d'étude	98
Figure 56 : Répartition spatiale des $\delta^2\text{H}$ en fonction de la latitude	99
Figure 57 : Compositions isotopiques en $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des nitrates dans l'eau souterraine et gammes de valeurs pour les sources potentielles selon Kendall et al. (2008)	100

Figure 58 : Activité du ^{222}Rn dans l'eau souterraine	101
Figure 59. Temps de résidence $^3\text{H}/^3\text{He}$	103
Figure 60. Âges corrigés ^{14}C par la méthode de Fontes et Garnier (1979)	104
Figure 61 : Provenance de l'eau distribuée dans les réseaux d'aqueduc municipaux	106
Figure 62 : Volume d'eau prélevé selon la provenance de l'eau pour la période 2015-2019 (zone d'étude excluant la zone AFSOQ ; GPE - MELCC, 2019c).....	109
Figure 63 : Nombre de sites de prélèvement pour la période 2015-2019 selon la provenance de l'eau (GPE - MELCC, 2019c)	109
Figure 64 : Consommation de l'eau selon les usages par MRC	110
Figure 65 : Critère de potabilité inorganique (Québec, 2019)	113
Figure 66 : Critère de potabilité bactériologique (Québec, 2019)	114
Figure 67 : Pesticides et produits pharmaceutiques détectés dans l'eau souterraine	117
Figure 68 : Répartition des indices de vulnérabilité DRASTIC. Les classes sont basées sur le RPEP (RPEP, 2020), c.-à-d. qu'un indice faible est < 100, un indice moyen est entre 100 et 180 et un indice élevé est > 180.....	118
Figure 69 : Indice de vulnérabilité DRASTIC du premier aquifère rencontré	119
Figure 70 : Densité du risque anthropique et localisation des sites contaminés (MELCC, 2019d).....	121
Figure 71 : Proportion de superficies selon l'indice DRASTIC pour les zones où la densité des activités anthropiques est élevée	122
Figure 72 : Volume d'eau souterraine prélevé selon le registre des grands préleveurs pour chacune des ZGIE (MELCC, 2019e ; données confidentielles).....	127
Figure 73 : Volume d'eau de surface prélevé selon le registre des grands préleveurs pour chacune des ZGIE (GPE MELCC 2019 ; données confidentielles)	127
Figure 74 : Modèle conceptuel du bilan hydrogéologique régional.....	128
Figure 75. Schéma du puits d'observation 4020002	146
Figure 76 : Schéma du puits d'observation 4020006.....	147
Figure 77. Schéma du puits d'observation 4020002	148

Figure 78. Schéma du puits d'observation 4020003	149
Figure 79. Schéma du puits d'observation 4020004	150
Figure 80 : Schéma du puits d'observation 4020005.....	151
Figure 81. Schéma du puits d'observation 4060002	152
Figure 82. Schéma du puits d'observation 04060003	153
Figure 83. Schéma du puits d'observation 04060004	154
Figure 84 : Schéma du puits d'observation 04060005.....	155
Figure 85 : Schéma du puits d'observation 04010005.....	156
Figure 86 : Schéma du puits d'observation 04010004.....	157
Figure 87 : Schéma du puits d'observation 04640001	158
Figure 88 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour l'aluminium	185
Figure 89 Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour des chlorures	186
Figure 90 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour la dureté 187	
Figure 91 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le fer.....	188
Figure 92 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le manganèse	189
Figure 93 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour les matières totales dissoutes	190
Figure 94 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le pH.....	191
Figure 95 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le sodium	192
Figure 96 Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour les sulfures	193
Figure 97. Âge $^3\text{H}/^3\text{He}$ versus la concentration en ^4He radiogénique	196
Figure 98. Rapports isotopiques $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ vs les âges corrigés ^{14}C	197

Figure 99 : Évolution de l'activité des géochronomètres.....	198
Figure 100 : Localisation des quatre bassins versants étudiés	199
Figure 101. Comparaison des débits mesurés par bassin versant. Les débits ont été transformés en mm/an en utilisant la superficie de chaque bassin versant).....	201
Figure 102. Débits mesurés dans les bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Sagouay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases	201
Figure 103. Bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Sagouay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases.....	202
Figure 104. Comparaison des activités ^{222}Rn par bassin versant	203
Figure 105. Activités ^{222}Rn mesurées dans les bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Sagouay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases	204
Figure 106. $\delta^2\text{H}$ dans l'eau de surface sur a) le ruisseau Lanthier, b) la rivière Sagouay, c) la rivière à Simon, d) le ruisseau des Vases	205
Figure 107 : $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux de surface des bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Sagouay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases	206

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Équipe de réalisation du PACES Laurentides et la MRC les Moulins à l'UQAM 3	
Tableau 2 : Partenaires régionaux du projet PACES Laurentides et la MRC les Moulins....	4
Tableau 3 : MRC, superficies et populations sur le territoire étudié	5
Tableau 4 : Stations météorologiques actives en 2019	21
Tableau 5 : Statistiques des stations hydrométriques actives	22
Tableau 6 : Détails des puits d'observation du <i>Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec</i> (RSEQ) présents sur la zone d'étude.....	24
Tableau 7 : Sources d'informations disponibles pour la réalisation du projet	35
Tableau 8 : Résumé des travaux de caractérisation	36
Tableau 9 : Nouveaux puits d'observation	39
Tableau 10 : Essais de pompage réalisés dans le cadre du projet	40
Tableau 11 : Éléments chimiques analysés.....	41
Tableau 12 : Pesticides et produits pharmaceutiques analysés	42
Tableau 13 : Nombre d'entrées dans la base de données selon la source d'information .	45
Tableau 14 : Unités géologiques, âges et descriptions géologiques	50
Tableau 15 : Stratigraphie et hydrostratigraphie des dépôts meubles	52
Tableau 16: Moyennes géométriques de conductivités hydrauliques (K) et de transmissivités (T) et moyennes de coefficients d'emmagasinement (S) selon le type de géologie (rapports de consultants)	64
Tableau 17 : Résultats des essais de pompage réalisés dans le cadre du projet	66
Tableau 18 : Paramètres utilisés pour les filtres récursifs pour les cinq stations étudiées	78
Tableau 19 : Débits de base minimums, moyens et maximums estimés avec les filtres récursifs et le Q_{90} pour les cinq stations étudiées	79
Tableau 20 : Taux de recharge estimés par la méthode de fluctuations des niveaux d'eau souterraine.....	80

Tableau 21 : Périodes et statistiques de calibration du modèle HydroBudget sur le bassin versant de la rivière du Nord.....	82
Tableau 22 : Classement des dépôts quaternaires selon leur potentiel aquifère.....	85
Tableau 23 : Potentiel de connectivité nappe-rivières pour toute la zone d'étude.....	88
Tableau 24 : Valeurs annuelles moyennes des composantes du bilan hydrique pour chacun des ZGIE (portion incluse dans la zone PACES-LAULM) et pour l'ensemble de la zone d'étude pour la période 1961-2017	91
Tableau 25: Répartition des faciès selon le type d'aquifère et le degré de confinement...	94
Tableau 26 : Consommation d'eau par type d'usage et par MRC*	108
Tableau 27 : Sommaire des dépassements de normes de qualité de l'eau potable*.....	112
Tableau 28 : Sommaire des dépassements de type bactériologique.....	112
Tableau 29 : Sommaire des dépassements objectifs esthétiques (OE).....	115
Tableau 30 : Proportions (%) du territoire des ZGIE pour les différents contextes hydrostatigraphiques.....	123
Tableau 31 : Proportions (%) du territoire des ZGIE pour les différents degrés de confinement.....	124
Tableau 32 : Recharge moyenne et médiane pour chacune des ZGIE pour la période 1961-2017	124
Tableau 33 : Proportion (%) du territoire des ZGIE pour l'indice DRASTIC.....	125
Tableau 34 : Proportion de territoire (%) des ZGIE pour l'indice de densité anthropique et la couverture agricole	125
Tableau 35 : Proportion (%) des échantillons qui dépassent la norme bactériologique et où des pesticides ou des produits pharmaceutiques (PPP) ont été détectés	126
Tableau 36 : Équivalent en mm/an des prélèvements en eau selon la ZGIE pour l'année 2019	127
Tableau 37 : Critères de correction pour l'épaisseur des dépôts meubles selon les types de dépôts meubles	163
Tableau 38 : Critères de correction pour l'épaisseur des dépôts perméables superficiels selon les types de dépôts quaternaires	164

Tableau 39 : Critères de correction pour l'épaisseur des dépôts imperméables selon les types de dépôts quaternaires	165
Tableau 40 : Critères pour la détermination des contextes hydrostratigraphiques	165
Tableau 41 : Charte de la consommation d'eau pour les productions animales (MAPAQ, 2020)	167
Tableau 42 : Charte de consommation végétale issue du rapport RADEAU II.....	169
Tableau 43 : Pesticides détectés dans l'eau souterraine	171
Tableau 44 : Produits pharmaceutiques détectés dans l'eau souterraine.....	172
Tableau 45 : Cote et valeurs associées pour la cote « D » de l'indice DRASTIC	173
Tableau 46 : Cote et valeurs associées pour la cote « R » de l'indice DRASTIC	174
Tableau 47 : Cote et valeurs associées pour la cote « A » de l'indice DRASTIC (socle rocheux)	175
Tableau 48 : Cote et valeurs associées pour la cote « A » de l'indice DRASTIC (dépôts meubles).....	175
Tableau 49 : Classe de drainage, type de sol et cotes « S » associées de l'indice DRASTIC	176
Tableau 50 : Classes de pentes et valeurs associées pour la cote « T » de l'indice DRASTIC	177
Tableau 51 : Type de géologie et valeurs associées pour la cote « I » de l'indice DRASTIC	177
Tableau 52 : Type de géologie et valeurs associées pour la cote «C» de l'indice DRASTIC	178
Tableau 53 : Activités exclues pour la préparation du livrable cartographique	181
Tableau 54 : Pondération de la toxicité des contaminants associés à l'activité.....	182
Tableau 55 : Pondération de la quantité de contaminants associés à l'activité	183
Tableau 56 : Pondération de la zone d'impact de l'activité.....	183
Tableau 57 : Pondération des rejets de contaminants vers l'eau souterraine	184
Tableau 58 : Classification et représentation du risque par activité	184

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de réalisation du projet et objectifs

Le *Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC Les Moulins* (PACES-LAULM), est financé par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Ce projet avait pour but d'établir la cartographie hydrogéologique dans une portion de la région administrative des Laurentides et de la MRC Les Moulins, en incluant dans la cartographie les données d'un projet pilote de cartographie hydrogéologique *Aquifères fracturés du sud-ouest du Québec* (AFSOQ) complété il y a quelques années dans la partie la plus au sud de la région des Laurentides (Savard et al., 2013). Le PACES-LAULM a été réalisé par l'Université du Québec à Montréal (UQAM), en collaboration avec un ensemble de partenaires régionaux.

Les objectifs du projet étaient les suivants :

1. Comprendre la nature des formations aquifères ;
2. Connaître l'origine et les directions d'écoulement de l'eau souterraine ;
3. Décrire la qualité de l'eau souterraine ;
4. Quantifier le bilan hydrique de l'aquifère ;
5. Estimer la pérennité de la ressource en eau souterraine selon son taux de renouvellement naturel et en fonction des prélèvements anthropiques ;
6. Déterminer la vulnérabilité de l'eau souterraine aux activités humaines.

1.2 Équipe de réalisation et partenaires

1.2.1 Équipe de réalisation

L'équipe de réalisation du projet à l'UQAM était composée de professeurs, d'agents de recherche, d'étudiants de maîtrise et de stagiaires de premier cycle (**Tableau 1**). Marie Larocque, professeure au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM et ingénieure spécialisée sur l'eau souterraine, était responsable du projet. Trois agents de recherche ont été impliqués dans le projet entre 2018 et 2022, Sylvain Gagné, Alice Morard et Marjolaine Roux. Les Pr Daniele Pinti et David Widory, également du département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'UQAM, ont collaboré au projet et ont supervisé des étudiants de maîtrise qui ont réalisé des projets spécifiques. Le PACES-LAULM est le quatrième projet PACES réalisé par l'équipe de l'UQAM.

Cinq projets spécifiques ont été réalisés par des étudiants de maîtrise (voir **ANNEXES J à N**). Le projet de Samuel Bolduc porte sur la datation de l'eau souterraine utilisée par les municipalités de la région. Jonathan Chabot-Grégoire a estimé la recharge spatialement distribuée sur tout le territoire. Frédérique Dubois a étudié l'apport d'eau souterraine et l'eau de surface dans le maintien des débits d'étiage des portions amont des cours d'eau. Rachel Laplante a cartographié la connectivité des milieux humides à l'eau souterraine et à l'eau de surface et Fanny Pithon a établi le portrait de la qualité de l'eau souterraine à l'échelle régionale et développé un indice d'impact anthropique sur l'eau souterraine.

Lors des travaux de terrain réalisés entre 2018 et 2021, plusieurs étudiants au baccalauréat en Science de la Terre de l'UQAM se sont joints à l'équipe de recherche : Mathieu Bourassa (UQAM), Julien Chéné (UQAM) et Claire Choisy (École National Supérieur de Géologie de Nancy, France).

Tableau 1 : Équipe de réalisation du PACES Laurentides et la MRC les Moulins à l'UQAM

Noms	Rôle
Marie Larocque	Responsable du projet ; spécialiste en hydrogéologie et professeure UQAM
Daniele Pinti	Spécialiste des temps de séjour de l'eau souterraine et professeur UQAM
David Widory	Géochimiste-isotopiste et professeur UQAM
Sylvain Gagné	Agent de recherche UQAM
Alice Morard	Agente de support à la recherche UQAM
Marjolaine Roux	Agente de recherche UQAM
Samuel Bolduc Jonathan Chabot-Grégoire Frédérique Dubois Rachel Laplante Fanny Pithon	Temps de résidence de l'eau souterraine (SB), recharge (JCG), ²²² Rn et interactions nappe-rivière (FD), milieux humides (RL) et hydrogéochimie (FP) ; Étudiants et étudiantes à la MSc en sciences de la Terre (SB, JCG, FD, RL) et à la MSc science de l'environnement (FP)
Samuel Bolduc, Mathieu Bourassa, Jonathan Chabot-Grégoire, Julien Chéné, Claire Choisy, Frédérique Dubois	Support aux activités de terrain et d'analyse des résultats, étudiants de 1 ^{er} cycle en sciences de la Terre et de l'atmosphère (UQAM), et stagiaire international (ENSG – Nancy)

1.2.2 Partenaires

Les partenaires du projet (**Tableau 2**) sont les quatre OBV dont le territoire couvre une partie de la zone d'étude, soit l'organisme de bassin versant de la rivière de Nord (Abrinord), le Comité du bassin versant de la rivière du Lièvre (COBALI), l'organisme de bassins versants des rivières Rouge, Petite Nation et Saumon (RPNS), le Conseil des bassins versants des Mille-Îles (COBAMIL) et les six MRC incluses dans la zone d'étude. Au cours de l'été 2019, plusieurs intervenants des OBV se sont impliqués dans l'échantillonnage de l'eau souterraine et ont travaillé en équipe avec l'étudiante à la maîtrise Fanny Pithon et les stagiaires du 1^{er} cycle de l'UQAM.

Trois ateliers de transferts des connaissances ont été organisés par le RQES avec les personnes responsables de la région : 1) *Découvrir notre PACES et le lier aux enjeux de notre territoire* (octobre 2018), 2) *Comprendre les données du PACES* (novembre 2020) et 3) *Comprendre le fonctionnement hydrogéologique de notre territoire* (novembre 2021). Un quatrième atelier sera organisé par le RQES au printemps 2022. Quatre rencontres du comité de suivi du projet ont permis de présenter les objectifs du projet, de planifier les travaux de terrain et de discuter des résultats.

Tableau 2 : Partenaires régionaux du projet PACES Laurentides et la MRC les Moulins

Organisme	Représentant au comité de suivi
Abrinord	Marie-Claude Bonneville
COBALI	Janie Larivière
OBV RPNS	Geneviève Gallerand
COBAMIL	Raphaël Goulet
MRC d'Antoine-Labelle	Jocelyn Campeau
MRC d'Argenteuil	Stéphanie Morin
MRC de La Rivière-du-Nord	Josée Yelle
MRC des Laurentides	Pierre Morin
MRC des Pays-d'en-Haut	André Boisvert
MRC Les Moulins	Amandine Parmentier

1.3 Organisation du rapport

Ce rapport présente tous les résultats obtenus au cours du PACES-LAULM. Afin de décrire chacune des phases du projet et tous les résultats obtenus, le rapport est divisé en sept chapitres. Le chapitre 2 décrit le territoire à l'étude. Le chapitre 3 résume l'acquisition des données et les travaux de caractérisation. Les contextes géologiques et hydrogéologiques régionaux font l'objet du chapitre 4. Le chapitre 5 s'attarde aux conditions hydrogéologiques sur la zone d'étude. Un bilan de la ressource en eau souterraine dans la région, en termes de quantité, de qualité et de risques est présenté au chapitre 6. Les recommandations découlant du projet font l'objet du chapitre 7 et la conclusion est présentée au chapitre 8. Les annexes présentent des informations complémentaires en lien avec les méthodes utilisées et les données acquises. Des informations sommaires sur les projets de maîtrise réalisés sont également incluses aux **ANNEXES J, K, L, M et N**.

2 PRÉSENTATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

2.1 Localisation

La zone d'étude représente 60 % de la région administrative des Laurentides et inclut le territoire couvert par le projet AFSOQ (Savard et al., 2013). Le territoire du PACES-LAULM inclut également une petite superficie de Lanaudière où se trouve la MRC les Moulins. La zone d'étude couvre une superficie totale de 11 477 km², incluant les 1 027 km² du projet AFSOQ. Elle comprend une large partie des bassins versants des rivières du Lièvre, du Nord, Rouge, Mascouche, Petite-Nation, du Chêne et partiellement ceux des rivières Saumon, Blanche, Assomption et Gatineau, ainsi que plusieurs petits bassins versants connexes situés près du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des Outaouais. L'inclusion de ces bassins versants connexes permet d'assurer la continuité hydraulique des écoulements souterrains de l'amont vers l'aval. Certains bassins versants ne sont pas inclus entièrement en raison du découpage administratif de la zone d'étude (**Figure 1**).

La zone d'étude touche les territoires des municipalités régionales de comté (MRC) d'Argenteuil, de la Rivière-du-Nord, des Laurentides, les Moulins, des Pays-d'en-Haut et d'Antoine-Labelle (**Tableau 3**). Les MRC sont toutes situées dans la région des Laurentides, à l'exception de la MRC les Moulins qui se trouve dans la région de Lanaudière. La population totale de la zone d'étude est estimée à 788 085 habitants, dont 324 074 habitants (MAMH, 2020) dans les MRC situées dans le secteur AFSOQ.

Tableau 3 : MRC, superficies et populations sur le territoire étudié

MRC	Population 2020 (habitants)	Superficie totale (km ²)	Superficie dans le secteur visé (km ²)
d'Argenteuil	33 291	1 233	964
de la Rivière-du-Nord	136 393	448	374
des Laurentides	47 801	2 386	2 386
les Moulins	167 130	266	229
des Pays-d'en-Haut	43 850	674	674
d'Antoine-Labelle	35 551	14 796	5 747
TOTAL	464 011	19 803	10 450
Doncaster (Mohawks)**	0*	76	76

* Il n'y a aucun résident dans le secteur de Doncaster qui est un territoire de chasse pour la communauté Mohawk

** Hors-MRC (territoire autochtone)

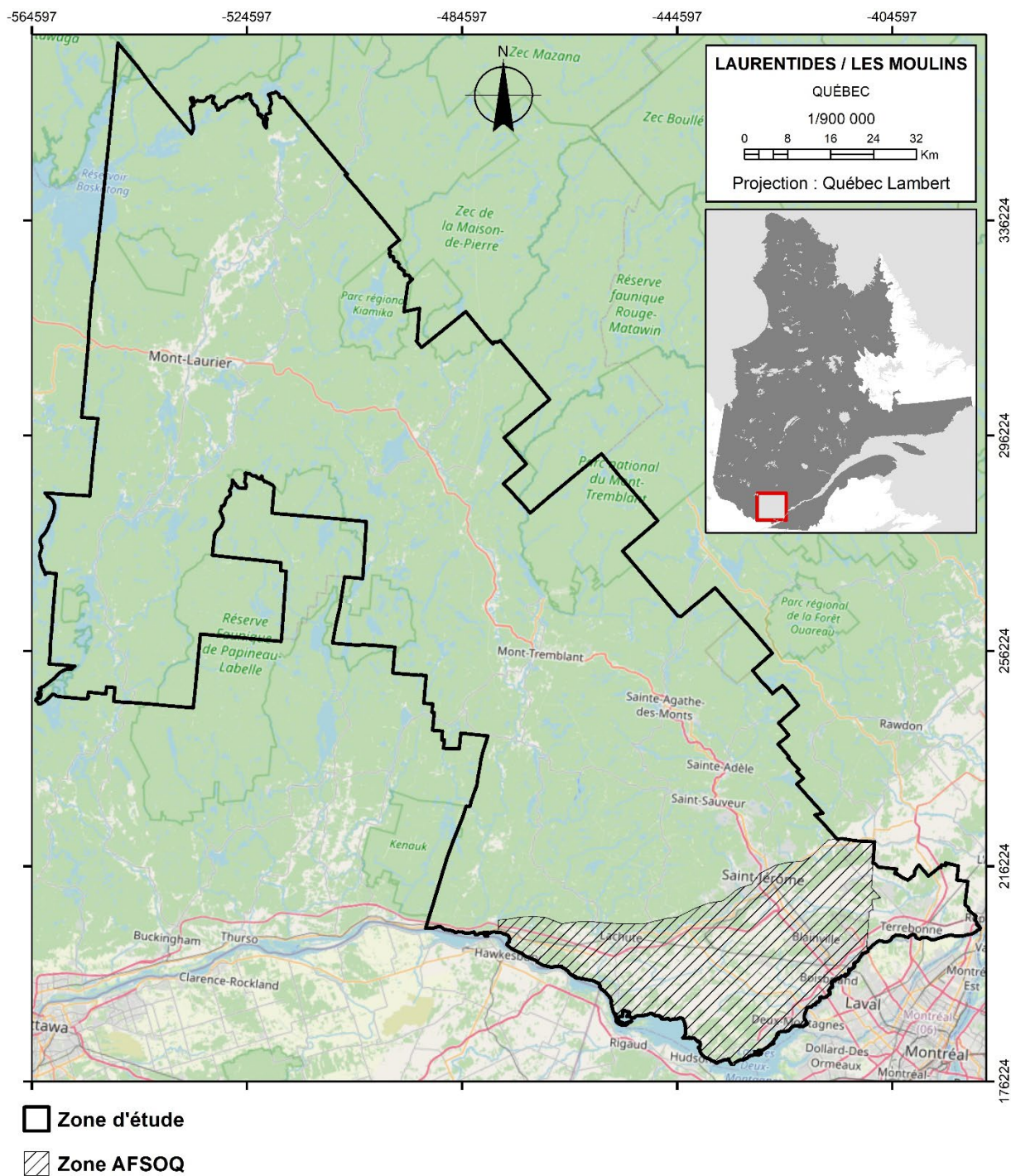


Figure 1 : Localisation du site d'étude

2.2 Milieu naturel

2.2.1 Topographie et modèle numérique altimétrique

La représentation de la topographie a été rendue possible avec le modèle numérique de terrain (MNT) fourni par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (**Figure 2**). La zone étudiée présente deux sections distinctes, au Sud les Basses-Terres du Saint-Laurent caractérisées par une topographie plane et au nord le Bouclier canadien caractérisé par une alternance de sommets et de vallées. Dans la Basses-Terres, l'altitude de la plaine varie de 20 m en bordure des rivières des Outaouais et des Mille-Îles à environ 150 m dans la région de Saint-Jérôme, Saint-Colomban et Brownsburg-Chatham, où débute le Bouclier canadien. La topographie s'élève ensuite vers le nord. Dans la portion centrale à l'est de la zone d'étude, le Mont-Tremblant est le sommet le plus élevé avec une altitude de 930 m.

2.2.2 Pente du sol

La pente du sol varie de 0° à 85° avec une moyenne de 4,3° (**Figure 3**). Les pentes faibles sont situées dans la région des Basses-Laurentides et dans la MRC Les Moulins. Les zones ayant les pentes les plus fortes sont situées au centre de la zone d'étude et également dans la partie basse du bassin versant de la rivière du Lièvre entre Notre-Dame-de-Pontmain et Notre Dame-du-Laus. Dans la partie nord de la zone d'étude, les pentes sont généralement plus faibles, notamment dans la zone amont de la rivière du Lièvre où la vallée est large et peu encaissée dans le relief du Bouclier canadien.

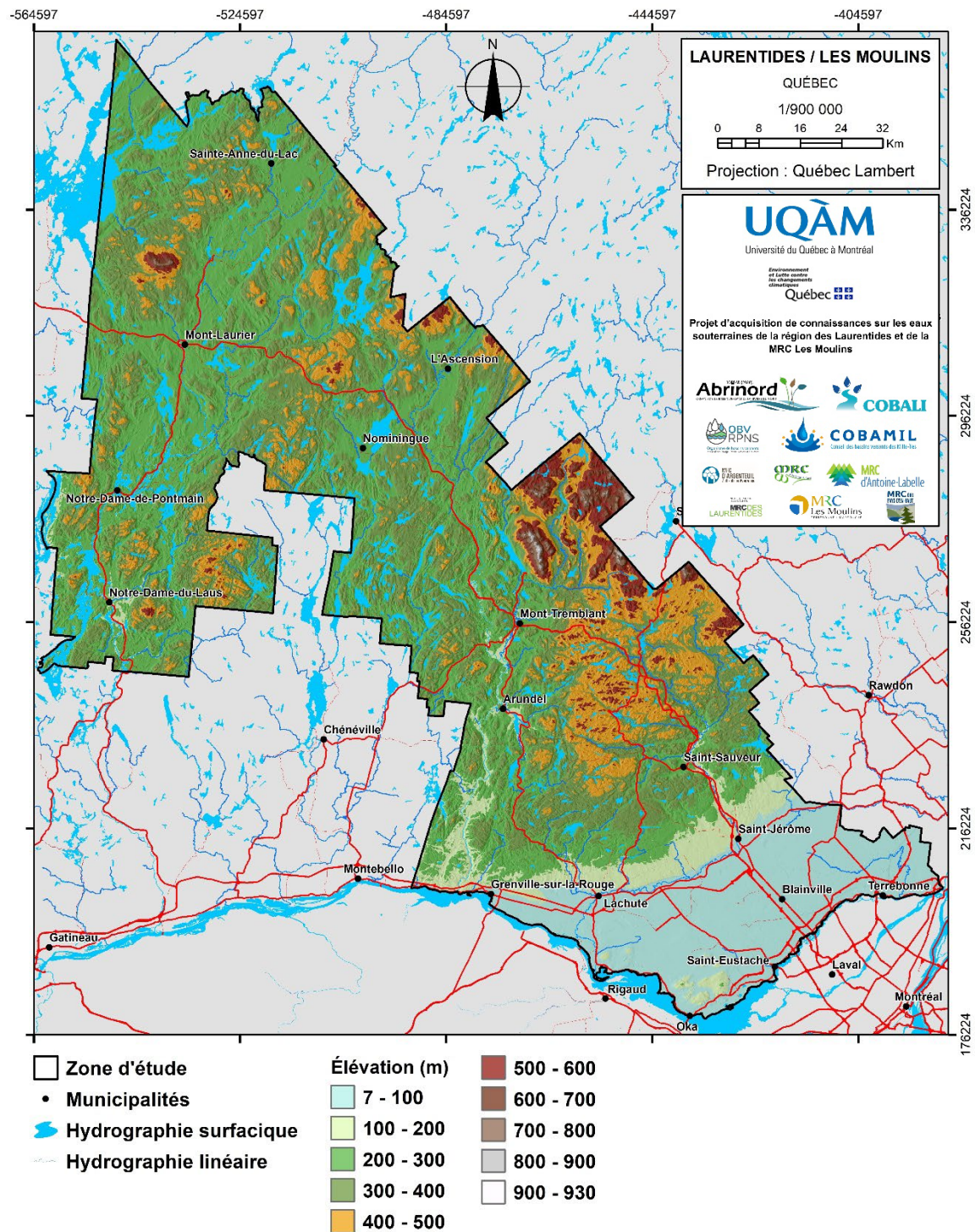


Figure 2 : Topographie de la surface du sol

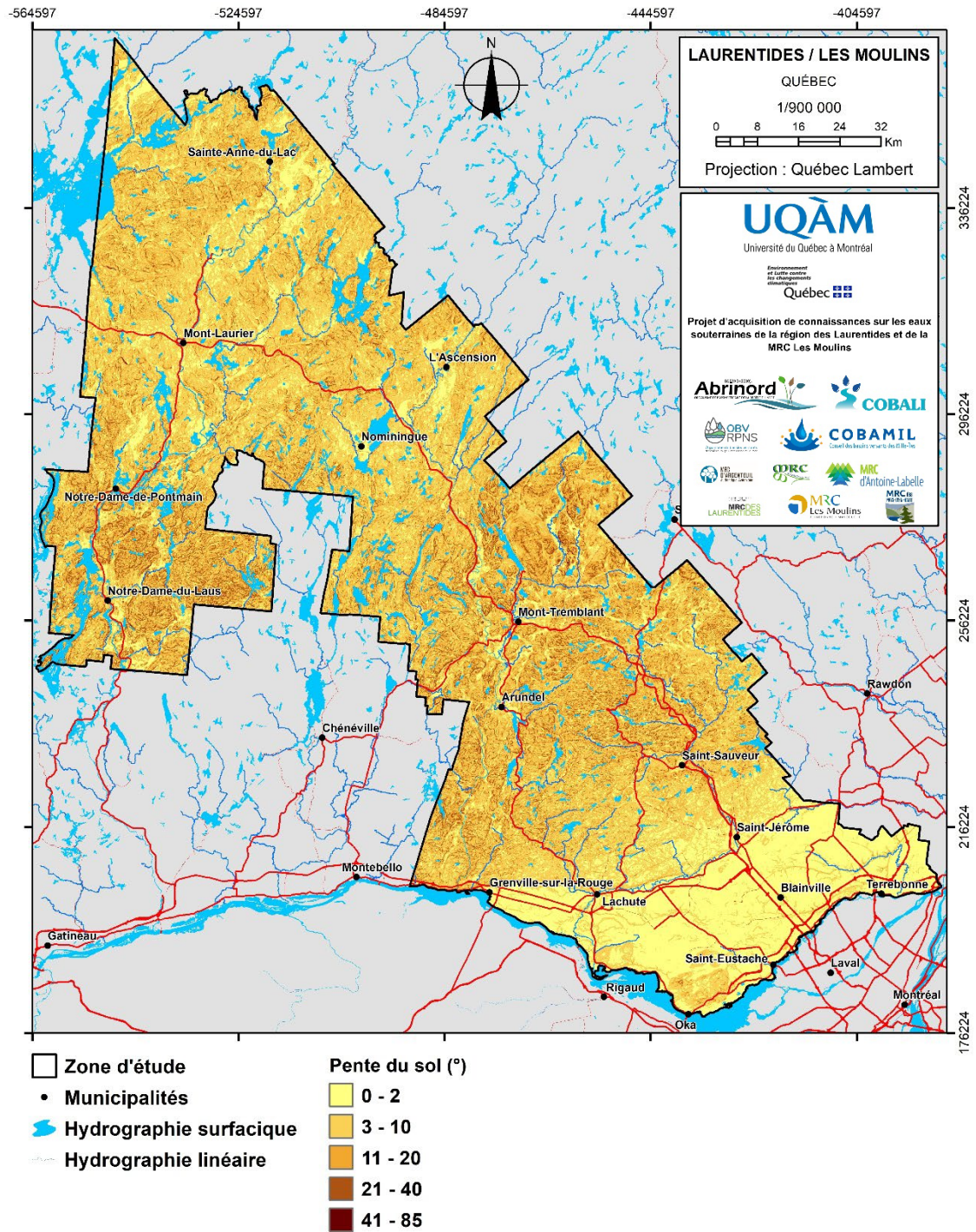


Figure 3 : Pente de la surface du sol

2.2.3 Hydrographie et limites des bassins

Les principaux bassins versants et leurs rivières s'écoulent du nord vers le sud de la zone d'étude (Erreur ! Source du renvoi introuvable. et **Figure 4**). Ensemble, les bassins des rivières du Lièvre et Rouge occupent plus de la moitié de la zone d'étude, respectivement 3 630 km² et 3 512 km². Les principaux affluents des rivières du Lièvre sont les rivières Kiamika (1093 km²), du Sourd (292 km²) et les ruisseaux Serpent (263 km²), Tapani (228 km²) et Cirque Pearson (117 km²). Les affluents de la rivière Rouge sont les rivières du Diable (815 km²), Maskinongé (499 km²), Beaven (463 km²), Saguay (426 km²) et Macaza (244 km²). Les deux autres bassins versants d'importance sur la zone d'étude sont ceux de la rivière du Nord (2 212 km²) et de la rivière Gatineau (1 148 km²). La rivière du Nord débute entre les municipalités de Saint-Donat et Lantier, tandis que la rivière Gatineau prend source dans le lac du Pain de Sucre, à 130 km au nord de l'extrémité de la zone d'étude. Les affluents associés à la rivière du Nord sont les rivières de l'Ouest (373 km²), Doncaster (215 km²) et Simon (189 km²) tandis que ceux de Gatineau, Saint-Joseph (118 km²) et d'Argent (36 km²). Dans la partie aval de la zone d'étude qui est adjacente à la rivière des Outaouais et à la rivière des Mille-Îles se trouvent les bassins versants des rivières du Chêne (213 km²) et Mascouche (362 km²), en plus de 34 petits cours d'eau (422 km²) formant les bassins versants résiduels dont la superficie de chacun ne dépasse pas 80 km². Tous ces bassins versants se déversent directement dans la rivière des Outaouais. Quatre réservoirs hydroélectriques se retrouvent dans la zone d'étude. Trois réservoirs sont situés sur la rivière du Lièvre. Le lac Poisson Blanc et le réservoir aux Sables sont retenus par le barrage des Rapides des Cèdres situé à Notre-Dame-du-Laus et le réservoir l'Escalier situé plus en aval. Le réservoir du lac Kiamika, situé au nord de la municipalité de Lac Saguay, est retenu par le barrage Kiamika. Une partie du grand réservoir Baskatong se retrouve dans la portion nord-ouest de la zone d'étude. On retrouve plus de 21 000 lacs répartis de manière uniforme sur la zone d'étude (sauf dans les Basses-Terres où ils sont peu nombreux). Les cours d'eau temporaires représentent environ la moitié de tous les tronçons de cours d'eau linéaires répertoriés dans le GRHQ.

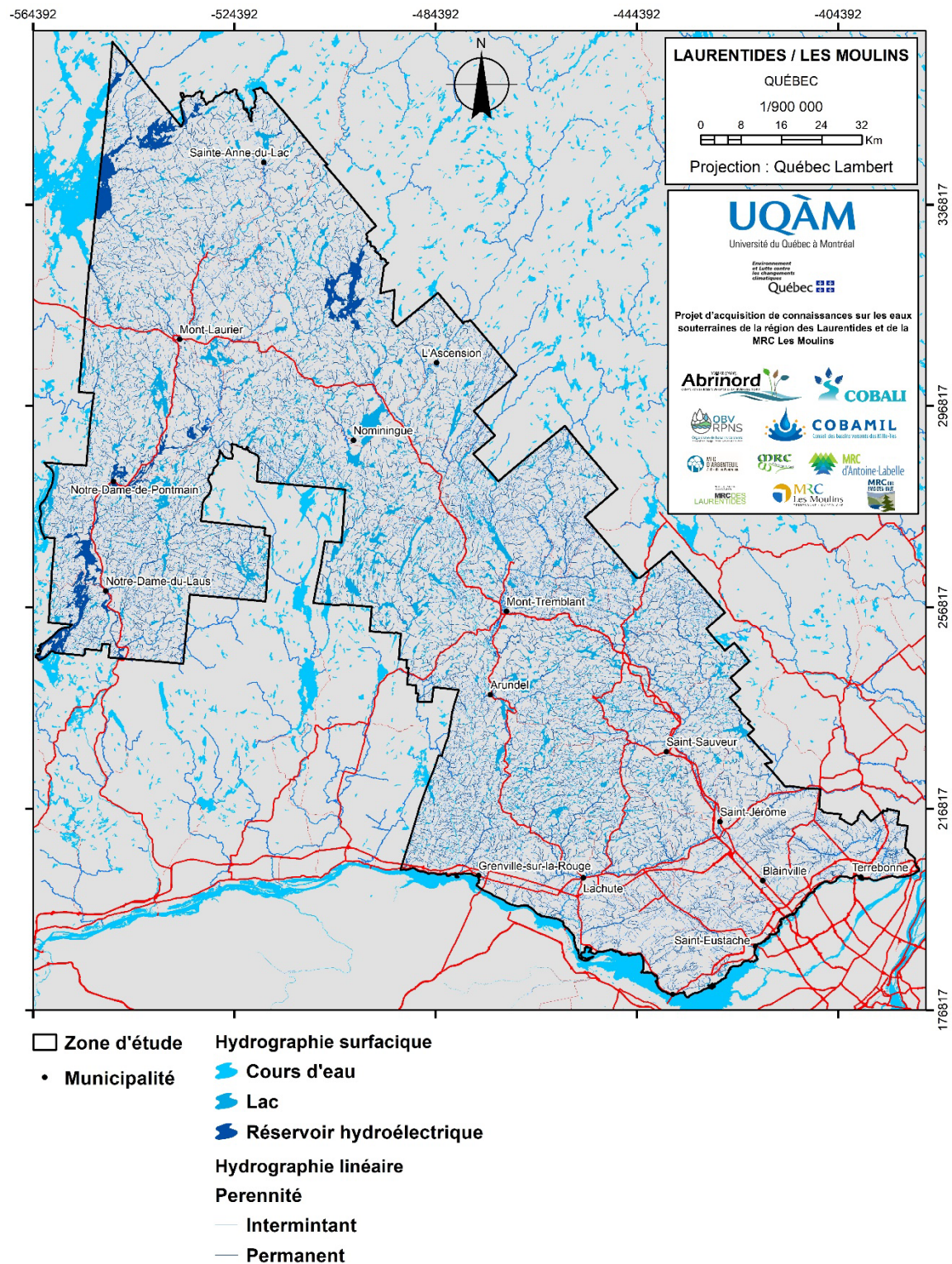


Figure 4 : Hydrographie (GRHQ, 2019)



2.2.4 Couverture végétale

Deux couches d'informations complémentaires ont été utilisées pour décrire la couverture végétale sur la zone d'étude. La première est une carte de couverture forestière (Figure 6) créée à partir des cartes du 5e programme d'inventaire du Système d'information écoforestière (SIEF, 2018) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). La seconde est une carte de la couverture agricole (Figure 7) réalisée à l'aide de la Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BPPAD, 2020).

Les données de couverture forestière indiquent que 9468 km² (85 %) du territoire est couvert par des terrains boisés. Ce pourcentage est similaire à celui défini à partir de la carte d'utilisation du sol. La couverture par les feuillus est majoritaire à 55 % et les résineux représentent 7 % du territoire (**Figure 8**), et sont situés principalement sur les sommets les plus élevés le long de la limite est de la zone d'étude. La forêt mixte représente 38 % du couvert végétal. Parmi les espèces de feuillus, les érables, les bouleaux et peupliers représentent respectivement 46, 17 et 7 % des espèces rencontrées. Les résineux les plus abondants sont les sapins (8 %).

Les types de cultures sont compilés à partir des déclarations des producteurs à la Financière agricole (BDPPAD, 2020) et 10 % de ces déclarations sont validées sur le terrain. Les parcelles agricoles en exploitation recouvrent 5,8 % du territoire à l'étude en 2020. Le pourcentage calculé à partir des données de la BDPPAD est différent de celui de la carte d'utilisation du sol (8 %), probablement car les données de la BDPPAD réfèrent aux parcelles en exploitation, tandis que le SIEF répertorie tous les terrains agricoles même s'ils sont en friche. Les parcelles agricoles se trouvent principalement dans la zone aval au niveau des Basses-Terres du Saint-Laurent, au sud des municipalités de Brownsburg, Saint-Jérôme et Sainte-Sophie. Les parcelles agricoles présentes dans la section du Bouclier canadien sont principalement situées dans les vallées des rivières du Lièvre et Rouge. En 2020, le soya représentait 16 % des cultures, le maïs représentait 13 % des cultures et le foin couvrait 15 % des parcelles agricoles actives (**Figure 9**). Les cultures maraîchères et de petits fruits couvraient 1 % du territoire cultivé. Entre 2011 et 2020, la superficie attribuée au foin a diminué de 631 km² et celle du maïs de 234 km² tandis que celle utilisée pour la culture du soya a diminué de seulement 30 km².

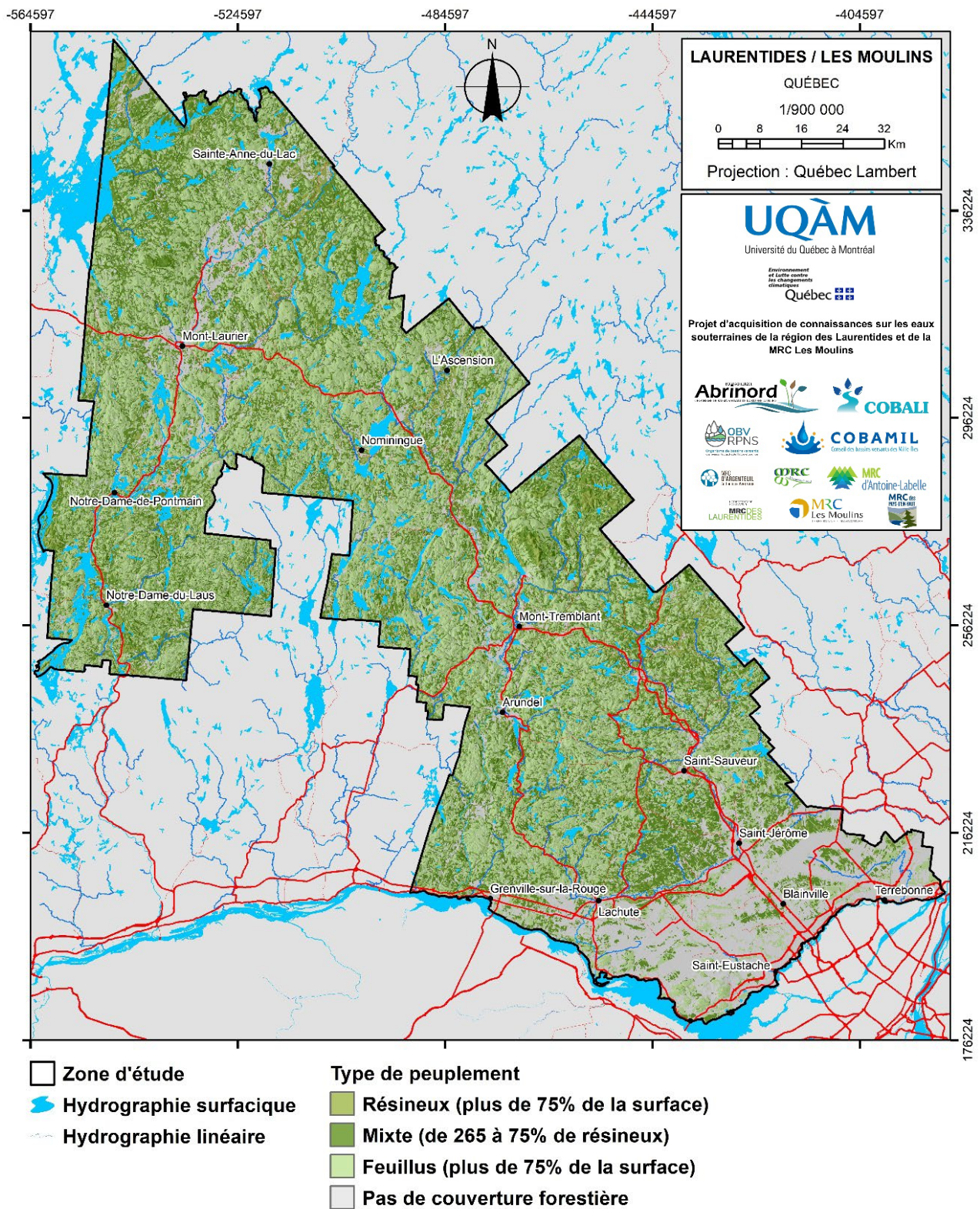
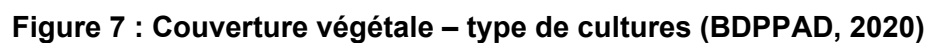


Figure 6 : Couverture végétale – types de peuplements forestiers (SIEF, 2018)



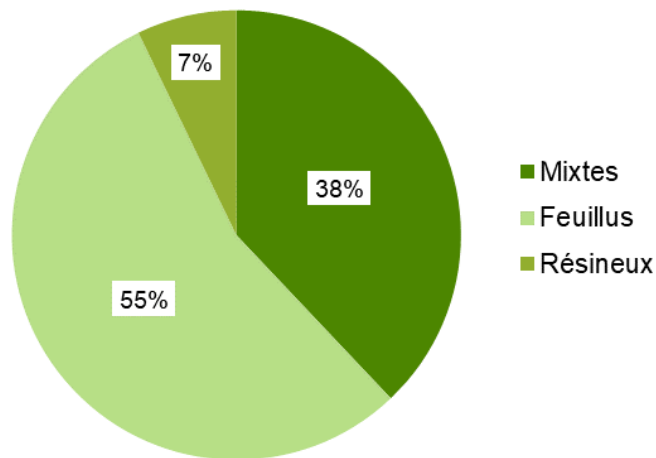


Figure 8 : Superficie relative de la couverture forestière (SIEF, 2018)

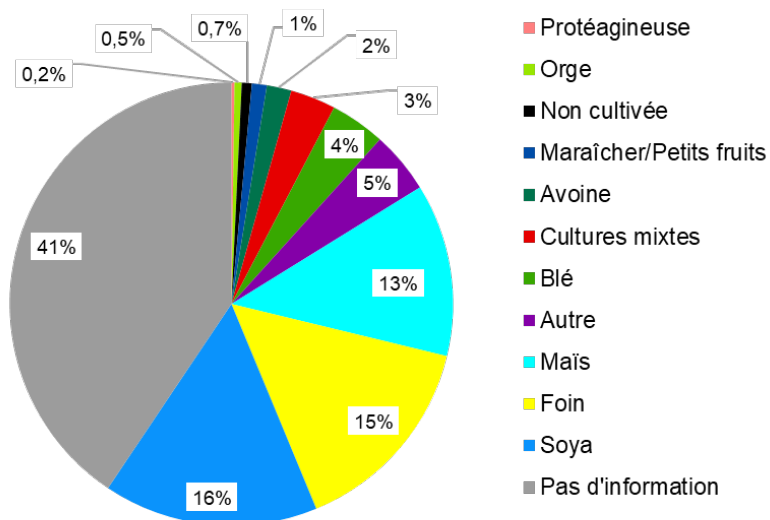


Figure 9 : Superficies relatives des types de cultures (BPPAD, 2020)

2.2.5 Milieux humides

Canards illimités Canada (CIC) et le Ministère du Développement durable et des Changements climatiques (MDDELCC) ont réalisé la cartographie détaillée des milieux humides dans la portion Sud du territoire, soit entre la rivière des Mille-Îles et la limite sud de la MRC d'Antoine-Labelle (CIC et MDDELCC, 2016), dans la MRC d'Antoine-Labelle, seule une cartographie des milieux humides potentiels est disponible (MELCC, 2019b). Afin d'homogénéiser les deux sources de données, les classes des milieux humides détaillés ont été regroupées pour correspondre à celles des milieux humides potentiels. La classe « marécage » regroupe ainsi les marécages arborescent et arbustif, et la classe « tourbière boisée » regroupe les tourbières boisées indifférenciées, tourbières boisées minérotrophes et tourbières boisées ombrotrophes. Les milieux humides occupent 1243 km², soit 11 % du territoire étudié. Les tourbières boisées (29 %) et les marécages (24 %) sont les milieux humides les plus fréquemment rencontrés, suivis des tourbières minérotrophes (16 %), des eaux peu profondes (14 %) et des tourbières ombrotrophes (11 %). Les milieux humides non spécifiés (3 %), les marais (2 %) et les prairies humides (1 %) représentent une faible proportion de tous les milieux humides (**Figure 10**Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

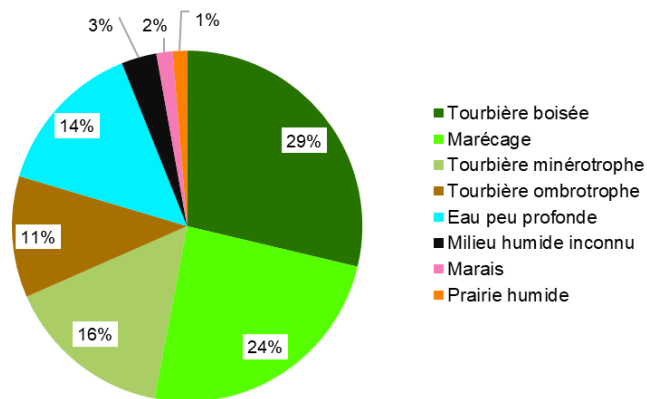


Figure 10 : Répartition relative des milieux humides (CIC, 2016; MELCC, 2019b)

La distribution spatiale des milieux humides sur le territoire n'est pas homogène en raison de la différence entre les sources de données utilisées pour la carte (**Figure 11**). Deux grands complexes tourbeux se trouvent dans la MRC d'Antoine-Labelle, soit la tourbière Notawissi à Ferme-Neuve et la tourbière Décarie sur la limite des municipalités Saint-Anne-du-Lac et Mont-Saint-Michel. Les milieux humides des Basses-Terres sont principalement des marécages. Ils se retrouvent surtout dans les secteurs de Grenville-sur-la-Rouge et de Blainville.

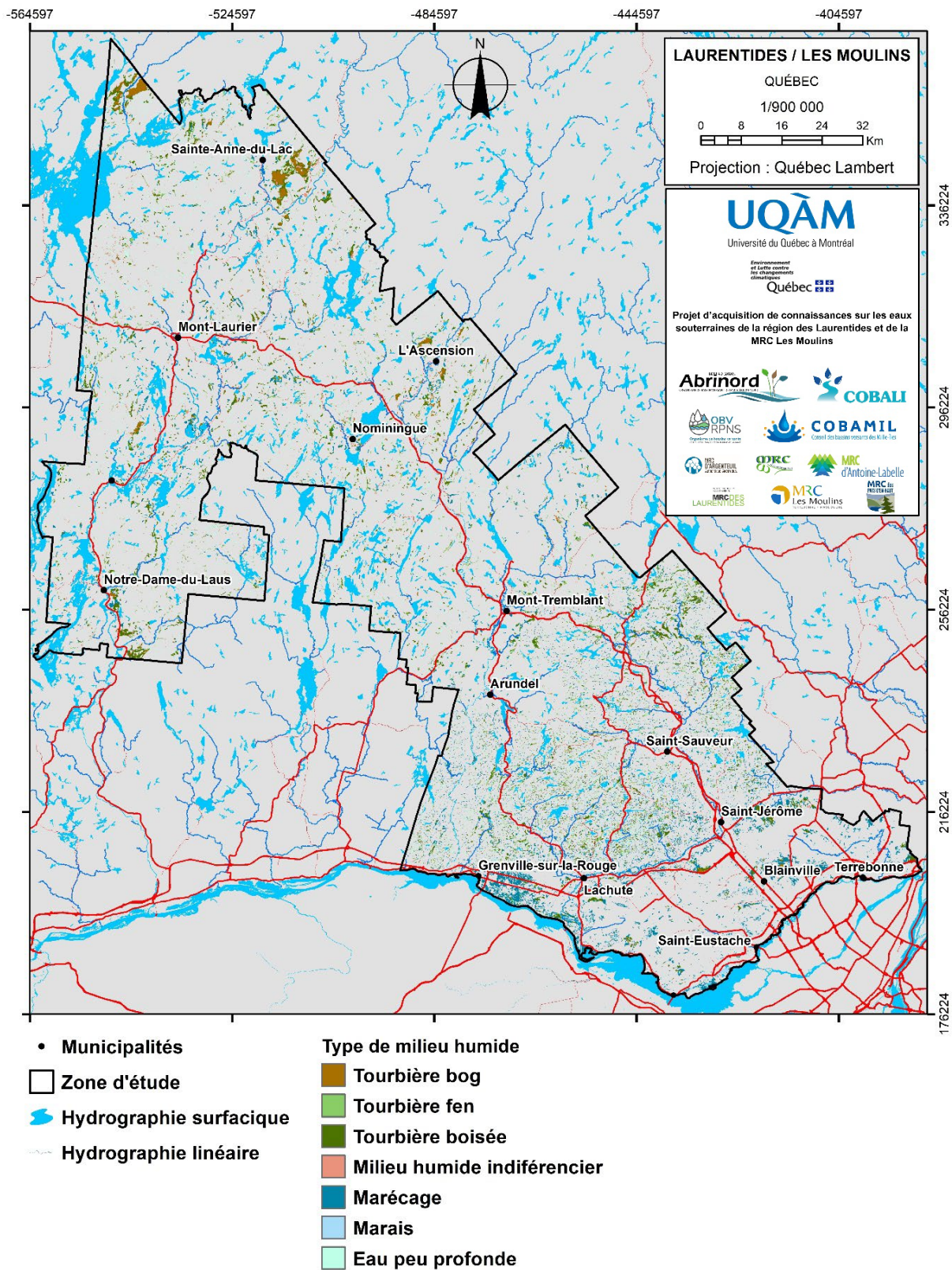


Figure 11 : Milieux humides (CIC 2016 ; MELCC 2019b)

2.2.6 Pédologie

Les données pédologiques (IRDA, 2018a ; 2018b) disponibles ne couvrent pas la totalité du territoire du PACES-LAULM. Les données pédologiques ont donc été combinées aux données du SIEF (2018). Afin de créer une classification homogène, les types de sols ont été classés selon la classe de drainage. Cette catégorisation était présente dans les deux sources de données et elle est aussi beaucoup plus utile en hydrogéologie. Sur la zone d'étude, 80 % des sols sont de type « modérément bien drainé » et « bien drainé » (**Figure 12**). La zone d'étude présente deux régions pédologiques distinctes (**Figure 13**). Les sols situés sur la province géologique du Grenville et ceux formés sur la plateforme sédimentaire du Saint-Laurent. La délimitation est visible sur l'axe est-ouest, de Grenville-sur-la-Rouge jusqu'à Sainte-Sophie. Plus au nord les sols sont très rapidement drainés à modérément bien drainés, en raison de l'altération des dépôts glaciaires principalement composés de till. Dans cette zone, les sols mal drainés sont majoritairement des milieux humides. Dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, la présence d'argile fait en sorte que les sols imparfaitement drainés dominent, mais des sols bien drainés sont aussi rencontrés aux endroits où le sable recouvre l'argile.

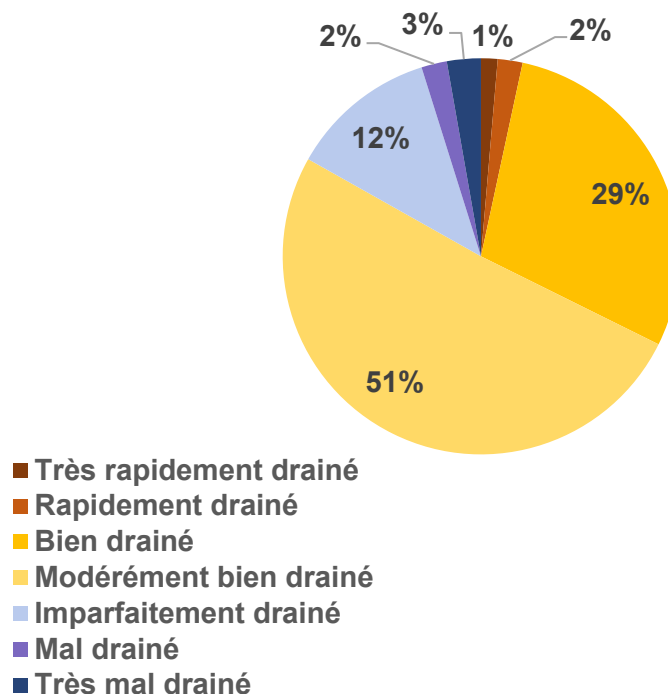


Figure 12 : Proportion des types de drainage sur la zone d'étude (IRDA, 2018a ; 2018b ; SIEF, 2018)

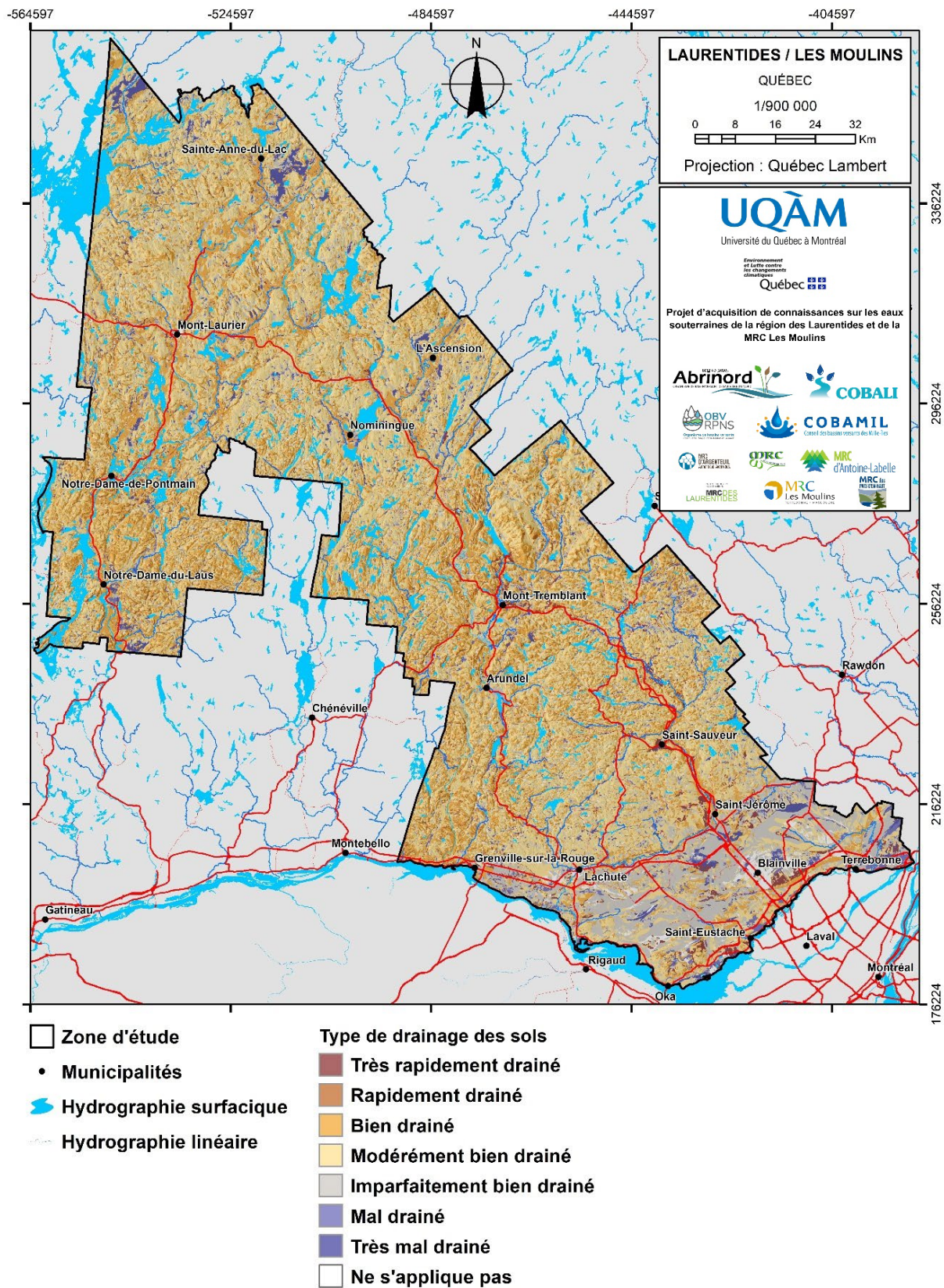


Figure 13 : Pédologie (IRDA, 2018a ; 2018b ; SIEF, 2018)

2.3 Réseau de surveillance et programme de suivi

Plusieurs stations météorologiques (18 actives), hydrométriques (10 stations de débit actives) et piézométriques (16 stations actives) sont situées dans le secteur d'étude (cf. **Figure 15** plus loin).

2.3.1 Données météorologiques

Sur la zone d'étude, il y a 47 stations météorologiques et 29 autres stations sont disponibles en périphérie. Les données météorologiques ont été fournies par Climat Québec (2019). Seulement 18 stations sont actives et 13 ont des données depuis plus de 20 ans (**Tableau 4**).

Tableau 4 : Stations météorologiques actives en 2019

Numéro	Nom	Altitude (m)	Durée (années)
7015730	Oka	114	82
7016470	Rigaud	46	61
7016906	Saint-Benoît	52	47
7017698	Saint-Roch-de-l'Achigan	57	12
7021450	Laval - Chomedey	46	9
7025237	Montréal (Autoroute-25)	10	9
7026612	Rivière-des-Prairies	13	47
7030310	Arundel	191	56
7030M51	Barrage des Rapides-des-Cèdres	202	89
7032362	Saint-Faustin-Lac-Carré	411	30
70323G0	Ferme-Neuve-2	225	13
703363B	Lac-du-Cerf	220	13
7033650	Lachute	83	61
7033939	La Macaza	236	52
7035334	Mont-St-Michel	260	28
7036855	Sainte-Anne-du-Lac	259	82
7037310	Saint-Hippolyte	366	58
7037400	Saint-Jérôme	166	87

Pour les analyses hydrologique et hydrogéologique de ce rapport, les données de températures et de précipitations interpolées de 1961 à 2017 sont disponibles sur un maillage de 0,1° (Bergeron, 2016). La répartition spatiale des températures indique qu'il existe un gradient sud-nord d'environ 6°C entre les Basses-Terres et le nord de la zone d'étude (**Figure 16**). La partie centrale de la zone d'étude, où la topographie est la plus élevée, est aussi celle qui reçoit le plus de précipitations (~1100 mm/an) (**Figure 17**), tandis que les précipitations sont en moyenne plus faibles dans la vallée de la rivière du Lièvre (900 à 1000 mm/an).

2.3.2 Données hydrométriques

Les données hydrométriques disponibles proviennent de la Direction de l'expertise hydrique du Québec (DEH, 2019). Sur les 63 stations situées sur la zone d'étude et pour lesquelles des données existent, 25 sont actives. Dix d'entre elles fournissent des données de débits tandis que les 15 autres stations enregistrent le niveau d'eau de barrages ou de lacs. L'historique des données remonte jusqu'à 1930 pour la rivière du Nord (88 ans) et la station ayant l'historique le plus court est celle de la rivière du Diable (8 ans) (**Tableau 5**). Les débits journaliers moyens varient de 0,8 m³/s (lac Ludger) à 106 m³/s (rivière Rouge). Les équivalents en mm/an du débit total indiquent que ce dernier représente environ 54 % à 79 % des précipitations (moyenne de 1000 mm/an). La **Figure 14** illustre les variations du débit total annuel pour les rivières Rouge, du Nord et du Lièvre pour la période 1980-2020. Le débit de la rivière du Nord est généralement plus élevé que les deux autres ce qui pourrait être lié à la différence de superficie entre les trois bassins versants, mais aussi à l'influence des barrages présents sur les rivières Rouge et du Lièvre. Ces derniers pourraient favoriser une plus forte évaporation.

Tableau 5 : Statistiques des stations hydrométriques actives

Cours d'eau	Station	Q moyen (m ³ /s)	Q min moy. (m ³ /s)	Q max moy. (m ³ /s)	Superficie (km ²)	Q moyen (mm/an)	Nombre d'années analysées
Du Nord	40110	23,9	5,1	188,7	1163	647	88
Du Nord	40122	7,1	1,2	52,4	311	709	47
Doncaster	40129	2,4	0,4	22,1	106	654	42
Du Chêne	46709	3,8	0,3	50	196	544	8
Lac Ludger	40132*	0,8	0,1	7,6	40	639	23
Rouge	40204*	106,0	25,5	546,8	5479	609	53
Saint-Louis	40212	1,0	0,1	13,0	40	785	49
Du Diable	40238	25,6	5,9	148,7	1160	659	8
Du Lièvre	40624*	87,1	30,2	315,5	4560	580	38
Kiamika	40627*	15,9	5,0	31,4	879	571	28

*Station influencée par un barrage

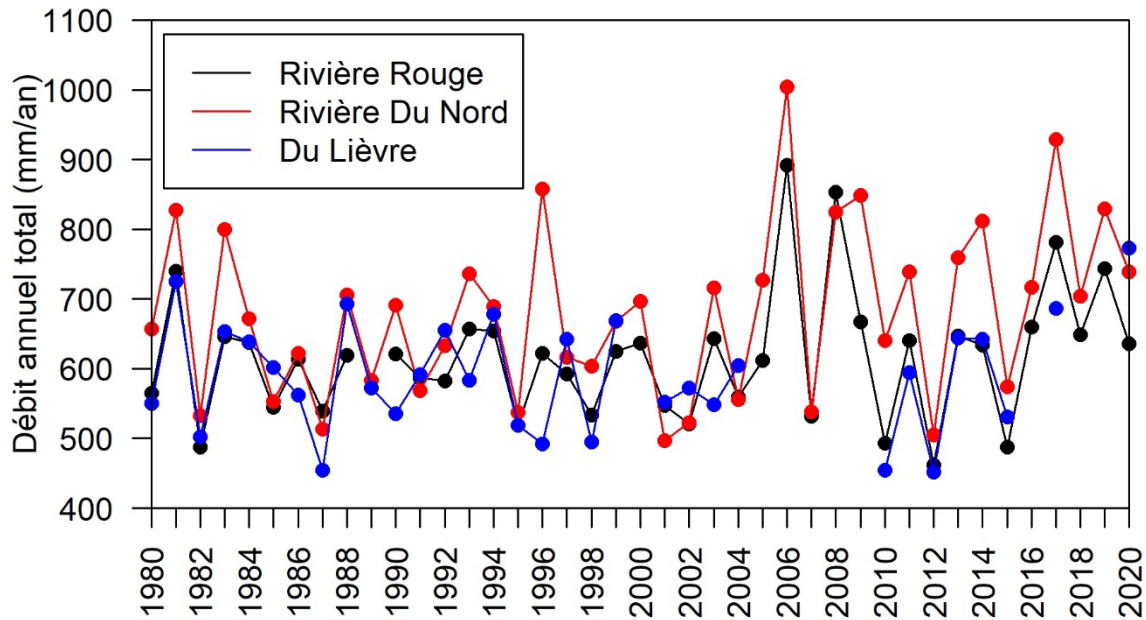


Figure 14 : Débit total annuel pour les rivières Rouge (station 40204), du Nord (station 40110) et du Lièvre (40624)

2.3.3 Données piézométriques

Le Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ), (MELCC, 2021) comporte 16 stations piézométriques sur la zone d'étude (**Tableau 6**). Les puits du RSESQ sont majoritairement présents dans la partie basse de la zone d'étude (zone AFSOQ). Seulement trois puits sont situés dans le Bouclier canadien, ceux de Lac-des-Écorces, Lac Sagouay et Piedmont. Ces trois puits sont installés dans les dépôts meubles et seulement le puits de Lac-des-Écorces est en condition de nappe libre. Dans la partie sud, les puits sont principalement installés dans le roc (calcaire) et on y retrouve des conditions de nappe captive et libre à parts égales. Les puits du secteur de Mirabel ont un historique de mesure qui remonte à 1974, mais ce dernier a été interrompu durant les années 1990 pour reprendre autour de 2005.

Tableau 6 : Détails des puits d'observation du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) présents sur la zone d'étude

Municipalité	Numéro	Type aquifère	Confinement de la nappe	Début des mesures
Piedmont	4010002	Sédiments	Captive	2014
Mirabel	4017011	Roc	Captive	2005
Lachute	4017041	Roc	Semi-captive	2007
Lachute	4017042	Roc	Captive	2007
Lachute	4017051	Roc	Captive	2006
Lac Saguay	4020001	Sédiments	Libre	2014
Lac-des-Écorces	4060001	Sédiments	Captive	2014
Mirabel	4010001	Roc	Semi-captive	2005
Oka	4300014	Sédiments	Libre	2014
Mirabel	4640001	Roc	Libre	2006
Sainte-Anne-des-Plaines	4647001	Roc	Captive	2005
Mirabel	4647011	Roc	Libre	2006
Mirabel	4677031	Roc	Libre	2007
Brownsburg-Chatham	4300001	Roc	Libre	2005
Grenville-sur-la-Rouge	4300015	Roc	Captive	2014
Mascouche	4646001	Roc	Captive	-

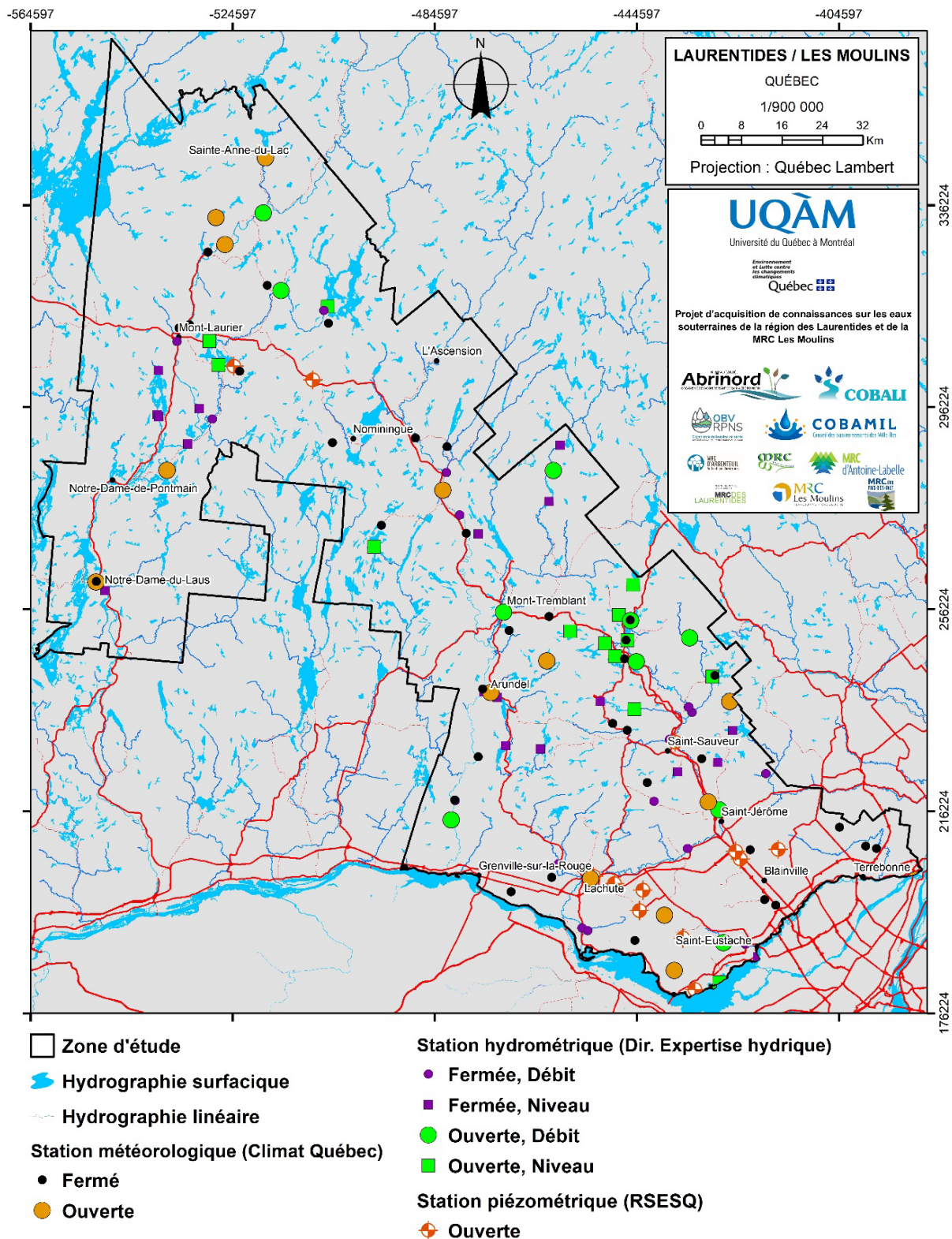


Figure 15 : Réseau de suivi météorologique, hydrologique et piézométrique



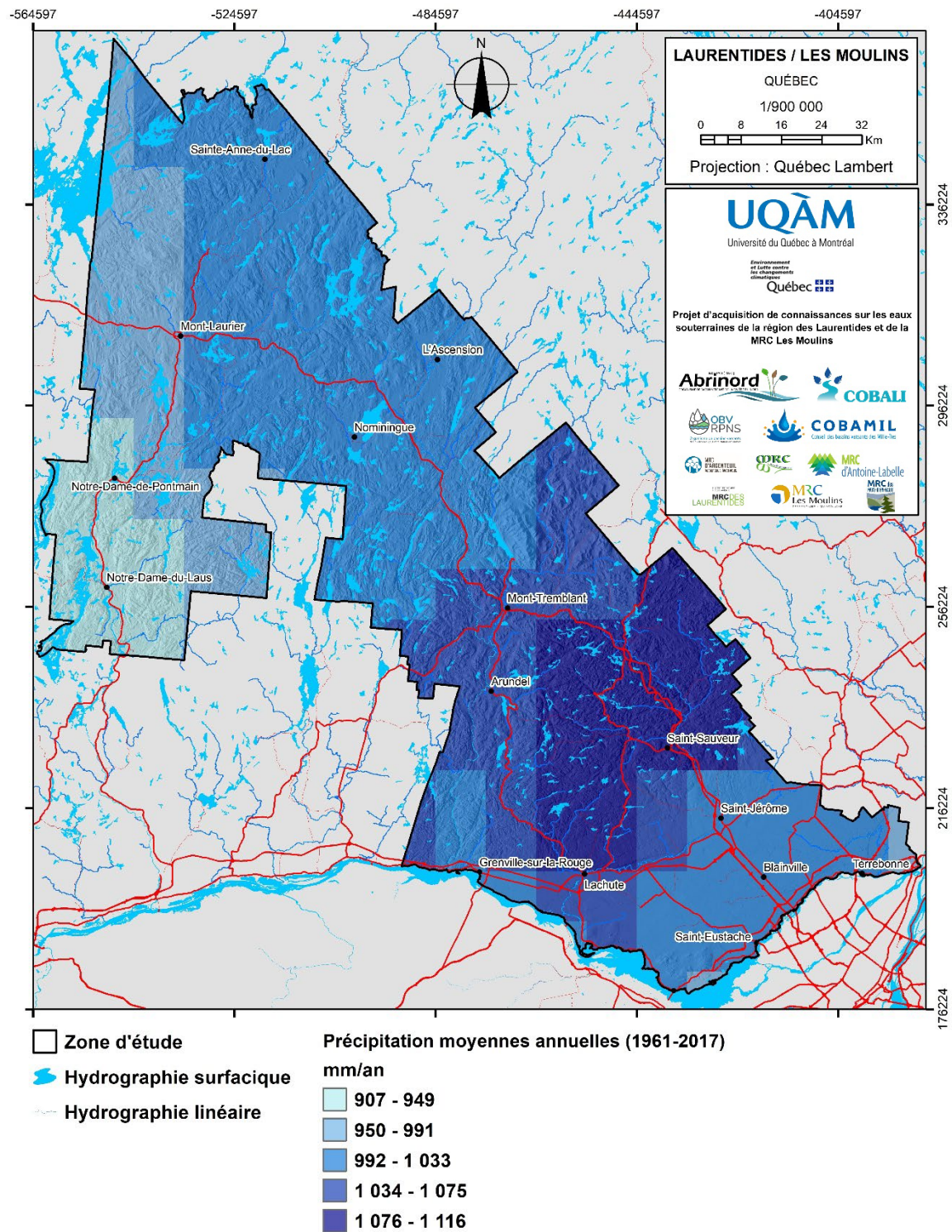


Figure 17 : Distribution spatiale des précipitations annuelles moyennes (1961-2017)

2.4 Population, centres urbains et activités

2.4.1 Limites administratives, axes routiers et municipalités

La zone d'étude recouvre les territoires de 78 municipalités dont 64 se situent en dehors de la zone AFSOQ : 20 sont dans la MRC Les Laurentides, 17 dans la MRC d'Antoine-Labelle, 10 dans la MRC des Pays-d'en-Haut, neuf dans la MRC d'Argenteuil, sept dans la MRC de Thérèse-De Blainville, sept dans la MRC Deux-Montagnes, cinq dans la MRC de la Rivière-du-Nord, deux dans la MRC les Moulins et une dans la MRC Mirabel (**Figure 18**). La zone d'étude recouvre également les territoires de Doncaster et de Kanesatake qui appartiennent à la communauté Mohawk. La portion la plus peuplée du territoire se situe dans le secteur déjà étudié par le projet AFSOQ au sud du territoire. Les municipalités les plus peuplées sont Terrebonne (117 664 habitants), Saint-Jérôme (78 839 habitants), Blainville (60 912 habitants), Mirabel (53 345 habitants) et Mascouche (47 885) (MAMH, 2020).

Les feuillets cartographiques où s'étend la zone d'étude sont 31O04, 31O03, 31J13, 31J14, 31J12, 31J11, 31J10, 31J05, 31J06, 31J07, 31J08, 31J04, 31J03, 31J02, 31J01, 31I04, 31G13, 31G14, 31G15, 31G16, 31H13, 31G10, 31G09, 31H12, 31H111, 31G08 et 31H05. La zone d'étude est parcourue par l'autoroute des Laurentides (15), l'autoroute des Outaouais (50), l'autoroute 25, l'autoroute 640 ainsi qu'une petite section des autoroutes Chomedey (13) et Félix-Leclerc (40). Plusieurs routes régionales (158, 309, 323, 327, 329, 335, 337, 344, 364) et nationales (117, 148, 158) traversent également la région.



2.4.2 Occupation du sol

L'information relative à l'occupation du territoire a été compilée par le MELCC (2019c), à partir des informations provenant entre autres des bases de données de la BDPPAD, MELCC, SIEF, MERN, MFFP et CIC. La couche d'information a été synthétisée en sept catégories : agricole, aquatique, forestier, zone humide, milieu anthropique, coupe et régénération, et sol nu et lande. L'utilisation anthropique du sol, correspondant aux habitations, voies de circulations, mines et carrières, représente 7 % du territoire, et est particulièrement visible le long de la rivière des Mille-Îles et des autoroutes 15 et 117 (**Figure 19**). À l'échelle régionale, les zones urbaines et résidentielles sont observées le long des cours d'eau et autour des lacs. Les milieux humides couvrent 5 % de la zone d'étude et se retrouvent sur l'ensemble du territoire. Deux importants complexes de milieux humides sont localisés au nord du territoire dans les municipalités de Ferme-Neuve, Saint-Anne-du-Lac et Mont-Saint-Michel. Les zones de coupe et régénération représentent 1%. Les sols dénudés et les landes représentent 0,03 % de la zone d'étude.

Les milieux forestiers sont les plus présents dans les Hautes-Laurentides, tandis que dans les Basses-Laurentides et la MRC les Moulins, les zones agricoles sont majoritaires (**Figure 20**). Des zones agricoles se trouvent également dans les vallées de la rivière du Lièvre et de la rivière Rouge. Les zones aquatiques regroupent les rivières et les lacs et sont réparties à travers toute la région. Les lacs importants sont situés au nord-ouest de la municipalité de Mont-Tremblant.

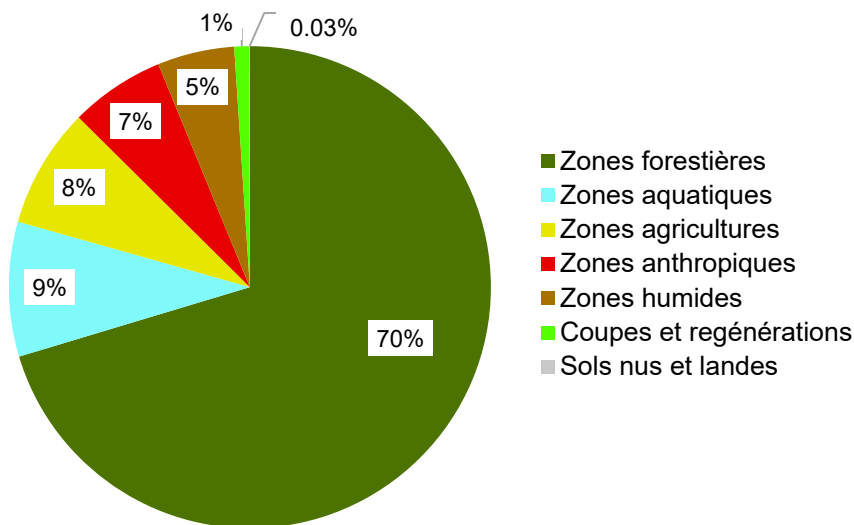


Figure 19 : Pourcentage des différents types d'occupation du sol (MELCC, 2019c)



2.4.3 Affectation du territoire

L'affectation du territoire a été cartographiée à partir des informations relatives aux grandes classes d'affectation du ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (PPAT-MAMH, 2018) (**Figure 22**). Les différences entre ces données et celles d'utilisation du sol ou de couverture végétale pour l'agriculture et la forêt s'expliquent par le fait que la carte du MAMH présente le zonage du territoire, qui ne correspond pas toujours à la réalité sur le terrain. Par exemple, un terrain forestier peut être résidentiel, ou zone agricole sans être pour autant développé.

Les terrains forestiers et résidentiels représentent respectivement 54 et 18 % de la superficie du territoire (**Figure 21**). Les terrains à vocation récréative (11 %) sont particulièrement nombreux dans la MRC Antoine-Labelle et dans la partie nord de la MRC Laurentides (11 %). Seulement 2 % de la zone d'étude est à vocation agroforestière. Les terrains agricoles (8 %) sont majoritairement présents dans les Basses-Laurentides, dans la MRC les Moulins, dans la vallée de la rivière du Lièvre, et le long de la rivière Rouge. Les centres urbains se situent principalement le long de la rivière du Nord. Le sud-est des MRC des Laurentides, des Pays-d'en-Haut, de la Rivière-du-Nord, ainsi que l'est de la MRC d'Argenteuil regroupent la majorité des centres urbains (2 %) et la moitié des terrains à vocation résidentielle. Les terrains en conservation représentent 5 % de la zone d'étude et se trouvent principalement dans la MRC d'Argenteuil. Les terrains publics, à zonage industriel et commercial représentent respectivement 1 %, 0,3 % et 0,1 % de la zone d'étude.

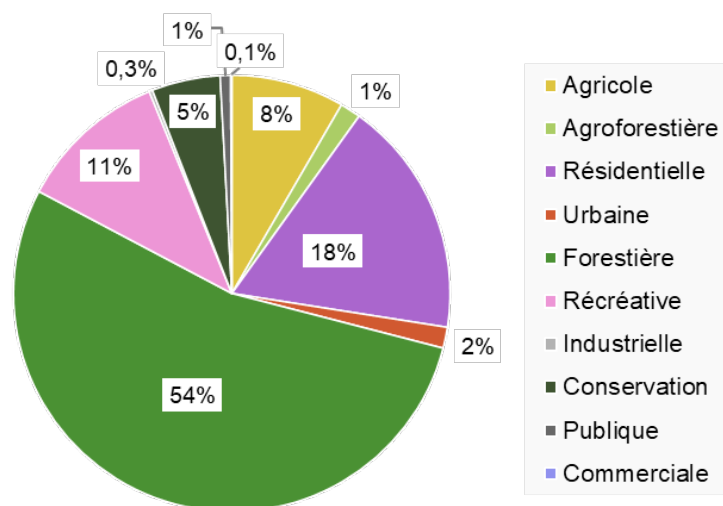


Figure 21 : Pourcentage des différents types d'affectation du territoire (MAMH, 2020)

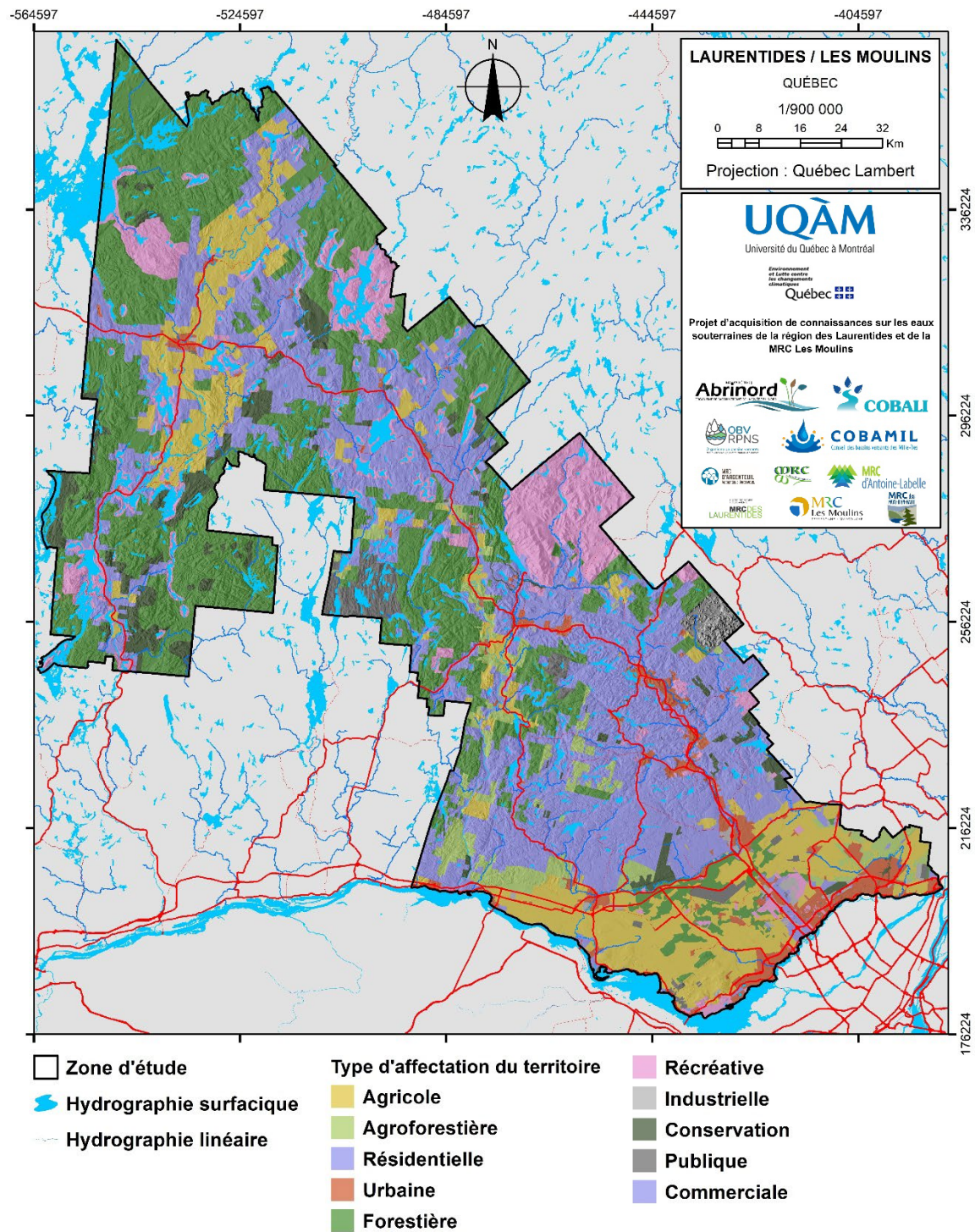


Figure 22 : Affectation du territoire (MAMH, 2020)

3 ACQUISITION DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION

3.1 Compilation des informations existantes

Une liste détaillée des sources de données consultées dans ce projet est fournie au **Tableau 7** (plusieurs sources font référence à des rapports de consultants qui ne sont pas cités explicitement ici, mais qui sont listés dans la section Références). L'acquisition des données disponibles a débuté avec la numérisation de tous les rapports et documents disponibles dans les archives centralisées au MELCC à Québec. Les municipalités ont ensuite été contactées afin d'obtenir leur autorisation donnant accès aux rapports plus récents qui sont entreposés au bureau régional du MELCC. La grande majorité des données spatiales ont été téléchargées à partir du site Données Québec (donneesquebec.ca) (géologie, territoire, hydrographie, foresterie, données SIH, sites contaminés et topographie). La BADGEQ (Beaumier et al, 1994), les données de forages de Transport Québec et du Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) ont également été consultées pour extraire l'information hydrogéologique, stratigraphique et géophysique relative à la zone d'étude. La base de données des cultures assurées (BDCA) a été consultée pour obtenir l'information spatiale sur les types de cultures. Les données hydrométriques ont été obtenues auprès de la DEH. Les données météorologiques des stations et les données interpolées sur grilles ont été obtenues auprès du MELCC-DSEE. Finalement, les données ponctuelles géochimiques du projet AFSOQ ont été intégrées à la base de données du projet.

Tableau 7 : Sources d'informations disponibles pour la réalisation du projet

Thème	Nature des données	Source
Hydrographie	Géobase du réseau hydrographique du Québec	GRHQ MELCC-MERN
Limite de bassins	Limite des bassins versants	MELCC-DEH
Topographie	Modèle numérique altimétrique	MERN
	LiDAR	MFFP
Occupation du sol	Base de données des cultures généralisées (BDCG)	FADQ
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN
	Occupation du sol	MELCC
	Système d'information écoforestière (SIEF)	MFFP
Affectation du territoire	Limite des zones agricoles	CPTAQ
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SCA)	MERN
Routes, limites municipales et toponymie	Base de données topographiques du Québec (BDTQ)	MERN
	Base nationale de données topographiques (BNDT)	RnCan-GeoGratis
	Système sur les découpages administratifs du Québec (SDA)	MERN
	Réseau routier national du Canada	RnCan-GeoBase
Géologie	Compilation de données géologiques	MERN-SIGEOM
	Géologie du Quaternaire	MERN
Pédologie	Carte des sols, information pédologique	DPEP/IRDA
Hydrogéologie	Puits RSESQ	MELCC
	Puits SIH	MELCC
	Localisation des forages pétroliers et miniers	MERN/SIGPEG
	Localisation des forages géotechniques	MTQ
	Localisation des captages municipaux	MELCC
	Rapports hydrogéologiques	MELCC et municipalités
Qualité de l'eau	Qualité de l'eau de surface des tronçons	MELCC
	Banque de données géochimiques du Québec (BADGEQ)	MERN
Hydrométrie	Stations hydrométriques	MELCC-DEH
Climat	Stations météorologiques	MELCC-DSEE

3.2 Travaux de caractérisation

Entre avril 2018 et novembre 2020, plusieurs travaux de terrain ont été mis en œuvre afin d'obtenir de nouvelles données sur l'hydrogéologie, la géochimie et la stratigraphie des aquifères fracturés et granulaires de la région du PACES-LAULM. Au total, 13 forages ont été réalisés afin de combler d'importantes lacunes stratigraphiques dans les principales vallées et aussi afin de mettre en place des puits d'observation qui seront intégrés au RSESQ (cinq dans le roc et huit dans les dépôts meubles). Ces nouveaux puits d'observation ont été équipés de sondes de suivi en continu du niveau et de la température de l'eau souterraine. Toujours dans l'objectif d'améliorer les informations stratigraphiques, six levés de résistivité électrique 1D ont été réalisés dont cinq dans le secteur de La Conception. Afin d'obtenir des informations sur les propriétés hydrauliques des formations géologiques, 13 essais de pompage de courte durée ont été réalisés dans les puits mis en place dans le projet. La caractérisation géochimique de l'eau souterraine a débuté par une campagne d'échantillonnage des puits privés et municipaux durant laquelle 390 échantillons ont été prélevés. Deux stations d'échantillonnage des précipitations pour l'analyse des isotopes stables de l'eau ont été mises en place à des stations météorologiques de Climat Québec, l'une à Arundel et l'autre à Ferme-Neuve. Trois bassins versants ont été instrumentés pour le suivi des débits, c.-à-d. les bassins de la rivière à Simon, de la rivière Saguay et de la rivière Calumet (Chabot-Grégoire, 2022). Sur ces bassins versants et sur celui du ruisseau Lanthier, des échantillonnages de l'eau de surface ont été faits pour y analyser l'activité en ^{222}Rn et la composition isotopique (MSc Dubois). Finalement, une caractérisation de l'épaisseur de matière organique et de la profondeur de la nappe a été faite dans 41 tourbières de la région (Laplante, 2021). Le **Tableau 8** résume les travaux de caractérisation qui ont été réalisés dans le cadre du projet, la **Figure 23** permet de localiser ces travaux et l'**ANNEXE A** présente des photos prises lors des travaux de terrain.

Tableau 8 : Résumé des travaux de caractérisation

Travaux de caractérisation	Période
Installation de piézomètres dans l'aquifère fracturé (5)	2019-2020
Installation de piézomètres dans les dépôts meubles (8)	2019-2020
Suivi continu des niveaux piézométriques (13 puits)	2019-2021
Levés géophysiques de résistivité électrique (6)	2020
Essais de pompage (13)	2019-2020
Suivi mensuel des précipitations pour analyses isotopiques (2 sites)	2019-2020
Suivi continu des débits sur les bassins expérimentaux (3 sites)	2019-2021
Échantillonnage d'eau souterraine, analyses chimiques et isotopiques (390)	2019-2020
Échantillonnage de l'eau de surface – ^{222}Rn	2019-2020
Échantillonnage dans les tourbières (41 sites)	2019-2020

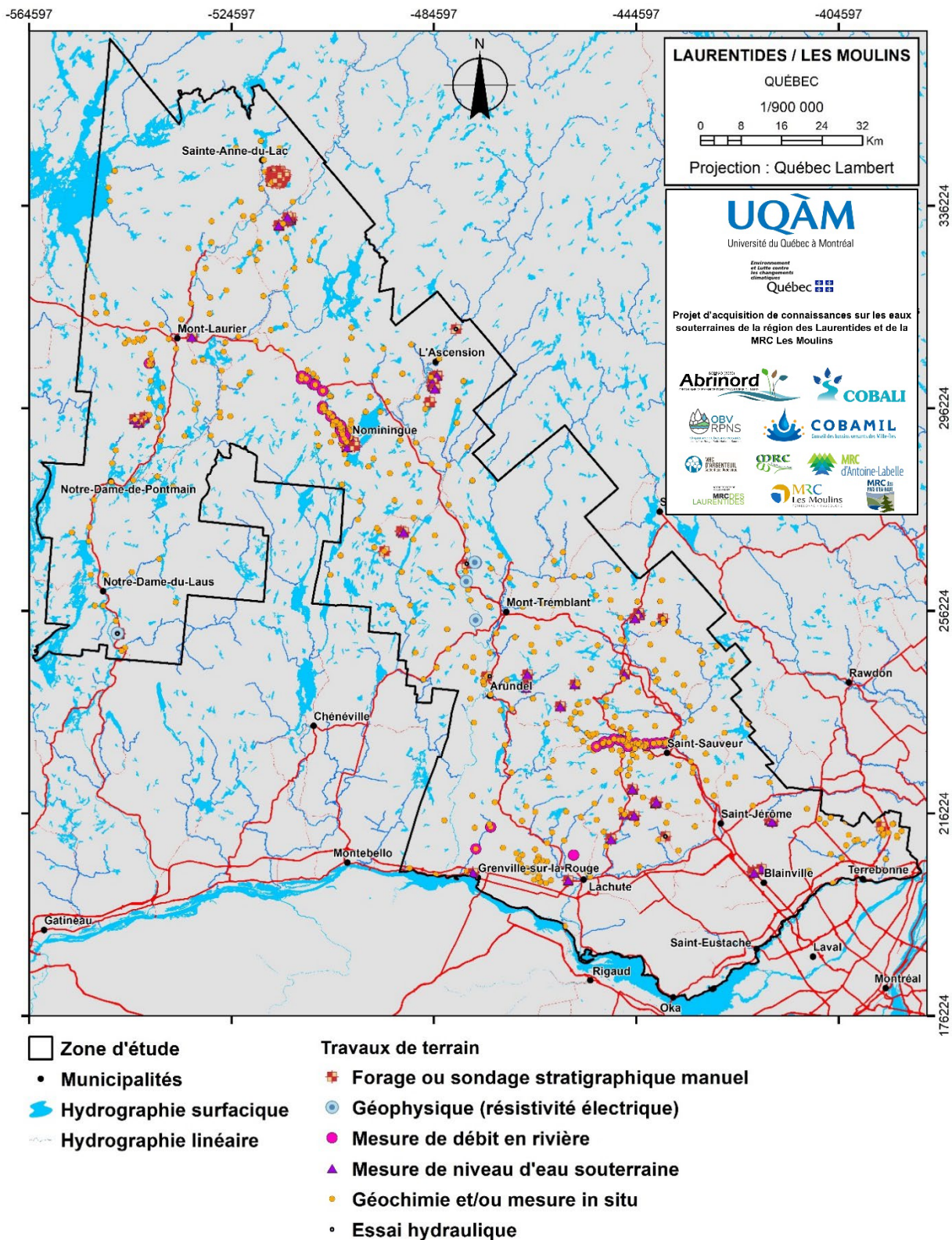


Figure 23 : Localisation de tous les travaux de caractérisation réalisés dans le cadre du projet PACES-LAULM

3.2.1 Géophysique

Six sondages de résistivité électrique 1D ont été faits dans les vallées sédimentaires de la rivière Rouge et de la rivière du Lièvre à l'été 2020. La méthode utilisée est celle de *Vertical Electrical Sounding* (VES) et consiste à mesurer la résistance électrique à travers un volume connu de sol afin de calculer la résistivité du sol. La résistivité dépend de la porosité, de la conductivité hydraulique, du contenu en eau, de la température et de la proportion d'argile du sol. Les levés en résistivité électrique fournissent donc de l'information sur la nature et l'épaisseur des matériaux rencontrés ainsi que sur le niveau de la nappe.

Les relevés ont été réalisés à l'aide d'un Terrameter SAS 1000 de ABEM et d'une batterie de 12 V comme source de courant, en utilisant un dispositif de type Wenner et un dispositif de type Schlumberger. La longueur maximale des relevés réalisés est de 250 m, ce qui a permis de sonder jusqu'à une profondeur théorique de 50 m. Les levées ont permis de valider les observations des logs stratigraphiques issus des forages et de mieux comprendre la distribution des unités stratigraphiques dans la vallée de la rivière Rouge (secteur La Conception/Brébeuf).

3.2.2 Installation de puits d'observation

L'installation des puits d'observations s'est faite en trois étapes. La première étape a été réalisée au cours de l'été 2019 en partenariat avec le MELCC dans le but d'étendre le RSESQ. Les puits installés durant cette phase ont été entièrement financés par le MELCC. Ils ont été réalisés par la compagnie Puits Brunette inc., un sous-traitant de Groupe Puitbec inc. qui avait remporté l'appel d'offres lancé par le MELCC. Au total, six puits ont été installés durant cette phase (**Tableau 9**). La deuxième étape avait comme objectifs de faire l'installation de puits d'observation dans les dépôts meubles de surface à proximité des puits installés à la première étape. Ces travaux ont été réalisés au cours de l'été 2019 par la compagnie Forages LLE avec une foreuse de type Geoprobe. La troisième étape a été réalisée au printemps 2020 par le Groupe Puitbec inc. et a permis de mettre en place quatre puits d'observation supplémentaires dans le roc. Tous les puits mis en place dans le cadre du projet ont été équipés de sonde automatique de mesure du niveau et de la température de l'eau souterraine. Au terme du projet, tous les puits ont été intégrés au RSESQ. Toutes les informations stratigraphiques, de même que les détails de construction des forages sont donnés à l'**ANNEXE B**.

Tableau 9 : Nouveaux puits d'observation

Site	Étape	RSESQ	Unité géologique	Prof. totale (m)	Prof. crépine (m)
Notre-Dame-du-Laus	1	4060002	Sable / gravier	49,4	46,3
	2	4060003	Sable	11	7,9
Ferme-Neuve	1	4060004	Till-moraine	48,8	40,6
	2	4060005	Sable	12,5	11
L'Ascension	1	4020002	Roc granitique	42,1	
	1	4020003	Sable	22,6	19,5
La Conception	1	4020004	Sable/gravier	77,1	63,1
	2	4020005	Sable	12	10,5
Morin-Heights	1	4010003	Roc granitique	24,4	Forage ouvert
Sainte-Agathe-des-Monts	3	4010005	Roc granitique	59	Forage ouvert
Arundel	2		Gravier et sable	6,4	4,9
	3	4020006	Roc granitique	54	Forage ouvert
Saint-Colomban	3	4010004	Roc granitique	24	Forage ouvert
Mascouche	3	4646001	Roc calcaire	42,5	Forage ouvert

3.2.3 Essais hydrauliques sur les puits

Essais de pompage

Des essais de pompage ont été réalisés dans la majorité des puits installés dans le cadre du projet. Les essais ont été faits à l'aide d'une pompe à débit variable de type RediFLOW-2. La durée des essais a varié de 1 à 3 h et les débits pompés ont varié de 4 à 18 L/min (**Tableau 10**). Un puits d'observation était disponible pour suivre le niveau de la nappe pendant l'essai aux puits d'Arundel, de La Conception et de Notre-Dame-du-Laus. Pour les autres sites, seulement le niveau d'eau dans le puits pompé a été mesuré. Les niveaux d'eau ont été mesurés manuellement à l'aide d'une sonde manuelle et aussi en continu à l'aide d'une sonde de niveau automatique. Le débit a été mesuré à l'aide d'un débitmètre et les valeurs ont été vérifiées avec des mesures manuelles ponctuelles tout au long des essais. Pour chaque puits, un premier essai de courte durée a permis de déterminer le débit qui pouvant être pompé et un second essai d'une durée d'une heure ou plus a ensuite été réalisé jusqu'à stabilisation des rabattements.

Tableau 10 : Essais de pompage réalisés dans le cadre du projet

Puits	Type d'aquifère	Confinement de la nappe	Durée (h)	Puits d'observation	Débit (L/min)	Nbre d'essais
RSESQ 4020004	Granulaire	Captive	1	Non	4,6 et 18	2
RSESQ 4020005	Granulaire	Libre	1	Oui	4,6	1
RSESQ 4020003	Granulaire	Libre	1,5	Non	4,6 et 6	2
RSESQ 4020002	Roc fracturé	Libre	1	Non	4	1
RSESQ 4060002	Granulaire	Semi-captive	1	Non	18	1
RSESQ 4060003	Granulaire	Libre	1	Oui	10,4	1
RSESQ 4010004	Roc fracturé	Libre	2	Non	13,8	1
RSESQ 4020006	Roc fracturé	Libre	3	Oui	13,8	1
UQAM Arundel	Granulaire	Libre	1	Oui	6,4	1
RSESQ 4060004	Granulaire	Captive	2	Non	8,5	1
RSESQ 4010005	Roc fracturé	Libre	< 0,5	Non	4	1
RSESQ 4010003	Roc fracturé	Libre	2	Non	18	2
RSESQ 4020004	Roc fracturé	Captive	1	Non	17	2

3.2.4 Échantillonnage d'eau souterraine

La principale campagne d'échantillonnage de l'eau souterraine a été réalisée entre les mois de juin et d'août 2019. Une seconde campagne, visant principalement les puits municipaux (répartis sur l'ensemble de la zone d'étude), a eu lieu entre juin et août 2020. Ces deux campagnes ont permis de collecter un total de 392 échantillons provenant de puits résidentiels, des nouveaux puits d'observation (RSESQ et UQAM) et des puits d'approvisionnement municipaux.

Un sondage réalisé durant l'hiver 2019 auprès des résidents de la zone d'étude a permis de recruter plus d'une centaine de volontaires. Un tri a ensuite été fait afin d'obtenir un volontaire à tous les 25 km². Trois équipes d'échantillonnage ont été réparties sur les bassins versants de la zone d'étude pour échantillonner chez les volontaires et combler les secteurs pour lesquels il n'y avait pas de volontaire. Lors de la deuxième campagne d'échantillonnage, l'étudiant à la maîtrise Samuel Bolduc a échantillonné 32 municipalités approvisionnées par l'eau souterraine.

À chacun des sites visités, une fiche d'information décrivant le puits et les informations connexes (problème de quantité ou de qualité) était remplie en compagnie du propriétaire (dans le cas où celui-ci avait donné l'autorisation d'échantillonner le puits sans sa présence, les informations étaient recueillies au téléphone ou par courriel) et une entente d'autorisation était signée par le propriétaire. Par la suite, la sortie d'eau la plus près de l'entrée d'eau du bâtiment était localisée. Dans le cas où un filtre ou un système de traitement était présent, l'eau était échantillonnée en amont du filtre. Si ceci n'était pas possible, aucun échantillon n'était prélevé. Le protocole utilisé

pour l'échantillonnage de l'eau était basé sur celui utilisé au cours des projets PACES précédents (**ANNEXE C**).

Analyse des métaux dissous, ions majeurs, ions mineurs et nutriments

Les échantillons pour la quantification des métaux dissous, ions majeurs, mineurs et nutriments (**Tableau 11**) ont été analysés par le laboratoire de Laboratoires Bureau Veritas (anciennement Maxxam) situé dans la ville de Saint-Laurent. Les échantillons ont été conservés à une température < 4°C pendant toutes les étapes précédant leur livraison au laboratoire, d'abord sur le terrain dans une glacière réfrigérée, puis dans un réfrigérateur en attendant d'être déposés chaque vendredi chez Laboratoires Bureau Veritas. Une bouteille de 250 ml, quatre bouteilles de 125 ml et un vial en verre de 60 ml ont été utilisés pour l'échantillonnage des paramètres chimiques. Les bouteilles ont été fournies par Laboratoires Bureau Veritas et comportaient les agents de conservation nécessaires pour chaque analyse.

Tableau 11 : Éléments chimiques analysés

Métaux dissous			Conventionnels
Aluminium (Al)	Chrome (Cr)	Plomb (Pb)	Azote ammoniacal (N-NH ₃)
Antimoine (Sb)	Cobalt (Co)	Potassium (K)	Fluorure (F)
Argent (Ag)	Cuivre (Cu)	Sélénium (Se)	Phosphore inorganique
Arsenic (As)	Étain (Sn)	Silicium (Si)	Sulfures (exprimés en S ₂ ⁻)
Baryum (Ba)	Fer (Fe)	Strontium (Sr)	Alcalinité totale (en CaCO ₃) pH 4.5
Béryllium (Be)	Lithium (Li)	Sodium (Na)	Bromure (Br ⁻)
Bismuth (Bi)	Magnésium (Mg)	Uranium (U)	Chlorures (Cl)
Bore (B)	Manganèse (Mn)	Titane (Ti)	Nitrate(N) et Nitrite(N)
Cadmium (Cd)	Molybdène (Mo)	Vanadium (V)	Sulfates (SO ₄)
Calcium (Ca)	Nickel (Ni)	Zinc (Zn)	

Paramètres bactériologiques

Les analyses bactériologiques (bactéries atypiques, coliformes totaux, *E. coli* et entérocoques) ont été réalisées dans 361 puits. L'analyse n'a pas été faite lors de l'échantillonnage des puits municipaux, puisqu'elle est déjà réalisée à une fréquence hebdomadaire par les municipalités. Les bouteilles échantillonnées étaient déposées dans les 24 ou 32 h au laboratoire d'analyses environnementales H₂Lab de Sainte-Agathe-des-Monts, respectant ainsi le délai maximal de 48 h entre l'échantillonnage et l'analyse. Pendant tout le processus, les échantillons ont été conservés à une température inférieure à 12°C, tel que demandé par le protocole d'échantillonnage du laboratoire.

Pesticides et composés pharmaceutiques

Les échantillons pour la présence de pesticides et produits pharmaceutiques (**Tableau 12**) ont été collectés dans 382 puits. Une bouteille Nalgène® brune de 1 L a été remplie d'eau brute et conservée dans une glacière réfrigérée une température < 4°C, puis congelée à -20°C dans les laboratoires de l'UQAM, en attendant l'envoi au laboratoire de génie de l'environnement de l'université de Sherbrooke du professeur Hubert Cabana.

Tableau 12 : Pesticides et produits pharmaceutiques analysés

Pesticides			Produits pharmaceutiques
Naphthol	Diazinon	Parathion	Acetaminophen
Acetamiprid	Dimethoate	Pendilethaline	Atenolol
Aldicarb	Dinotefurane	Permethrine	Benzafibrate
Aldicarb-sulfone	Diuron	Phosmet	Caféine
Aldicarb-sulfoxide	Fludioxonil	Pyraclostrobine	Carbamazepine
Atrazine	Hexazinon	Pyrimethanil	Ciprofloxacin
Azinphos-Methyl	Imazapyr	Sebutylazin	Cyclophosphamide
Bendiocarb	Imidaclopride	Simazine	Fenofibrate
Bentazone	Iprodione	Spinosad A	Ibuprofen
Boscalide	Isoproturon	Terbutylazin	Indometacin
Butoxyde de piperonyl	Kresoxim Methyl	Thiabendazole	Ketoprofen
Carbaryl	Linuron	Thiachlopride	Menfenamic acid
Carbendazim	Malathion	Thiametoxame	Naproxen
Carbofuran	Metolachlor	Trifloxistrobine	Ofloxacin
Chlofenvinphos	Methoxuron	Trimetoprim	
Chlorotoluron	Methylbenzuron		
Chlorpyrifos	Métobromuron		
Chlortianidine	Monolinuron		
Coumaphos	Nitenpyram		
Cyanazin	O-Methoate		

Analyses isotopiques

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

Les échantillons pour l'analyse des isotopes stables de l'eau $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ ont été échantillonnés à l'aide d'un vial de 13 ml. Les échantillons n'ont pas été filtrés et du parafilm a été placé autour des bouchons afin d'éviter le fractionnement isotopique par l'évaporation. Au total, 382 échantillons ont été analysés.

Deux échantillonneurs de précipitations ont été installés à Arundel et à Ferme-Neuve en juin 2019. L'échantillonnage de ces stations a été fait chaque mois par deux observateurs du réseau de stations météorologiques de Climat Québec. En raison de la pandémie de Covid-19, les échantillons de précipitation de mai 2020 n'ont pas pu être collectés. Les résultats de mai 2020 ont été estimés en faisant une moyenne des résultats d'avril et juin 2019. Ces données permettent de tracer la droite météorique de la zone d'étude, dans le but de décrire comment la composition isotopique de l'eau souterraine est similaire à celle des précipitations.

Les analyses des échantillons d'eau souterraine et des précipitations de juin 2019 à avril 2020 ont été réalisées à l'automne 2019 et 2020 par l'étudiante Fanny Pithon au laboratoire de géochimie des isotopes stables légers du Geotop. Les échantillons ont été analysés à l'aide d'un spectromètre infrarouge à ratios isotopiques à double laser (Los Gatos® T-LWIA-45-EP).

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

La concentration des nitrites-nitrates a été mesurée lors des analyses aux Laboratoires Bureau Veritas. Deux bouteilles de 30 ml Nalgène® HDPE ont été collectées à chaque puits, une pour quantifier les nitrites et une pour mesurer les isotopes stables des nitrates ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{15}\text{N}$). Au moment de l'échantillonnage, l'eau a été filtrée avec un filtre en cellulose de $0,45\ \mu\text{m}$ et les bouteilles ont été remplies de manière à éviter la présence de bulles. Au cours de la journée d'échantillonnage, ils ont été conservés dans une glacière réfrigérée à $< 4^\circ\text{C}$, puis ils ont été congelés à -20°C dans les laboratoires de l'UQAM. Les échantillons dont les concentrations excédaient $0,5\ \text{mg N-NO}_3/\text{L}$, mais qui avaient moins de 2 % de NO_2 ont été envoyés au *Environmental Isotope Laboratory* de l'université de Waterloo, pour analyse des isotopes stables des nitrates.

Radon (^{222}Rn)

Le radon est un traceur de courte demi-vie de l'eau souterraine. Son activité a été analysée dans l'eau souterraine de 314 puits. Chaque échantillon d'eau souterraine a été collecté dans des bouteilles PETG 125 ml. La mesure de l'activité en ^{222}Rn a été réalisée au laboratoire d'hydrogéologie de l'UQAM à l'aide d'un compteur scintillation alpha liquide (modèle Hidex SL-300) en méthode d'extraction directe suivant le protocole Lefebvre et al. (2013).

Datation et traceurs de temps de séjour

Au cours de l'été 2020, 31 puits utilisés par des municipalités de la région ont été échantillonnés pour y analyser le tritium (^3H), les isotopes de l'hélium (^3He et ^4He), le ^{14}C et le $\delta^{13}\text{C}$ -CID (carbone inorganique dissous), ainsi que les ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Les bassins versants visés étaient ceux de la rivière du Nord (10 échantillons), de la rivière Rouge (12), de la rivière du Lièvre (7) et de la rivière de l'Assomption (2). Les traceurs d'âge $^3\text{H}/^3\text{He}$ et ^{14}C sont présentés au chapitre 5, les autres résultats sont esquissés à l'**ANNEXE J**.

Les activités du ^3H et le ^{14}C ont été mesurés au Laboratoire AMS André E. Lalonde de l'Université d'Ottawa. Le CID et son rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}$ -CID pour la correction et l'application des modèles d'âges, les activités en ^{14}C ont été mesurées au Laboratoire d'isotopes stables Ján Veizer de l'Université d'Ottawa. Pour l'échantillonnage de l'eau pour le ^{14}C et carbone inorganique dissous les matériaux recommandés et les protocoles d'échantillonnage proposés par le Laboratoire AMS André E. Lalonde ont été rigoureusement appliqués afin d'éviter tous sources de pollution qui puisse entraîner des erreurs sur la mesure de l'activité du radiocarbonate. La concentration du CID et son rapport isotopique en $\delta^{13}\text{C}$ ont été mesurés par spectromètre de masse à ratios isotopiques (IR-MS). Les échantillons d'eau pour la mesure du ^3He ont été prélevés dans des bouteilles de 1 L en polyéthylène haute densité (HDPE). L'activité du tritium a été mesurée au Laboratoire des gaz rares de l'Université d'Ottawa.

Les échantillons pour la mesure des gaz rares ont été prélevés en utilisant des tubes en cuivre connecté à la sortie du puits municipal avec des connexions hydrauliques de type NPT et des tuyaux en PVC-armé. Toutes précautions ont été prises pour éviter la contamination avec l'atmosphère. En bref, un tuyau de cuivre (qualité K frigorifique) de 3/8 pouces de diamètre muni de deux mâchoires métalliques aux extrémités est connecté via des tubes en PVC et connecteurs NPT à l'une des vannes de service en tête de puits. L'eau est faite circuler dans le tuyau pour plusieurs minutes et ensuite les deux mâchoires sont fermées en isolant de toute atmosphère externe 14 cm³ d'eau. Une fois au laboratoire, le tuyau est ouvert dans un système sous vide et

le gaz dissous récupéré par dégazage, purifié de tous gaz réactifs et ensuite piégés dans une chambre cryogénique à 9 K. Toutes les analyses sont réalisées au Laboratoire des gaz rares du Geotop à l'UQAM.

3.3 Saisie, validation et archivage des données

À l'exception des données cartographiques de base (p.ex., hydrographie, réseau routier), toutes les données utilisées pour bâtir les livrables sont comptabilisées dans la base de données du projet PACES-LAULM qui a été transmise au MELCC. Les données provenant des rapports de consultants, de rapports gouvernementaux ou municipaux disponibles en format papier ont été intégrées manuellement dans la base de données. Les données de la base de données du Système d'information géoscientifique pétrolier et gazier (SIGPEG) ont été comptabilisées manuellement à partir des données en accès libre du site internet de l'organisme. Les données du Système d'information hydrogéologique (SIH), de la base de données géochimiques du Québec (BADGEQ) et des forages routiers ont été fournies par différents ministères en format numérique. En tout, 51 355 points de mesure ont été intégrés dans la base de données (**Tableau 13**).

Tableau 13 : Nombre d'entrées dans la base de données selon la source d'information

Source	Nombre d'entrées dans la base de données	Proportion (%)
Consultants – Rapports	326	0,6
MRN – Rapports	63	0,1
MRN – BADGEQ	3027	5,9
MELCC – Rapport	24	0,0
MRN – SIGEOM	8151	15,9
MELCC – SIH	38934	75,8
MTQ – BD	196	0,4
MAPAQ – Rapport	1	0,0
UQAM – PACES-LAURLM	633	1,2

3.4 Géologie du socle rocheux

3.4.1 Histoire géologique et contexte général

La carte géologique du roc a été tracée à l'aide de l'information numérique provenant de la base de données du SIGEOM (MERN, 2020a) (**Figure 24**). La zone d'étude est couverte par la province géologique du Grenville et la plateforme des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les deux provinces sont séparées par les failles normales de Lachute et de New Glasgow datant du paléozoïque. Au nord de ces failles, la province du Grenville est majoritairement représentée par des lithologies métamorphiques et magmatiques datées du Mésoprotérozoïque (1.6-1 Ga), à l'exception des syénites de Chatham-Grenville (485-470 Ma). La première phase de l'orogénèse grenvillienne dure environ 300 Ma, entre 1,5 et 1,3 Ga où les grands bassins datant du Mésoprotérozoïque sont issus de la fragmentation progressive du protocontinent nord-Américain, l'anorthosite et des dykes de diabases sont la preuve de remontée de magma à travers des fractures nouvellement formées. L'océan qui s'est formé à cette période est à l'origine des protolithes de la ceinture centrale métasédimentaires. Il s'en est suivi une collision continentale ayant donné naissance à la chaîne de montagnes des Laurentides. Les Laurentides actuelles sont les vestiges de la racine profonde de ces hauts reliefs. Les contraintes lithostatiques et le fort gradient thermique ont formé des lithologies de grade métamorphique élevé à très élevé, avec des faciès amphibolites à faciès granulites.

La plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent s'est formée lors de plusieurs cycles de transgression et régression. À la suite de la formation d'un rift continental à la fin du protérozoïque, l'Océan Iapetus s'est mis en place entre les continents Laurentia et Baltica (Globensky, 1987). Les vestiges de paléoplagés (groupe du Postdam), puis les dépôts de grès dolomitiques et dolomie (Groupe Beekmantown) témoignent d'un environnement peu profond et calme formant peu à peu une plateforme sédimentaire. Une transgression marine est par la suite à l'origine, entre autres, les calcaires du Chazy. À la fin d'une longue sédimentation, les dépôts détritiques de milieux marins profonds des Shale d'Utica ont pris place, suivi des shales gris du groupe de Lorraine. Cette description est synthétisée et ne nomme pas tous les groupes formés par l'Océan Iapetus. Plusieurs millions d'années plus tard, durant le Crétacé, des intrusions alcalines se placent sur un axe nord-ouest à Sud-Est de la plateforme des Basses-Terres. Ce sont les collines Montérégiennes, avec dans notre région la colline Saint-André et le mont Oka.



3.4.2 Lithologies et structures régionales

Les connaissances sur la géologie de la zone d'étude proviennent d'un travail mené, entre autres, par Martignole et Corriveau (1991), Corriveau et Van Breeman (2000), Corriveau et Morin (2001), Nantel (2008), Davis et Nantel (2016) qui ont couvert l'ouest de la province du Grenville. La description lithologique des Basses-Terres du Saint-Laurent a été réalisée par Globensky (1987).

Dans le secteur étudié, la province géologique du Grenville est divisée entre la ceinture centrale métasédimentaire et le Terrane de Morin (**Figure 25**), par la faille décrochante de Labelle (LDZ). La ceinture centrale métasédimentaire est principalement située dans la MRC d'Antoine-Labelle caractérisée par la suite supracrustale de l'Ascension composée de paragneiss et la suite supracrustale du Sourd avec des marbres, orthogneiss granitoïdes et quelques coulées basaltiques. Les dépôts sédimentaires sont les vestiges de la présence d'un océan au début du mésoprotérozoïque, puis métamorphisés à un grade amphibolite supérieure. Le terrane Morin est composé de la Suite AMCG de Morin avec le complexe anorthosite, et des granitoïdes à orthopyroxènes. Ainsi qu'une portion du complexe de Mékinac composée de gneiss charnokitique. Au sud-ouest du terrane, la syénite de Chatham-Grenville est datée de l'Ordovicien.

Les Basses-Laurentides et la MRC les Moulins se trouvent sur la plateforme sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent. La MRC les Moulins se situe aux deux tiers sur les calcaires du Groupe Chazy et à l'est de celle-ci sur des shales d'Utica et à l'extrémité sud-est les shales gris du Groupe de Lorraine. La série sédimentaire est datée de l'Ordovicien moyen et supérieur (470-458 Ma). La zone d'étude compte 20 formations géologiques présentes à l'affleurement et dans les premiers 100 m sous la surface. Dans le **Tableau 14**, les formations sont présentées des plus récentes aux plus anciennes.

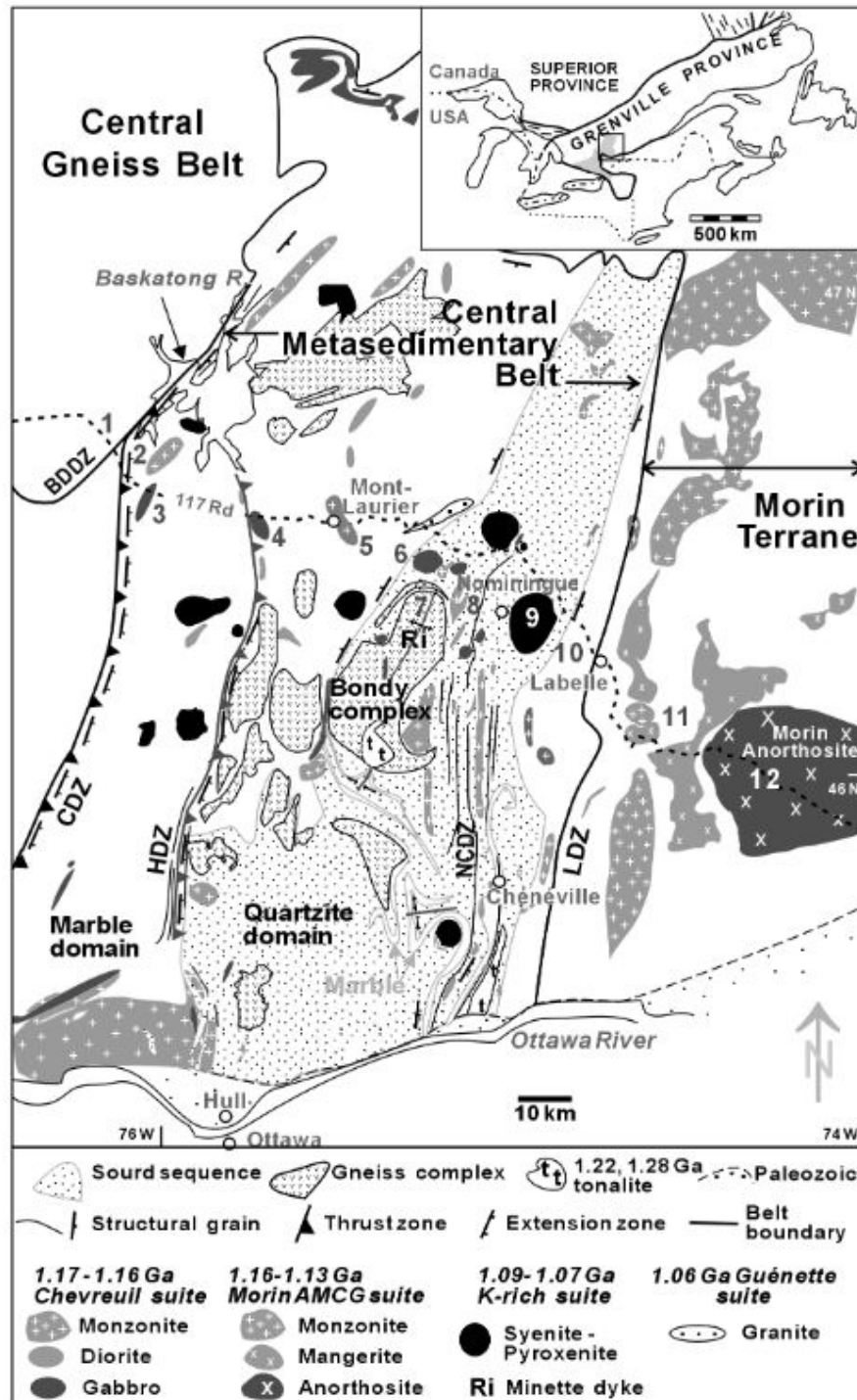


Figure 25 : Carte géologique des roches plutoniques et complexes gneissiques dans les marbres de la ceinture centrale métasédimentaire et de la suite AMCG de Morin située dans le terrane de Morin (Corriveau et Morin, 2001)

Tableau 14 : Unités géologiques, âges et descriptions géologiques

Groupe	Formation	Époque	Lithologie	Source
-	intrusifs (collines montérégiennes)	Crétacé inférieur	Roches alcalines avec brèches associées et cornéennes	Crough (1981); Sleep (1990)
Lorraine	-	Ordovicien supérieur	Shale gris, grès, siltstone et calcaire	Globensky (1987)
Syénite de Chatham-Grenville	-	Ordovicien supérieur	Syénite, monzonite, monzodiorite, granite et carbonatite	Higgins (1982)
Shale d'Utica	-	Ordovicien supérieur	Shale noir calcaireux et calcaire	Globensky (1987)
Chazy	-	Ordovicien moyen	Calcaire	Globensky (1987)
Beekmantown	Beauharnois	Ordovicien inférieur	Dolomie, grès, calcaire et shale	Globensky (1987)
Beekmantown	Theresa	Ordovicien inférieur	Grès dolomitique	Globensky (1987)
Potsdam	Cairnside	Cambrien supérieur	Grès quarzitique, grès feldspathique et conglomérat	Globensky (1987)
-	Complexe de Mékinac	Mésoprotérozoïque	Gneiss charnockitique	
-	Granite de Lanthier	Mésoprotérozoïque (1143 55 - <1135)	Granite, monzonite quartzifère, syénite quartzifère et pegmatique	Hébert et Nantel (1999)
-	Suite AMCG de Morin	Mésoprotérozoïque (1160-1135 Ma)	Anorthosite, leucogabbro, leuconorite, leucotroctolite et nelsonite	Doig (1991); Emslie et Hunt (1990); Friedman et Martignole (1995)
-	Suite AMCG de Morin	Mésoprotérozoïque (1160-1135 Ma)	Granitoïde à orthopyroxène : charnockite, mangérite, jotunite et syénite à hypersthène	Doig (1991); Emslie et Hunt (1990); Friedman et Martignole (1995)
-	Suite intrusive de Chevreuil	Mésoprotérozoïque (1190-1160 Ma)	Syénite, monzonite, monzodiorite et autres intrusions alcalines associées	Corriveau et van Breemen (2000)
-	Suite supracrustale de l'Ascension	Mésoprotérozoïque (1280 Ma)	Paragneiss et gneiss pélitique	Davis et Nantel (2016), Nantel (2008)
-	Suite supracrustale du Sourd	Mésoprotérozoïque (1250-1280)	Marbre, roches calcosilicatées, dolomie, schiste et quartzite	Nantel (2008)
-	Suite supracrustale du Sourd	Mésoprotérozoïque	Basalte, andésite et amphibolite	Corriveau et van Breemen (2000)
-	Suite supracrustale du Sourd	Mésoprotérozoïque	Orthogneiss granitoïde	Corriveau et van Breemen (2000)
-	Suite magmatique de Lacoste	Mésoprotérozoïque (1450-1370 Ma)	Orthogneiss et tonalitique	Davis et Nantel (2016); Nantel (2008); Moukhils et al. (2015)
-	-	Mésoprotérozoïque	Gabbro, norite, gabbro-norite, diorite, troctolite, pyroxénite et périclélite	
-	-	Mésoprotérozoïque	Migmatique	Jacoby (1975)

3.5 Géologie du Quaternaire

3.5.1 Histoire du Quaternaire

La cartographie la plus récente de la géologie du Quaternaire de la zone d'étude (**Figure 26**) a été réalisée par Randour et al. (2021), Randour et al. (2020) et par Roy et al. (2015). Les données peuvent être obtenues à partir de la base de données du SIGEOM (MERN, 2020b). Les dépôts meubles de la région d'étude ont été déposés durant et après la dernière glaciation du Quaternaire. Durant la dernière glaciation, le glacier a érodé les roches du Bouclier canadien et cette érosion a engendré un volume très important de sédiments. Durant et après la déglaciation, ces sédiments ont été remaniés et ont été déposés de différentes manières selon l'environnement glaciaire dans lequel ils se trouvaient.

Bien que la majeure partie de la zone d'étude soit recouverte de dépôts de till, des séquences stratigraphiques complexes pouvant atteindre 90 m sont présentes dans les vallées des principales rivières de la zone d'étude (du Lièvre, Rouge et du Nord). La séquence stratigraphique type est composée à sa base de dépôts de till composés de sable, de gravier et parfois de bloc dans une matrice silteuse. Lors de la déglaciation, les eaux de fonte ont formé des chenaux sous-glaciaires dans lesquels des dépôts fluvioglaciaires se sont déposés. Ces derniers ont généralement érodé le till en place. Ils constituent donc, avec le till, la base de la séquence stratigraphique. Les sédiments fluvioglaciaires se retrouvent généralement dans le fond des vallées, mais parfois aussi sous forme de petits cordons d'esker dans les reliefs plus élevés. Ils sont composés de sable, de gravier et de blocs. Lors de la déglaciation, le retrait du glacier et l'enfoncement isostatique (enfoncement du socle rocheux sous le poids du glacier) ont permis la formation de lacs proglaciaires. La présence de masses d'eau près du front du glacier a entraîné la mise en place de dépôts deltaïques (sable et gravier), de dépôts d'eau profonde (silt et argile) et de dépôts littoraux (sable et silt). Par la suite, l'invasion marine de la mer de Champlain a aussi permis la déposition de sédiments d'eau profonde, deltaïques, lacustres et littoraux. Les dépôts fins formant des aquitards ont été déposés soit pendant l'épisode de l'invasion marine de la mer de Champlain qui a atteint une élévation de ~236 m, soit lors de la formation de lacs proglaciaires. Les dépôts de lacs proglaciaires sont généralement de moindres épaisseurs que les dépôts fins d'origine marine. Finalement, à mesure que le rebondissement isostatique (remonté du socle rocheux à son altitude d'avant la glaciation) se stabilisait et que le réseau hydrographique actuel se mettait en place, des sédiments alluvionnaires se sont déposés, principalement dans les vallées. Sur la zone d'étude, la séquence stratigraphique quaternaire est composée de cinq unités hydrostratigraphiques, deux unités imperméables et trois unités perméables (**Tableau 15**).

Tableau 15 : Stratigraphie et hydrostratigraphie des dépôts meubles

Contexte hydrogéologique	Unité géologique	Unité hydrostratigraphique	% de la zone d'étude
Unité perméable	Cg	U1	0,1
	O		3,6
	Ed		0,3
	Ap		0,2
	At		0,7
	Ax		2,7
	L		3,9
	Ld		0,0
	Lb		1,3
	LGa	U2	1,3
Unité imperméable	LGd		1,7
Unité perméable	LGb	U3	0,7
	MGb		3,5
	MGd		2,0
Unité imperméable	MGa	U4	4,6
Unité perméable	Go	U5	3,2
	Gs		0,0
	Gx		3,4
	GxT		0,3
	Tm		35,1
	Tr		0,0
	Tc		25,5

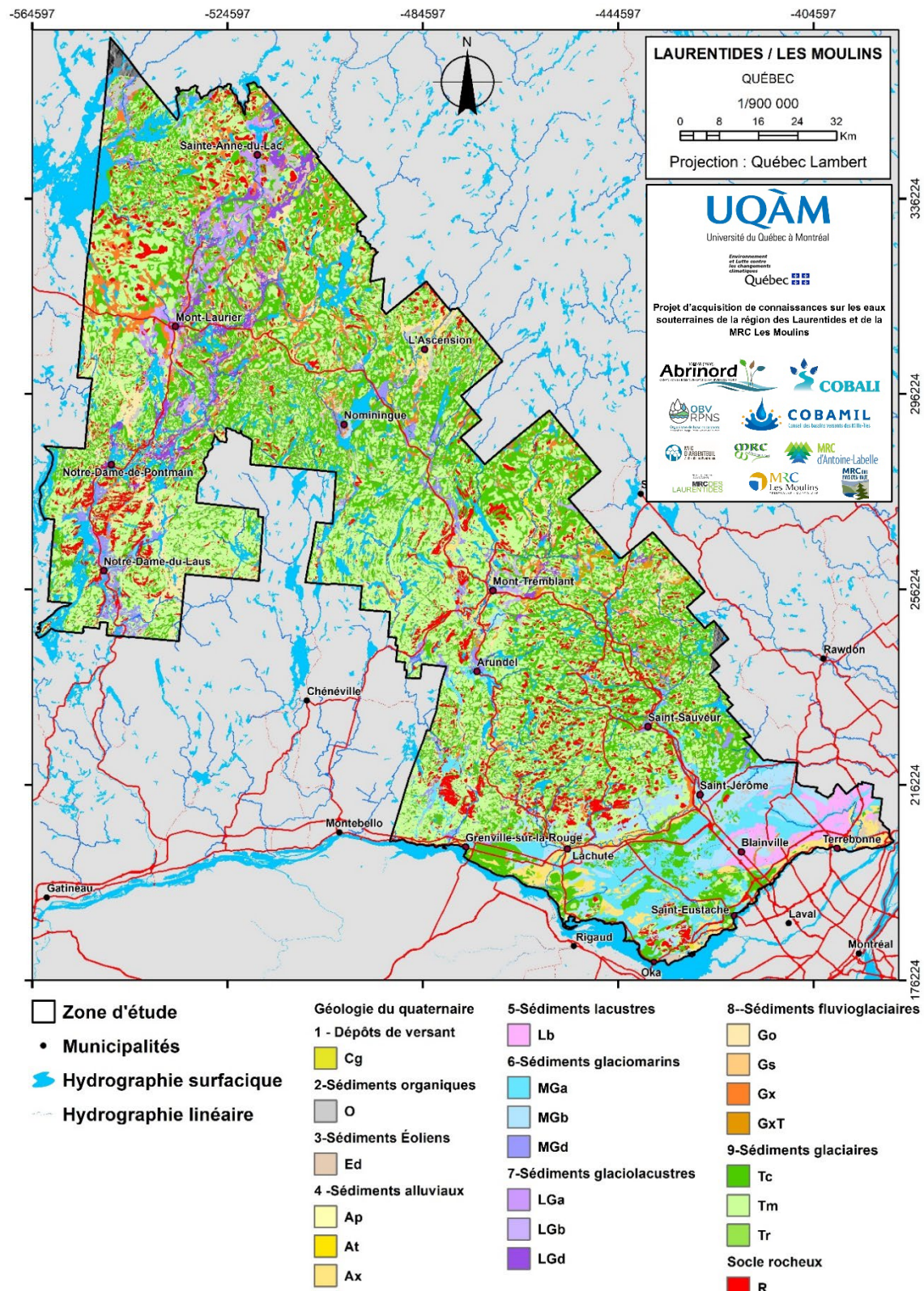


Figure 26 : Géologie du Quaternaire (MERN, 2020b). Les dépôts quaternaires correspondant aux abréviations sont décrits dans MERN (2014).

3.5.2 Couverture des dépôts quaternaires

Sédiments glaciaires (Tm et Tc)

Les unités de till en couverture continue (Tc) et discontinue (Tm) couvrent 60 % de la zone d'étude. Le Tm atteint une épaisseur maximale de 1 m et laisse apparaître la structure du socle rocheux sous-jacent. L'épaisseur du Tc peut atteindre 10 m sur les flancs de vallée en aval de l'écoulement glaciaire. Sur le Bouclier canadien, la matrice du till est composée de sable et de silt et est de couleur gris-brun.

Sédiments fluvioglaciaires (Gxt, Gx, Go, Gs)

Les dépôts d'épandage proglaciaires (Go, Gs), les sédiments juxtaglaciaires (Gx) et les sédiments de la moraine de Saint-Narcisse (Gxt) couvrent 7 % de la zone d'étude. Les dépôts Go et Gs sont principalement situés dans les vallées des grandes rivières et sont composés de sable et de gravier stratifiés. Leur épaisseur peut atteindre une dizaine de mètres. Les sédiments Gx sont composés de sable grossier, de graviers et de blocs. Ils sont communément exploités dans les gravières et sont principalement observés sur le Bouclier canadien. Leur épaisseur peut atteindre 25 m. Les sédiments de la moraine de Saint-Narcisse ont été déposés lors de la stagnation du front du glacier. Ils forment un segment morainique presque continue d'orientation ENE-OSO à la hauteur de Saint-Faustin-lac-Carré. Ces sédiments morainiques sont composés de till à matrice sableuse avec des blocs parfois de taille métrique.

Sédiments glaciolacustres (LGb, LGd)

Lors de la déglaciation, plusieurs lacs proglaciaires se sont développés dans les vallées au front du glacier. Ces lacs ont permis la sédimentation des dépôts provenant de la fonte du glacier. Ils couvrent 2,4 % de la zone d'étude. Les sédiments littoraux (LGb) sont composés de sable, de sable silteux et de gravier et leur épaisseur ne dépasse pas 5 m. Les sédiments deltaïques (LGd) sont composés de sable fin à grossier et leur épaisseur peut atteindre la dizaine de mètres.

Sédiments glaciomarins (MGs, MGb, MGd)

Les sédiments glaciomarins sont associés à l'invasion de la mer de Champlain au cours de la déglaciation du territoire. L'altitude maximale de la mer de Champlain pour la zone d'étude est d'environ 250 m. Ces sédiments ont été distingués selon leur milieu de mise en place : sédiments fins d'eau profonde (MGa), sédiments littoraux et pré-littoraux (MGb), sédiments deltaïques et prodeltaïques (MGd). Au total, ces dépôts couvrent environ 10 % du territoire. Les sédiments MGa sont composés d'argile ou de silt et sont généralement de couleur grise. Ils peuvent atteindre une épaisseur de 15 m sur le Bouclier canadien et plus de 20 m dans les Basses-Terres. Les

sédiments MGb sont composés de sable et de gravier stratifiés et leur épaisseur est généralement inférieure à 5 m. Les sédiments MGd sont localisés sur le Bouclier canadien où ils remplissent les vallées. Ils sont composés de sable et des graviers stratifiés et bien triés. Leur épaisseur peut dépasser 25 m.

Sédiments lacustres (Lb)

Ces sédiments ont été déposés à la suite de la formation du lac à Lampsilis. Ils sont uniquement localisés dans la partie est des Basses-Terres de la zone d'étude. Ils représentent 1,3 % de la zone d'étude et sont composés de sable.

Alluvions, dépôts éoliens organiques et de versants (Ax, At, Ap, Ed, O, Cg)

Les alluvions (Ax, At, Ap), les dépôts éoliens (Ed), les dépôts organiques (O) et les dépôts de versant (Cg) couvrent près de 5 % de la zone d'étude. Les alluvions actuelles (Ap) sont uniquement rencontrées près du fleuve Saint-Laurent. Les alluvions de terrasses fluviales (At) affleurent le long des grandes rivières (Lièvre, Rouge, du Nord, etc.). Leur granulométrie est généralement liée aux sédiments en amont du cours d'eau et va des graviers aux sables silteux. Leur épaisseur ne dépasse généralement pas 2 m. Les alluvions anciennes (Ax) ont été déposées par le paléo-fleuve Saint-Laurent. Ils sont localisés dans les Basses-Terres, notamment au pied du Bouclier canadien et près du fleuve Saint-Laurent actuel. Leur épaisseur peut atteindre la dizaine de mètres.

3.6 Épaisseur des dépôts meubles

Sur la zone d'études, les dépôts meubles peuvent atteindre une épaisseur de 80 m (**Figure 27**). On retrouve les épaisseurs les plus importantes le long des vallées de la rivière Rouge, de la rivière du Lièvre, de la rivière Kiamika et, dans une moindre mesure, dans la vallée de la rivière du Nord. L'orientation nord-sud de ces rivières (sensiblement la même que celle de l'écoulement glaciaire), a favorisé le remplissage par les sédiments de ces dépressions dans le socle rocheux. Ces profondeurs importantes de dépôts meubles ont d'ailleurs été observées lors du forage du puits 01020004 à La Conception (78 m), du puits 04060004 à Ferme-Neuve (45 m), et du puits 04060002 à Notre-Dame-du-Laus (47 m), ainsi que dans plusieurs puits municipaux (L'Ascension, La Conception, Brébeuf, Saint-Sauveur, pour ne nommer que ceux-ci). Dans la vallée de la rivière Rouge, les profondeurs importantes pourraient être expliquées par un changement de lithologie et la présence de la ligne de décrochement de Labelle (LDZ) (cf. section **3.4.2**).

Dans la majorité des zones de fortes épaisseurs, les sédiments forment un relief plat au fond de la vallée sur lequel les rivières s'écoulent. Cependant, dans la partie amont de la rivière Rouge, d'importants segments d'esker sont visibles (p.ex. : sur la topographie issue du LIDAR) en bordure ou au centre de la vallée. Dans le secteur de la municipalité de Mont-Tremblant, sur un axe est-ouest, des superficies importantes sont recouvertes de dépôts d'une épaisseur de 10 à 20 m. Ces sédiments font partie du complexe de la Moraine de Saint-Narcisse. En plus de former la moraine, la stagnation du front du glacier a mis en place des sédiments fluvioglaciaires dans les nombreuses grandes dépressions topographiques du secteur. Plus en aval, dans la vallée de la rivière du Nord, des épaisseurs de dépôts atteignant 40 m sont observées dans le secteur de Saint-Sauveur et jusqu'en amont de la ville de Saint-Jérôme. La zone amont des vallées des rivières du Lièvre et Kiamika comportent aussi des épaisseurs de dépôts meubles importantes, notamment à Ferme-Neuve, Mont-Laurier et Kiamika. Plus au Sud, c'est dans la région de Notre-Dame-du-Laus que se trouvent les épaisseurs de dépôts meubles les plus importantes. Finalement, au sud de la zone d'étude, des dépôts de 10 à 30 m d'épaisseur sont présents. Ils ont été mis en place lors de l'invasion marine de la mer de Champlain et ont couvert la zone des Basses-Terres de manière plus ou moins homogène. Une épaisseur de 27 m de dépôts meubles a été mesurée au lors de la mise en place du forage 04646001 au nord de la ville de Mascouche. La méthodologie utilisée pour calculer l'épaisseur des dépôts meubles est présentée à l'**ANNEXE D**.

3.7 Topographie du socle rocheux

Étant donné la faible épaisseur des dépôts meubles sur la grande majorité de la zone d'étude, la topographie du socle rocheux (**Figure 28**) est très similaire à la topographie de la surface du sol sur la majeure partie du territoire. Dans les Basses-Terres, le socle rocheux comporte deux dépressions, une au Sud-Ouest et une au nord-est. Dans le Bouclier canadien, les vallées de la rivière du Nord, de la rivière Rouge et de la rivière du Lièvre forment les principales dépressions dans la topographie du socle. La méthodologie utilisée pour calculer la topographie du socle rocheux est présentée à l'**ANNEXE D**.





3.8 Contextes hydrostratigraphiques des dépôts meubles

Les contextes hydrostratigraphiques de la région d'étude représentent la séquence verticale d'empilement des unités géologiques de dépôts meubles, vers le bas à partir de la surface (**Figure 29**). Puisque tous les contextes reposent sur le socle rocheux, celui-ci n'est pas mentionné dans la légende de la carte dans le but d'alléger la légende. La zone du PACES-LAULM est majoritairement couverte par des contextes hydrostratigraphiques de till sur roc et de sable et gravier reposants sur le till ou sur le socle rocheux. La forte présence de celui-ci est causée par les dépôts de till continu qui sont souvent remaniés. Ces dépôts ne constituent généralement pas de bons aquifères. Dans les Basses-Terres, les contextes sont plus variés, allant des affleurements rocheux comme les collines d'Oka, aux contextes plus complexes avec une séquence de sable et gravier/argile/till-roc ou une alternance de sable et gravier/argile/sable/till-roc dans le secteur de Mascouche. Plus au nord, c'est dans les vallées des grandes rivières que se trouvent les contextes hydrostratigraphiques les plus complexes avec, notamment des zones de sable et gravier/argile/sable et gravier/till/roc et des zones d'argile/sable et gravier/till-roc dans la portion aval de la rivière du Nord. Dans les parties les plus en amont des principaux cours d'eau, les épaisseurs d'argile diminuent et les contextes hydrostratigraphiques rencontrés sont surtout les sables et gravier sur till et roc. Des contextes till et roc sont observés dans la partie aval de la rivière Rouge. Dans la partie centrale de ce cours d'eau, des contextes plus complexes sont rencontrés avec des séquences sable et gravier/argile/sable et gravier/till-roc, tandis que plus en amont, l'argile laisse sa place aux séquences de sable et gravier sur till et roc. Les contextes hydrostratigraphiques de la portion aval de la rivière du Lièvre sont principalement de type sable et gravier/argile/sable/till-roc et gravier/till-roc. Plus en amont, on retrouve plus d'argile en surface et dans la vallée de la rivière Kiamika des contextes de sable et gravier/argile/sable et gravier/till-roc sont rencontrés. Dans l'ensemble, on retrouve des contextes hydrostratigraphiques complexes dans les vallées et à plusieurs endroits, des dépôts granulaires sont présents sous l'argile. Des dépôts granulaires perméables sont présents sur une grande proportion du territoire, pas seulement dans les vallées, et les contextes de till sur roc sont majoritaires.

3.9 Épaisseur des dépôts perméables en nappe libre

La carte des dépôts perméables en nappe libre illustre l'épaisseur des dépôts perméables, principalement des sables et graviers (**Figure 30**). S'ils sont saturés, ils pourraient former un aquifère si leur épaisseur est suffisante. Si ces dépôts ne sont pas saturés, comme, par exemple certaines sections de la moraine de Saint-Narcisse situées sur des crêtes de collines, ils ne forment pas un aquifère. Des dépôts perméables en nappe libre de 5 à 20 m d'épaisseur sont

présents sur une grande partie du territoire. Ces dépôts ne se trouvent pas seulement dans les vallées des trois grandes rivières, mais sont aussi présents dans plusieurs vallées de plus petits cours d'eau. Ils sont principalement composés de dépôts fluvio-glaciaires, de dépôts deltaïques et de dépôts littoraux. Les épaisseurs de dépôts dépassant 20 m sont localisées dans la partie centrale et dans la partie amont et la partie aval (dans la zone d'étude) de la rivière Rouge, dans la partie amont de la rivière du Lièvre et finalement dans la moraine de Saint-Narcisse.

3.10 Indices de confinement

La carte des indices de confinement illustre la localisation des zones avec des dépôts d'argile ou de silt de plus de 3 m correspondant à des conditions semi-captives, et de plus de 5 m correspondant à des conditions captives (**Figure 31**). Des dépôts perméables peuvent se trouver au-dessus ou au-dessous de ces dépôts, formant dans ce dernier cas, des aquifères granulaires en nappe captive.

Sur la zone d'étude, les Basses-Terres sont la zone où se trouve la plus grande superficie de zones captives. La partie est de ce secteur est majoritairement en conditions captives tandis qu'il y a plus d'hétérogénéités spatiales dans la partie ouest notamment en raison des collines d'Oka et de la remontée du socle rocheux. Dans la vallée de la rivière du Nord, les dépôts argileux continus créent des conditions de nappe captive. En amont de Saint-Adèle, la couverture de dépôts fins formée de silts d'origine lacustre plutôt que d'argile marine est plus éparse et forme des zones semi-captives. Dans la vallée de la rivière Rouge, les dépôts argileux sont présents de manière assez continue jusqu'à la hauteur de Labelle et forment des nappes captives (le gradient topographique de la rivière Rouge est plus faible que celui de la rivière du Nord, l'invasion marine s'est donc propagée moins en amont sur cette dernière). Une alternance de zones captives, semi-captives et libres se trouve le long des vallées de la rivière du Lièvre et de la rivière Kiamika. Les dépôts silteux et argileux s'étendent cependant plus au nord que dans le cas de la rivière Rouge étant donné le plus faible gradient d'altitude sur la rivière du Lièvre. En résumé, les zones captives sont prédominantes dans la partie des Basses-Terres et dans la partie aval de la rivière du Nord. Sur les rivières Rouge et du Lièvre, les zones captives sont en alternances avec des zones libres, malgré le fait que ces vallées aient été partiellement envahies par la mer de Champlain (élévation de ~236 m et moins). La présence de deltas marins, de moraines, d'esker et la topographie du roc expliquent cette hétérogénéité des niveaux de confinements.

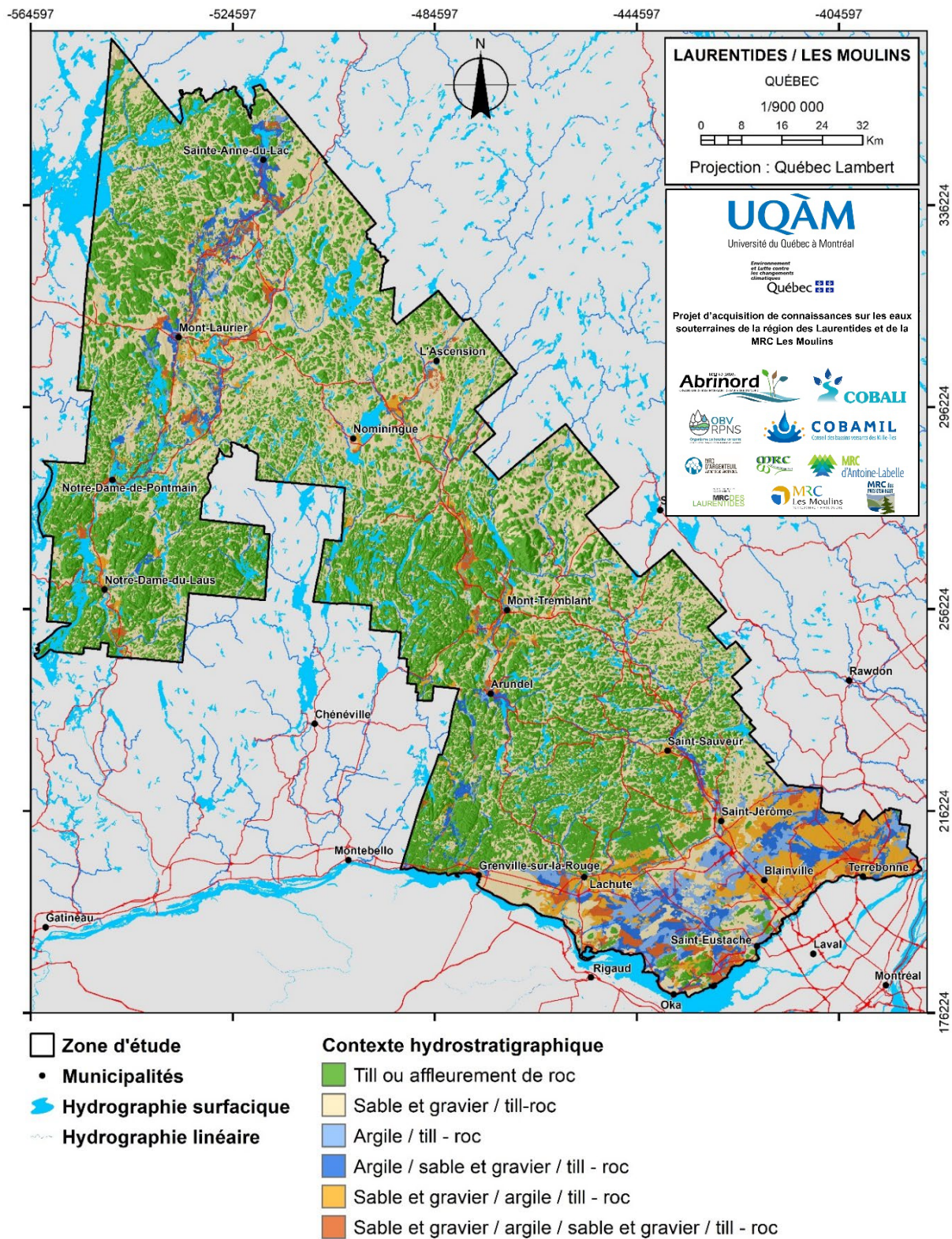


Figure 29 : Contextes hydrostratigraphiques





4 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

4.1 Propriétés hydrauliques

4.1.1 Essais hydrauliques disponibles pour les forages municipaux

Les données d'archive issues des rapports de consultants et gouvernementaux compilées dans le cadre de ce projet ont permis d'avoir accès à 51 valeurs de conductivité hydraulique, à 43 valeurs de transmissivité et à 24 valeurs de coefficients d'emmagasinement (**Tableau 16**). Les moyennes géométriques de conductivité hydraulique mesurée dans les dépôts meubles et dans le roc sont $2,9 \times 10^{-4}$ m/s et de $1,8 \times 10^{-6}$ m/s, respectivement. Celles des transmissivités varient de $4,3 \times 10^{-4}$ m²/s pour les puits dans les dépôts meubles et de $1,5 \times 10^{-4}$ m²/s pour les puits au roc. Étant donné que ces valeurs ont été obtenues dans le cadre de recherches pour des puits d'alimentation en eau potable, elles représentent principalement des valeurs pour des aquifères productifs et pourraient refléter la gamme supérieure des propriétés hydrauliques des aquifères de la région. Les valeurs de coefficients d'emmagasinement, moins nombreuses, car leur mesure nécessite au moins un puits d'observation durant l'essai de pompage, varient de 0,07 pour les sédiments et de 0,01 pour le roc.

Les données compilées pour (**Figure 32** et **Figure 33**) montrent une gamme de valeurs plus étroite pour les aquifères de dépôts meubles et pour ceux de roc fracturé. Cette différence majeure provient de la plus grande hétérogénéité du socle rocheux dont la conductivité hydraulique est contrôlée par le réseau de fractures, qui peut être très hétérogène à l'échelle locale, et par la conductivité hydraulique des sédiments.

Tableau 16: Moyennes géométriques de conductivités hydrauliques (K) et de transmissivités (T) et moyennes de coefficients d'emmagasinement (S) selon le type de géologie (rapports de consultants)

Type d'aquifère	K (m/s)	T (m ² /s)	S
Dépôts meubles	$2,9 \times 10^{-4}$ (23)	$4,3 \times 10^{-3}$ (14)	0,07 (5)
Roc fracturé	$1,8 \times 10^{-6}$ (28)	$1,5 \times 10^{-4}$ (29)	0,01 (19)

* Les valeurs entre parenthèses représentent le nombre de données disponibles.

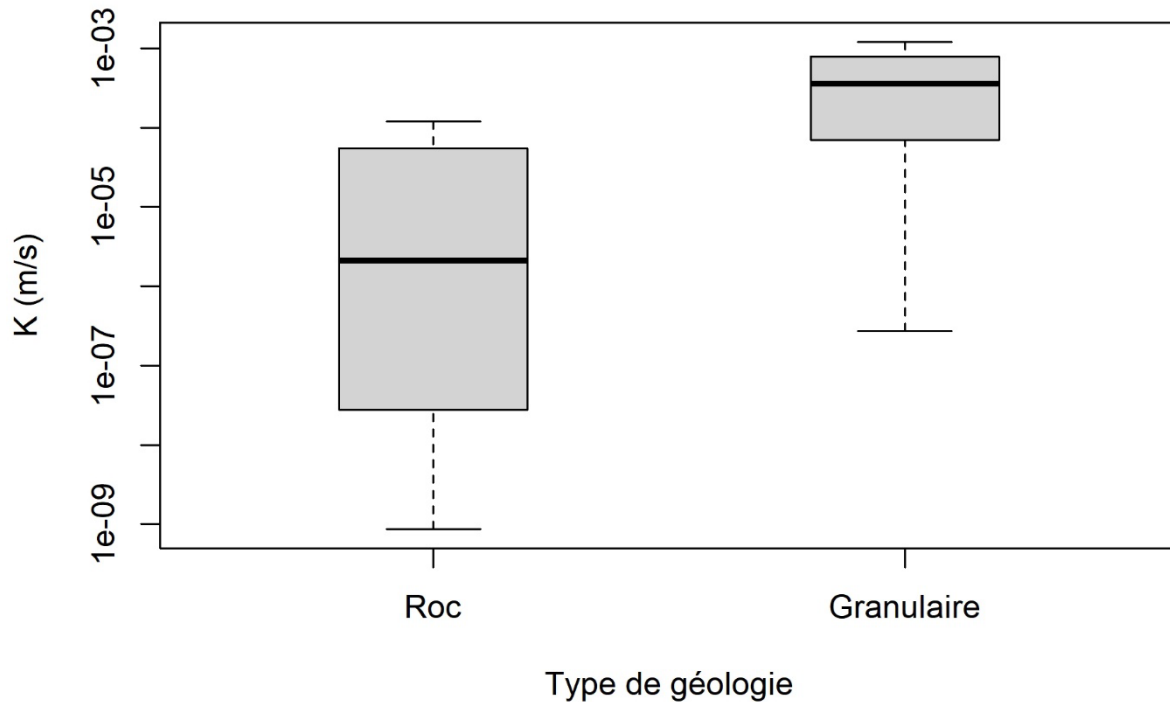


Figure 32 : Conductivités hydrauliques provenant des rapports de consultants et des rapports gouvernementaux pour les aquifères de roc fracturé et de dépôts meubles

4.1.2 Essais de pompage réalisés dans le cadre du projet

Les résultats des essais de pompage réalisés durant le projet indiquent des valeurs de conductivité hydraulique (K) pour les aquifères granulaires qui varient de $3,0 \times 10^{-4}$ m/s à $2,5 \times 10^{-6}$ m/s (**Tableau 17**). Pour le roc les valeurs mesurées varient de $8,1 \times 10^{-5}$ m/s à moins de $1,0 \times 10^{-7}$ m/s. Il est important de mentionner qu'au puits 0401003 (Morin-Heights), le débit pompé aurait pu être beaucoup plus important, mais les équipements disponibles au moment de l'essai ne permettaient pas un débit supérieur à 18 L/min. Les coefficients d'emmagasinement (S) varient quant à elles de 11 % à 17 % (deux mesures) pour les dépôts granulaires. Aucun coefficient d'emmagasinement n'a pu être obtenu dans le roc fracturé.

Tableau 17 : Résultats des essais de pompage réalisés dans le cadre du projet

Puits	Type d'aquifère	Confinement de la nappe	T moyen (m²/s)	K moyen (m/s)	S
RSESQ 4010003	Roc granitique	Libre	$1,6 \times 10^{-3}$	$8,1 \times 10^{-5}$	
RSESQ 4010004	Roc fracturé	Libre	$2,7 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$	
RSESQ 4010005	Roc fracturé	Libre	$< 1,0 \times 10^{-7}$	$< 1,0 \times 10^{-7}$	
RSESQ 4020002	Roc fracturé	Libre	$1,7 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-5}$	
RSESQ 4020003	Dépôts meubles	Libre	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-5}$	
RSESQ 4020004	Dépôts meubles	Captive	$4,7 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-6}$	
RSESQ 4020005	Dépôts meubles	Libre	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-5}$	0,105
RSESQ 4020006	Roc fracturé	Libre	$6,0 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-6}$	
RSESQ 4060002	Dépôts meubles	Semi-captive	$7,2 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	
RSESQ 4060003	Dépôts meubles	Libre	$3,0 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-4}$	0,167
RSESQ 4060004	Dépôts meubles	Captive	$5,2 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-7}$	
UQAM Arundel	Dépôts meubles	Libre	$9,0 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-4}$	

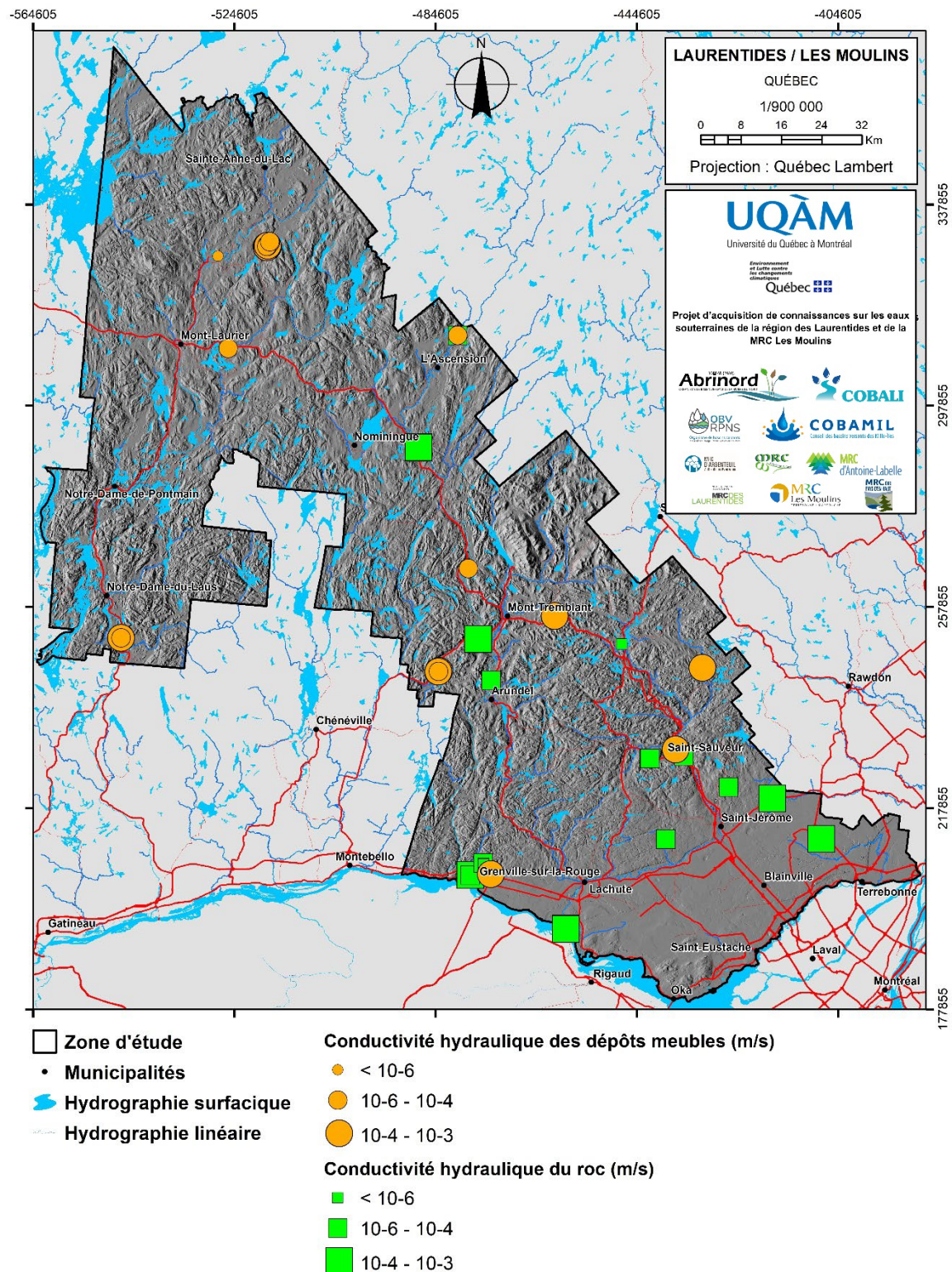


Figure 33 : Localisation et gamme de conductivités hydrauliques pour les aquifères de roc fracturé et les aquifères de dépôts meubles provenant des rapports de consultants et des rapports gouvernementaux

4.2 Piézométrie et écoulement

La carte des niveaux piézométriques (**Figure 34**) a été générée par l'interpolation spatiale de 38 300 points de mesure du niveau d'eau provenant du SIH (MELCC, 2018a), de la base de données du RSESQ et de rapports de consultants. Les points de mesure se situent principalement dans les vallées et au sud du territoire, plus précisément au sud de la municipalité de Mont-Tremblant. Les cours d'eau ayant une connexion potentielle ou connue avec l'aquifère ont aussi été utilisés comme points de forçage lors de l'interpolation (niveau piézométrique égal à la topographie), notamment aux rivières Gatineau, du Lièvre, Rouge, du Nord, Mascouche et du Chêne, et à leurs principaux affluents. Aucun forçage aux cours d'eau n'a été imposé dans les Basses-Terres du Saint-Laurent ou d'importantes épaisseurs d'argile entraînent une déconnexion entre le réseau hydrographique de surface et l'aquifère. L'interpolation a été réalisée avec la profondeur du niveau piézométrique et la carte piézométrique a été obtenue en soustrayant la profondeur du MNT. La carte piézométrique combine les charges hydrauliques dans les aquifères rocheux et celles dans les aquifères granulaires, en suppose une connexion hydraulique entre les deux.

Les niveaux piézométriques sur la zone d'étude varient d'une altitude maximale de 911 m sur les plus hauts sommets (secteur du Parc national du Mont-Tremblant et de la municipalité de Val-des-Lacs) à moins de 50 m près de la rivière des Outaouais et la rivière des Mille-Îles. La profondeur moyenne du niveau par rapport au sol est de 9,2 m (médiane 6,1 m). Dans les secteurs accidentés, les directions d'écoulement sont très variables spatialement et s'orientent des secteurs de topographie élevée vers les vallées et les rivières. Les données indiquent qu'il n'existe pas d'écoulement régional important du nord de la zone d'étude vers le fleuve. L'eau souterraine s'écoule plutôt des sommets vers les vallées pour ensuite faire résurgence dans les rivières ou encore, sous un faible gradient hydraulique, vers le fleuve parallèlement aux rivières principales. Un écoulement régional nord-ouest/sud-est cependant observable à partir des zones au nord de Saint-Sauveur vers les Basses-Terres. Le gradient hydraulique régional est de 0,0013 entre l'Ascension et Lachute, tandis qu'il est plus faible du côté de la rivière du Lièvre, avec une valeur de 0,0006 dans l'axe Sainte-Anne-du-Lac – Notre-Dame-du-Laus.

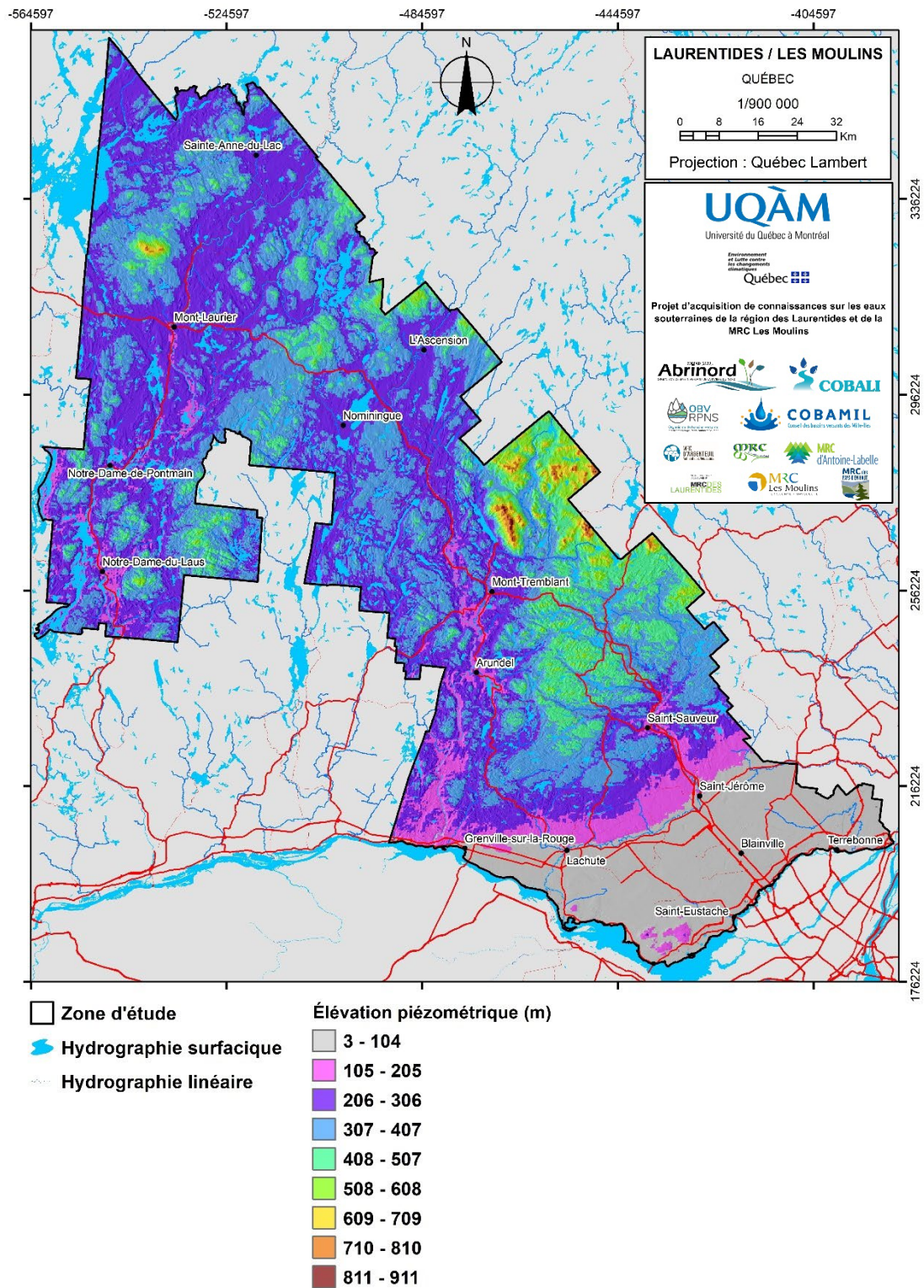


Figure 34 : Élévation piézométrique de l'eau souterraine

4.3 Coupes hydrostratigraphiques

Étant donné la très grande superficie de la zone d'étude, des coupes représentant les principaux contextes hydrostratigraphiques de six zones, soit les secteurs amont et aval de la rivière du Lièvre, les secteurs amont et central de la rivière Rouge, la zone centrale de la rivière du Nord et la zone de la MRC Les Moulins. Les coupes représentent une simplification de la stratigraphie des dépôts meubles et ont été détaillées à l'aide des données disponibles sur l'hydrogéologie régionale et les modèles conceptuels de la géologie du Quaternaire. La localisation des coupes est présentée à la **Figure 35**.

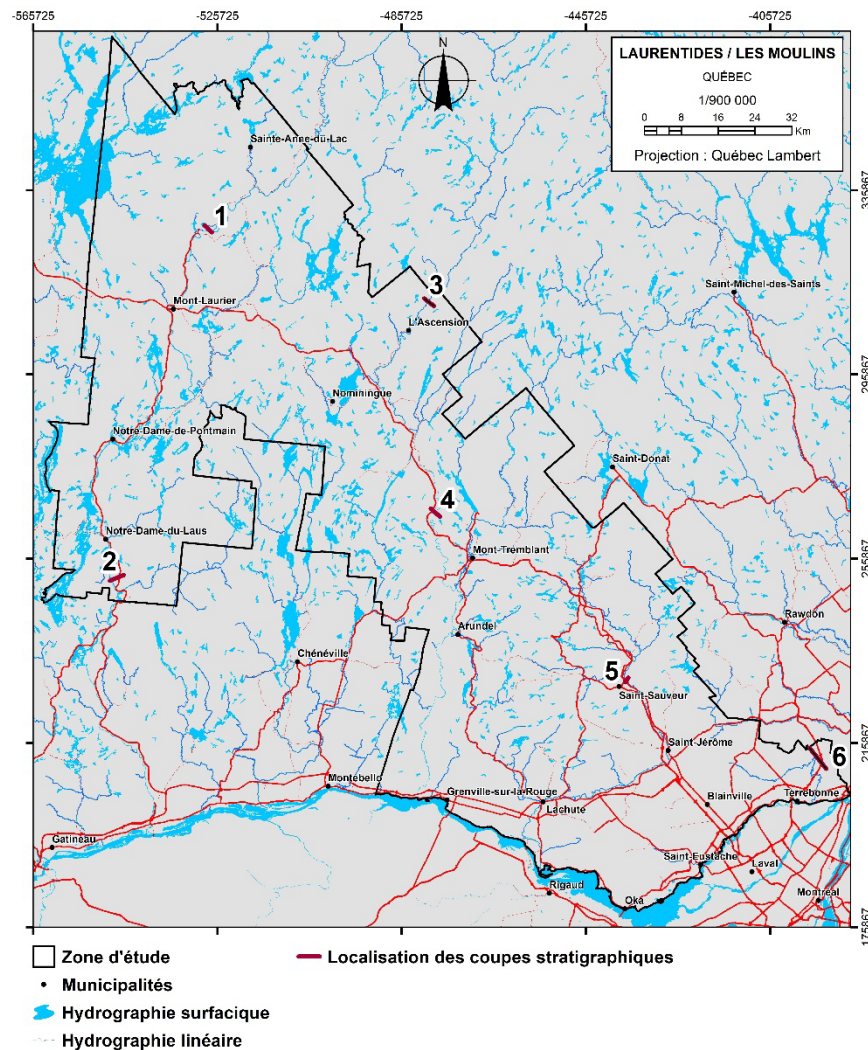


Figure 35 : Localisation des coupes hydrostratigraphiques

4.3.1 Rivière du Lièvre – secteur amont de la zone d’étude (# 1)

La mise en place du forage 04060004 à l’été 2019 a permis de mettre à jour une séquence stratigraphique inattendue dans le secteur amont de la zone d’étude sur le bassin de la rivière du Lièvre (**Figure 36**).

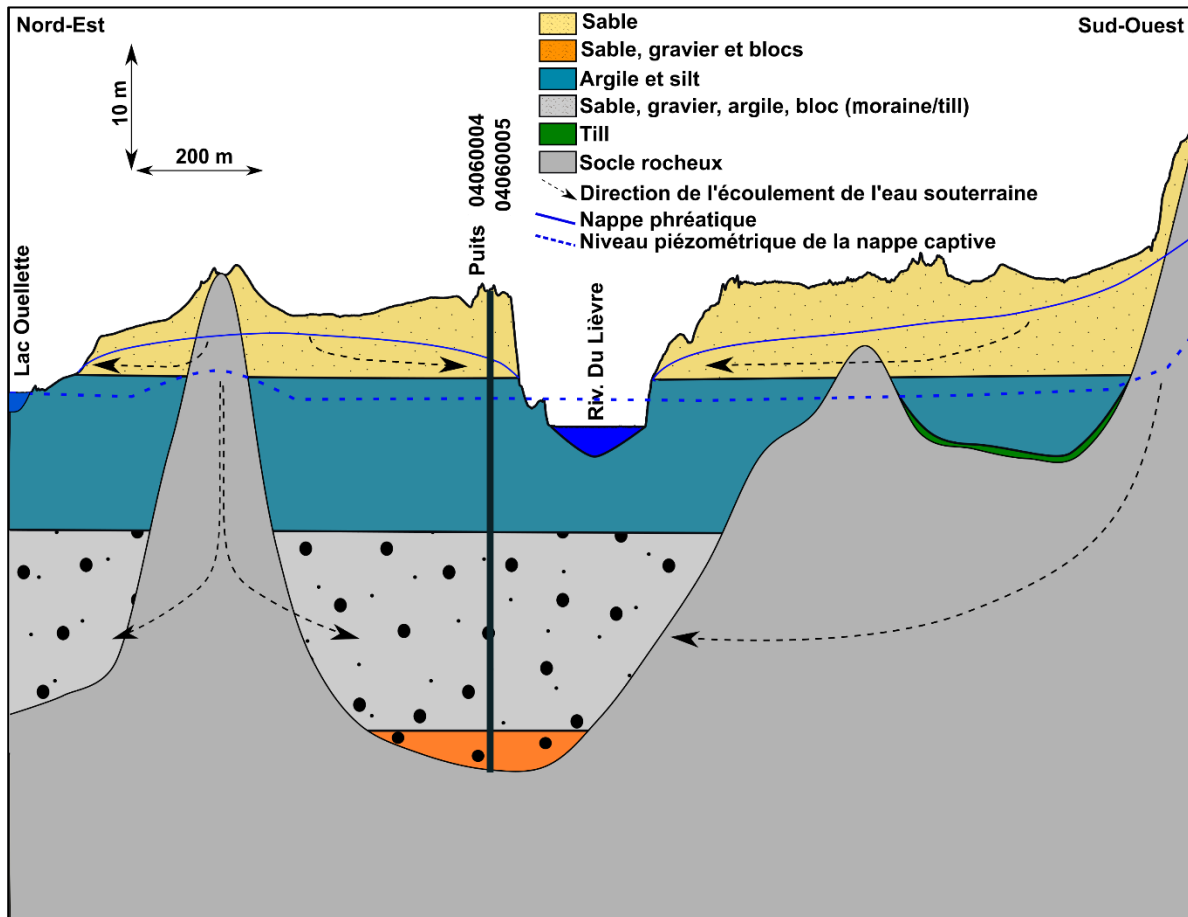


Figure 36 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière du Lièvre dans le secteur de Ferme-Neuve et du puits RSESQ 04060004

Des dépôts de sable, gravier et blocs ont été rencontrés sous les dépôts argileux et silteux qui forment un aquitard recouvrant une partie importante de la vallée de la Lièvre. Ces dépôts constituent probablement les vestiges d’un front de moraine ou simplement une accumulation importante de till. Le niveau de l’eau souterraine dans cette unité sédimentaire perméable indique que la nappe qui s’y trouve est en condition captive. La séquence stratigraphique suggère que la rivière du Lièvre n’est pas en connexion hydraulique avec cette unité, même si le niveau piézométrique est plus élevé que celui de la rivière. Les données stratigraphiques indiquent également que le lac Ouellet est en lien hydraulique avec l’aquifère de surface formé par les

dépôts littoraux composés de sable et n'est pas connecté hydrauliquement avec les sédiments sous l'argile. Dans l'aquifère superficiel, l'eau souterraine s'écoule des hauts topographiques vers les cours d'eau. Dans les dépôts sous l'argile, l'eau provient des zones de recharge où le roc affleure. Elle s'écoule ensuite vers les vallées, mais aussi de manière perpendiculaire à celles-ci, vers l'aval de la rivière. Dans ce secteur, il y a peu d'échange entre la rivière et l'eau souterraine. Cependant, il est probable qu'à certains endroits, en amont ou en aval, la couche d'argile soit moins épaisse et que la rivière soit en contact plus étroit avec les sédiments littoraux et les alluvions en surface.

4.3.2 Rivière du Lièvre – secteur aval de la zone d'étude (# 2)

La **Figure 37** illustre la coupe hydrostratigraphique à la hauteur du puits RSESQ 04060002 à Notre-Dame-du-Laus. Les données de forage indiquent une importante épaisseur de sable de près de 30 m surmontant une couche d'argile et des dépôts fluvioglaciaires ont été observés à la base de la séquence. Les variations brusques de la topographie sont causées par des dépôts éoliens ayant formé des dunes. Les dépôts sableux en surface forment un important aquifère à nappe libre. Dans la partie gauche de la coupe, le niveau de l'eau souterraine est maintenu près de la surface par les milieux humides et le roc fracturé (faible conductivité hydraulique). Le niveau de l'eau souterraine dans l'aquifère captif formé par les dépôts fluvioglaciaires situés sous l'argile est pratiquement le même que dans l'aquifère de surface. Ceci suggère que la couche d'argile est discontinue et qu'il y a des échanges d'eau souterraine entre l'eau du socle rocheux, le sable de surface et les dépôts fluvioglaciaires. L'eau souterraine s'écoule des affleurements rocheux vers la rivière du Lièvre. Peu d'information stratigraphique est disponible dans la zone près de la rivière, mais l'altitude du sommet de l'argile mesuré au puits 04060002 suggère que la rivière du Lièvre coule sur l'argile, mais qu'elle est en contact étroit avec l'aquifère superficiel.

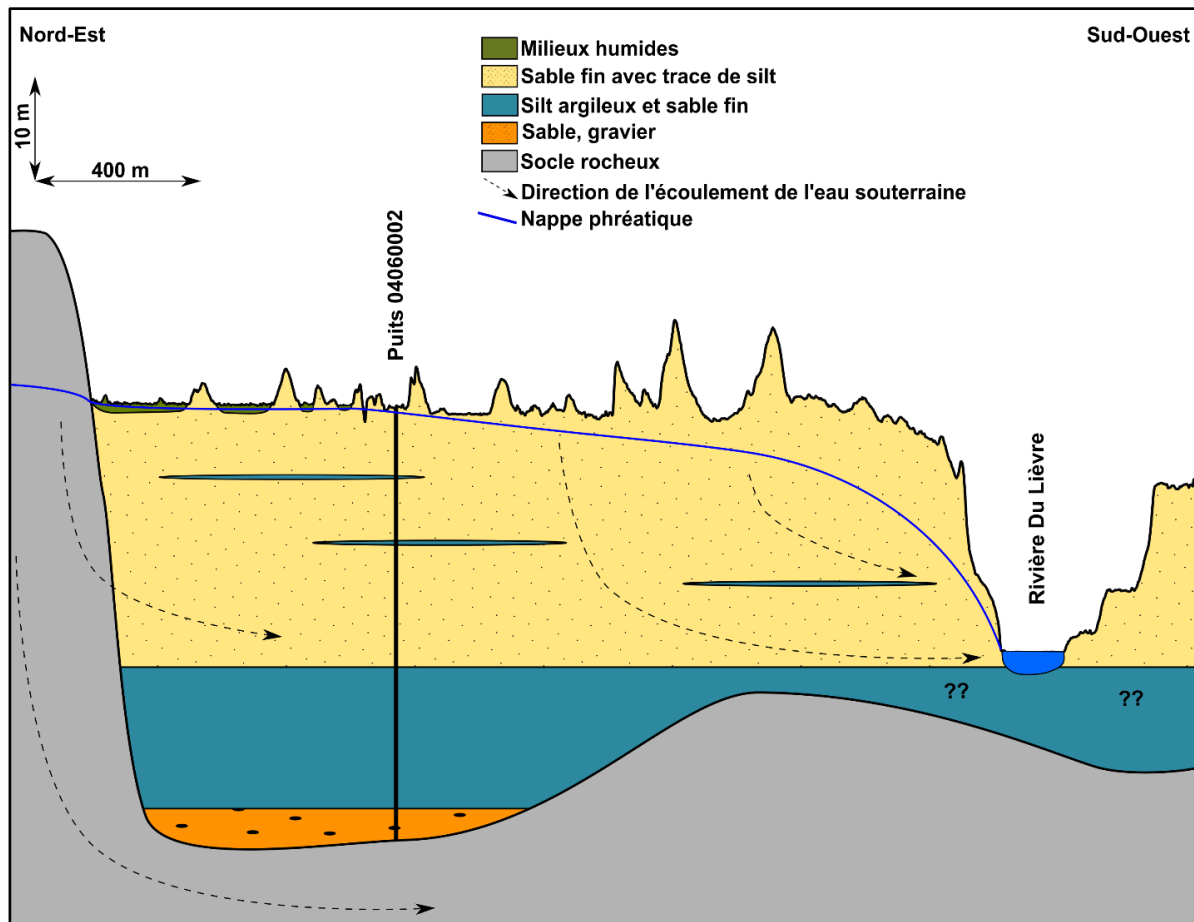


Figure 37 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière du Lièvre dans le secteur de Notre-Dame-du-Laus et du puits RSEQ 04060002

4.3.3 Rivière Rouge – secteur amont de la zone d’étude (# 3)

La zone amont de la rivière Rouge sur la zone d’étude est composée d’une large vallée comblée de dépôts d’origine fluvioglaciaire (esker, gravier, sable et bloc) et de dépôts alluvionnaires déposés par la rivière Rouge. La **Figure 38** montre une coupe nord-est/sud-ouest à la hauteur du puits RSEQ 0402002 dans la municipalité de L’Ascension. Ce puits est installé dans une formation de sable et gravier avec blocs. Des milieux humides sont présents dans l’ancien méandre de la rivière Rouge. Le niveau de l’eau souterraine au puits 0402002 se situe en moyenne à 15 m sous la surface du sol. Les données indiquent que la rivière Rouge est en lien direct avec l’aquifère de la vallée. Les milieux humides présents sur la rive gauche maintiennent le niveau de l’eau souterraine près de la surface comparativement à la rive droite où aucun milieu humide n’est présent.

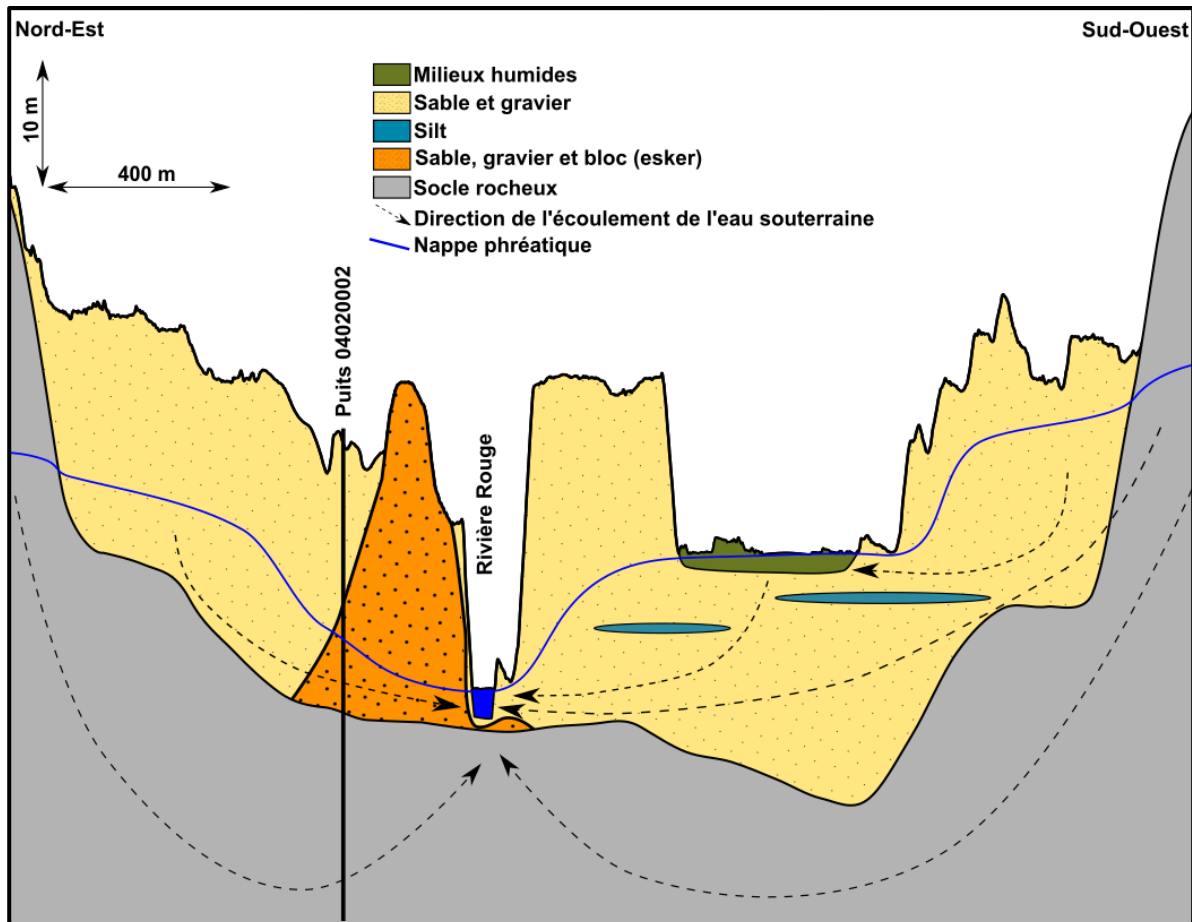


Figure 38 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière Rouge dans le secteur de L'Ascension et du puits RSEQ 04020002

4.3.4 Rivière Rouge – secteur centre de la zone d'étude (# 4)

Plus en aval, les dépôts argileux sont présents et forment des aquitards sous lesquels on retrouve des aquifères en condition captive. La **Figure 39** montre une coupe hydrostratigraphique à la hauteur du puits RSEQ 04020004 dans la municipalité de La Conception. Dans ce secteur l'épaisseur des dépôts meubles atteint près de 80 m d'épaisseur. Une unité de sable de plus de 25 m d'épaisseur est superposée à une unité de silt argileux de plus de 30 m qui recouvre des dépôts fluvioglaciaires. L'eau souterraine s'écoule des sommets rocheux vers les sédiments, mais aussi à partir de la recharge au sein de la zone sédimentaire, vers la rivière Rouge tandis que l'aquifère captif est principalement alimenté par l'eau du socle rocheux. Toutefois, à certains endroits, la couche aquitard pourrait être absente et permettre des échanges entre l'aquifère de surface et l'unité sédimentaire profonde. Des milieux humides sont présents sur la rive gauche

dans les anciens méandres de la rivière Rouge et contribuent à maintenir le niveau de l'eau souterraine près de la surface.

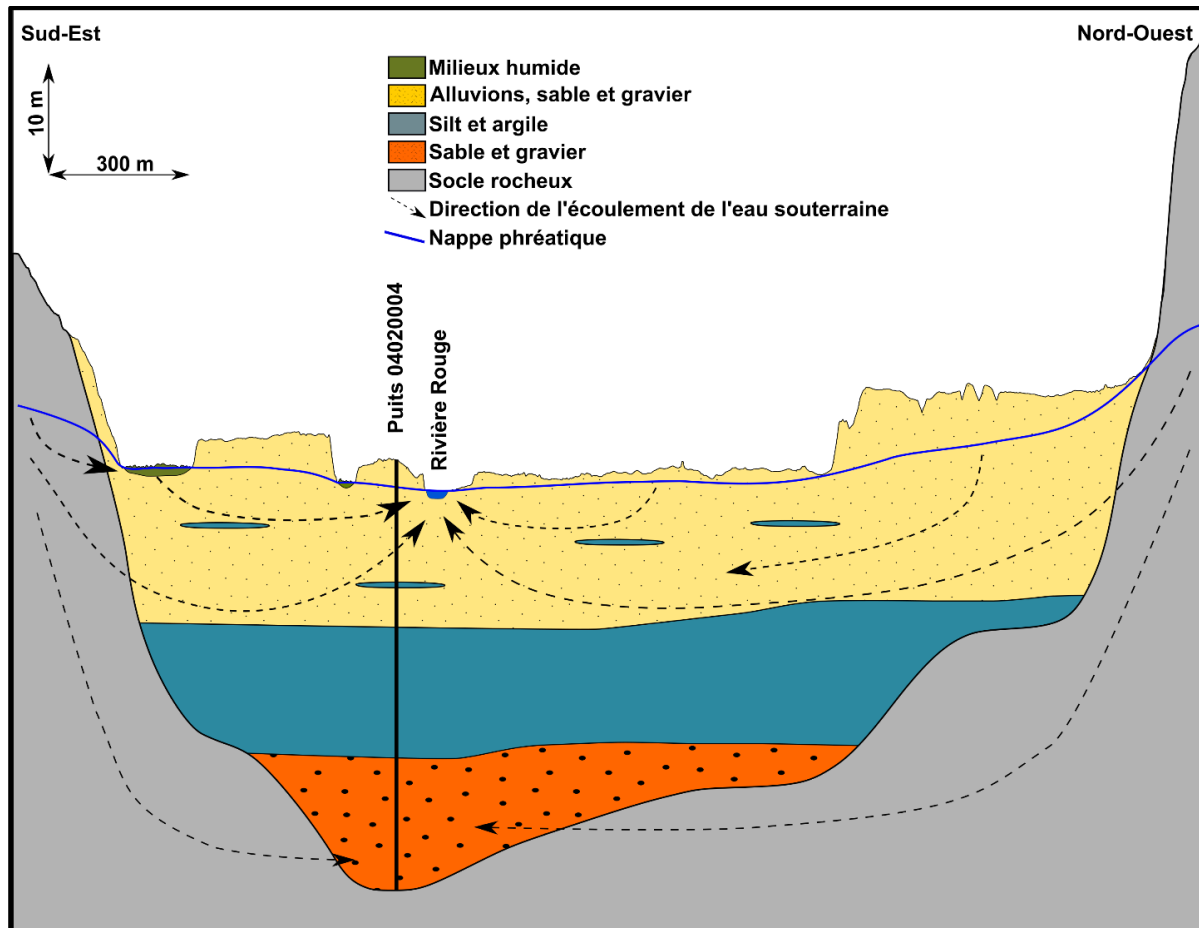


Figure 39 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière Rouge dans le secteur de La Conception et du puits RSESQ 04020004

4.3.5 Rivière du Nord – secteur aval de la zone d'étude (#5)

La vallée de la rivière du Nord est plus étroite que les vallées des rivières du Lièvre et Rouge. La **Figure 40** montre la coupe hydrostratigraphique de la vallée de la rivière du Nord à la hauteur des puits d'alimentation en eau potable de la municipalité de Saint-Sauveur. Dans cette zone, les dépôts argileux dominant en surface et sont limités à la vallée. Ces dépôts forment un aquitard qui recouvre des dépôts d'origine fluvioglaciale qui sont exploités par les municipalités de Saint-Sauveur et de Piedmont. L'eau souterraine s'écoule à partir de la recharge sur le socle rocheux vers la rivière du Nord et ensuite parallèlement à la rivière vers l'aval. Certaines zones de dépôts

fluvioglaciaires sont en conditions de nappe libre et reçoivent la recharge directement de la surface. Les données n'indiquent pas clairement si la rivière du Nord est en lien hydraulique avec l'aquifère sous-jacent.

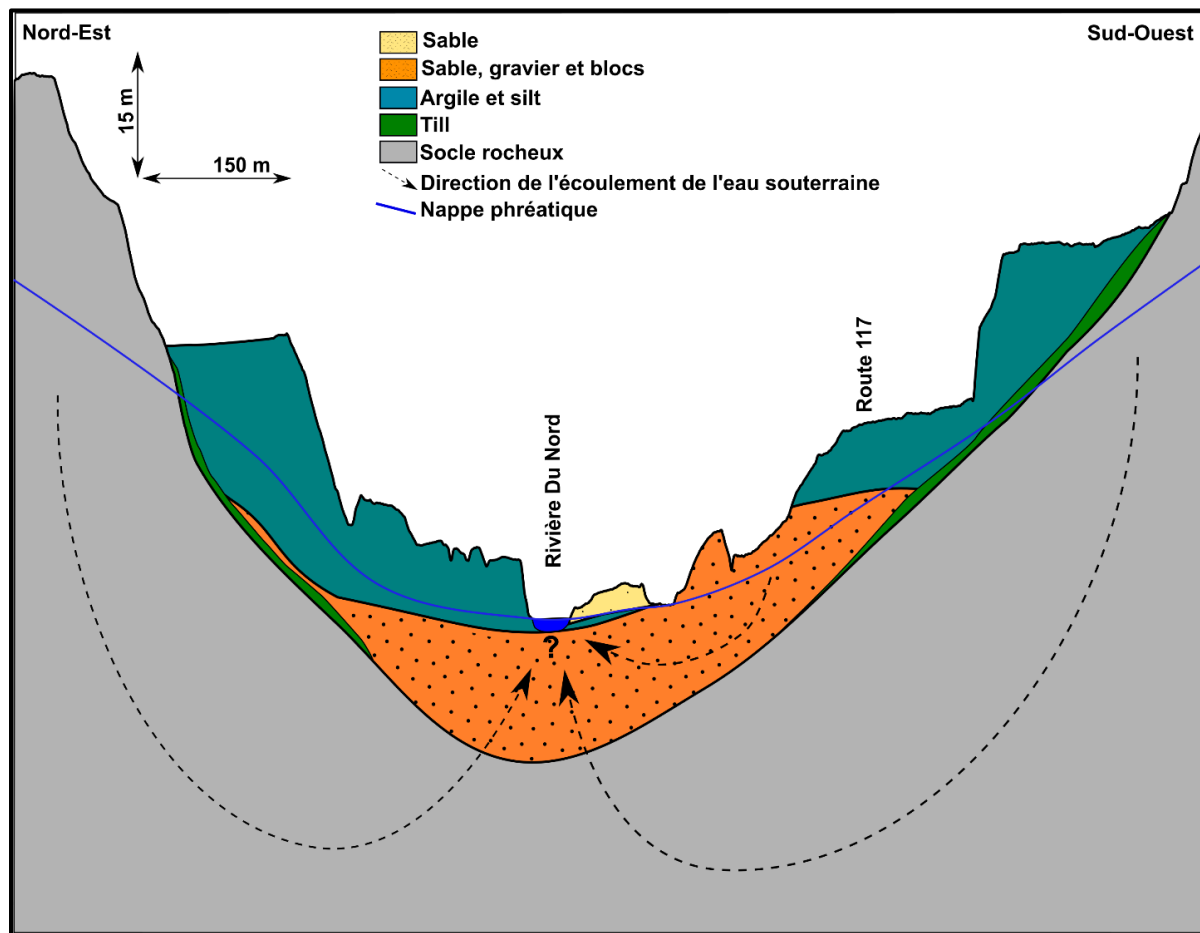


Figure 40 : Coupe nord-est/sud-ouest de la vallée de la rivière du Nord dans le secteur des puits d'alimentation en eau potable de Saint-Sauveur

4.3.6 MRC Les Moulins – secteur aval de la zone d'étude (# 6)

Le secteur des Basses-Terres du Saint-Laurent de la zone d'étude est caractérisé par d'importantes épaisseurs d'argile qui recouvrent le socle rocheux composé de calcaire (**Figure 41**). Ces calcaires forment un aquifère confiné. Des dépôts sableux d'origine littorale sont présents dans la partie basse de la coupe. L'eau souterraine de ces dépôts s'écoule à la fois vers le fleuve Saint-Laurent et vers le ruisseau des Grandes-Prairies (bassin versant de la rivière Mascouche). Dans l'aquifère du roc fracturé, l'eau souterraine s'écoule du Nord-Ouest vers le fleuve Saint-

Laurent. La zone de recharge de ce secteur est située plus au nord où les dépôts argileux disparaissent. La coupe passe par le puits RSESQ 04646001 dans lequel le niveau de l'eau souterraine à cet endroit se situe à 25 m de profondeur. Finalement, les cours d'eau du secteur ne sont pas alimentés par l'aquifère du socle rocheux, mais plutôt par les quelques zones où des dépôts sableux sont présents en surface.

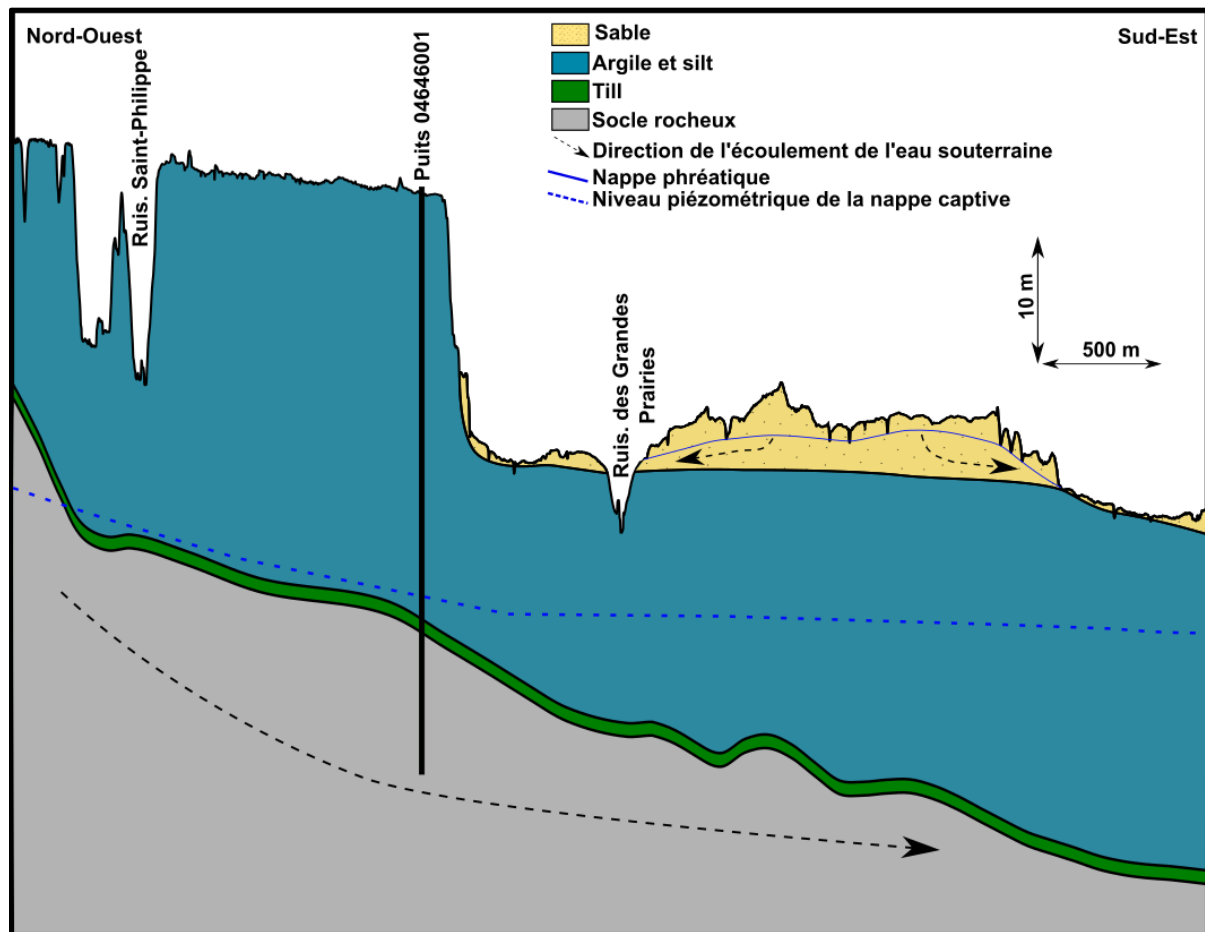


Figure 41 : Coupe nord-ouest/sud-est dans la MRC Les Moulins dans le secteur du puits RSESQ 040646001

4.4 Recharge

4.4.1 Débits obtenus par séparation des hydrogrammes

L'application de filtres récursifs sur les séries temporelles de débits permet de séparer les débits de base des débits totaux. À l'échelle annuelle et mensuelle, les débits de base calculés avec ces filtres fournissent une estimation de la recharge sur le bassin versant, selon l'hypothèse que toute la recharge sur un bassin versant fait résurgence à l'exutoire du cours d'eau. Les filtres utilisés sont ceux développés par Lyne et Hollick (1979) et par Eckhardt (2005 ; 2008). Les débits d'étiage ont également été estimés avec le Q_{90} , c.-à-d. la valeur correspondant au 90^e quantile (10^e percentile) du débit annuel pour une station donnée. Les trois méthodes ont été appliquées sur les données de cinq stations hydrométriques, deux sur le bassin versant de la rivière du Nord, deux sur le bassin versant de la rivière Doncaster (un affluent de la rivière du Nord) et une sur le bassin versant de la rivière du Chêne (**Tableau 18** et **Tableau 19**). Ces stations ont été sélectionnées parmi les nombreuses stations sur la zone d'étude (cf. section 2.3.2), car elles sont peu ou pas influencées par un barrage. Les paramètres calibrés pour les méthodes de Lyne et Hollick (1979) et Eckhardt (2005) varient légèrement d'une station à l'autre et sont légèrement plus faibles sur les deux stations de la rivière du Nord.

Les débits de base sont assez similaires avec les trois méthodes. Ils varient en moyenne de 198 à 333 mm/an avec le filtre de Lyne et Hollick (1979), de 230 à 346 mm/an avec le filtre de Eckhardt (2005) et de 158 à 345 mm/an avec la méthode du Q_{90} . Le débit de base de la station sur la rivière du Chêne est le plus faible avec les trois méthodes et le débit de base de la station de la rivière du Nord est le plus élevé avec les trois méthodes.

Tableau 18 : Paramètres utilisés pour les filtres récursifs pour les cinq stations étudiées

Station (rivière)	α_e	BFI_{max}	α_L
40110 (du nord)	0,922	0,5	0,944
40122 (du nord)	0,930	0,5	0,944
40129 (Doncaster)	0,945	0,5	0,944
40132 (Doncaster)	0,945	0,5	0,944
46709 (du Chêne)	0,959	0,5	0,945

Note : α_e est la constante de récession et BFI_{max} est la valeur maximale que peut atteindre le ratio du débit de base par rapport au débit total journalier utilisé dans le filtre récursif d'Eckhardt (2005) ; α_L est la constante de récession dans le filtre récursif de Lyne et Hollick (1979).

Les débits de base obtenus à la suite de l'application des trois méthodes décrites plus haut varient de 102 à 560 mm/an. Le débit de base moyen varie quant à lui de 158 à 352 mm/an (**Tableau**

19). Le débit de base est plus faible sur le bassin de la rivière du Chêne. Cette rivière est située dans les Basses-Terres du Saint-Laurent où les dépôts argileux sont plus importants ce qui limite grandement la recharge. Pour les trois autres stations, les débits de base calculés avec les trois méthodes sont relativement semblables. Les caractéristiques morphologiques et hydrogéologiques de ces bassins sont similaires, il est donc normal que le débit de base ne varie que faiblement d'un bassin à l'autre. En utilisant les trois méthodes, le débit de base annuel moyen pour le secteur du Bouclier canadien est de 315 mm/an, tandis qu'il est de 195 mm/an pour le secteur des Basses-Terres du Saint-Laurent.

Tableau 19 : Débits de base minimums, moyens et maximums estimés avec les filtres récurifs et le Q_{90} pour les cinq stations étudiées

		Débit de base (mm/an)*				
		40110	40122	40129	40132	46709
Lyne et Hollick (2013)	Minimum	200	226	228	117	102
	Moyenne	315	333	313	263	198
	Maximum	460	442	366	326	207
Eckhardt (2005 ; 2008)	Minimum	184	235	239	199	155
	Moyenne	320	346	320	285	230
	Maximum	457	460	404	360	301
Q_{90}	Minimum	212	230	236	190	122
	Moyenne	345	352	308	283	158
	Maximum	561	506	363	392	204

* Les débits de base en m^3/s ont été transformés en mm/an en divisant par la superficie du bassin versant de la station.

4.4.2 Recharge par analyse des fluctuations de niveaux de nappe

Les séries temporelles du niveau de l'eau souterraine peuvent aussi être analysées pour obtenir une estimation du taux de recharge. Bien que fournissant des résultats très locaux, cette méthode est un outil supplémentaire qui permet l'intercomparaison des méthodes. Le calcul est réalisé à partir des chroniques de niveaux de nappe provenant de puits d'observation installés dans des aquifères en nappe libre et est basé sur l'hypothèse que les fluctuations de niveau d'eau souterraine sont directement causées par la recharge provenant des précipitations (Healy et Scanlon, 2010). La méthode a été utilisée avec les données des 11 puits du RSESQ instrumentés sur la zone d'étude (incluant certains des nouveaux puits installés dans le cadre du projet). Les recharges sont calculées à l'aide la récession de l'hydrogramme de puits pour tous les événements pluvieux. Le coefficient d'emménagement (S), un paramètre nécessaire pour utiliser la méthode, a été estimé à partir des données de la littérature et des valeurs mesurées au cours des essais de pompage lorsqu'elles étaient disponibles. Les détails de l'application de la

méthode peuvent être consultés dans le mémoire de maîtrise de Jonathan Chabot-Grégoire (2022). Les taux de recharge moyens varient de 257 à 469 mm/an pour les aquifères de dépôts meubles et de 78 à 343 mm/an pour les aquifères de roc fracturé (**Tableau 20**). Les valeurs maximales et minimales couvrent une large gamme de recharge, reflétant l'incertitude sur les valeurs de S pour chacun des sites. Aux puits 04020005 et 04060003, un essai de pompage réalisé dans le cadre du PACES a permis de calculer une valeur de S. Le taux de recharge obtenu en utilisant cette valeur est 196 mm/an ce qui est très près de la valeur moyenne de 223 mm/an.

Tableau 20 : Taux de recharge estimés par la méthode de fluctuations des niveaux d'eau souterraine

Puits	Géologie	Recharge moyenne mm/an (min - max)
RSESQ 04010001	Roc fracturé calcaire	78 (60-149)
RSESQ 04020001	Gravier	444 (197-690)*
RSESQ 04020003	Sable et gravier	257 (162-352)
RSESQ 04020005	Sable	394 (240-548)*
RSESQ 04060003	Sable	223 (117-328)
RSESQ 04300001	Roc fracturé de shale et de dolomie	94 (54-134)
RSESQ 04300014	Sable	469 (343-594)
RSESQ 04640001	Roc fracturé de quartzite	343 (148-538)
UQAM Arundel	Sable et gravier	301 (190-412)

*Lien potentiel avec les eaux de surface.

4.4.3 Recharge spatialisée simulée par bilan hydrique spatialisé

Dans le cadre du projet PACES-LAULM, la recharge potentielle spatialement distribuée a été calculée pour toute la zone d'étude à l'aide du modèle HydroBudget (HB ; Dubois et al, 2021 ; **Figure 42**). Ce modèle permet de simuler la recharge potentielle, c.-à-d. celle qui pourrait atteindre la nappe en l'absence de dépôts peu perméables en profondeur, avec un pas de temps mensuel sur un maillage de 500 m x 500 m. Le développement et la calibration du modèle ont été réalisés dans le cadre du projet de maîtrise de Jonathan Chabot Grégoire (voir résumé du mémoire à l'**ANNEXE L**). HB est basé sur un bilan hydrique vertical qui prend en compte le type de sol, la pente et l'utilisation du sol.

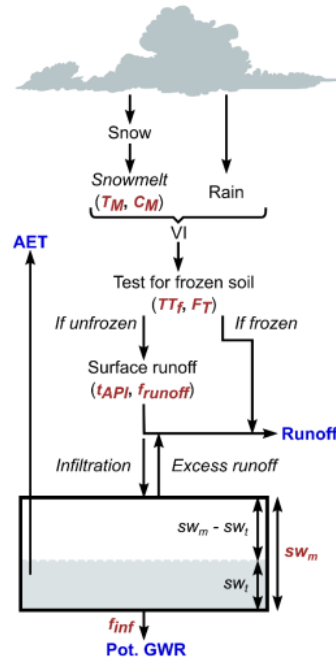


Figure 42 : Fonctionnement du modèle HydroBudget utilisé pour calculer la recharge potentielle (Dubois et al., 2021)

Le modèle a été calibré en utilisant les données de quatre stations hydrométriques non influencées par un barrage important sur le bassin versant de la rivière du Nord et ses sous-bassins (stations 40110, 40122, 40129, 40132). La calibration a été réalisée à la fois sur les débits totaux mensuels et sur les débits de base mensuels. Les débits totaux et de base ont été divisés en deux périodes, soit 1/3 pour la calibration du modèle et 2/3 pour la validation. Pour la station 40110 située la plus en aval sur le bassin versant de la rivière du Nord, la meilleure calibration donne un coefficient d'efficacité de Klinge-Gupta (KGE ; Gupta et al., 2009) en période de calibration de 0,68 (KGE combiné : 60% débit de base, 40% débit total). Les KGE sont de qualité similaire en période de validation, avec des différences allant de -0,04 à +0,08 points de KGE (KGE combiné : 60% débit de base, 40% débit total). En période de calibration, l'erreur quadratique moyenne (EQM) est 24,8 mm/mois pour les débits totaux et 11,7 mm/mois pour les débits de base. En période de validation, l'EQM est 28,1 mm/mois pour les débits totaux et de 13,7 mm/mois pour les débits de base (**Tableau 21**).

Tableau 21 : Périodes et statistiques de calibration du modèle HydroBudget sur le bassin versant de la rivière du Nord

Station	Période de calibration		Période de validation		Calibration			Validation		
					KGE*	EQM (mm/mois)		KGE*	EQM (mm/mois)	
						Q _{tot}	Q _{base}		Q _{tot}	Q _{base}
40110	1961	1998	1999	2017	0.68	24.8	11.7	0.64	28.1	13.7
40122	1971	2002	2003	2017	0.64	27.7	11.7	0.64	30.5	12.8
40129	1981	1991	1992	1996	0.62	33.7	11.7	0.68	28.6	11.2
40132	1994	2009	2010	2017	0.62	21.3	9.8	0.70	22.4	9.3

* KGE combiné → 60% débit de base et 40% débit total

Les paramètres du modèle HydroBudget identifiés par la calibration sur le bassin versant de la rivière du Nord ont été utilisés pour simuler la recharge spatialisée sur toute la zone du PACES-LAULM pour la période 1961-2017 (**Figure 43**). La recharge moyenne pour toute la zone d'étude est 198 mm/an (médiane = 221 mm/an), et varie entre 0 et 468 mm/an dans l'espace. Sur une grande partie de la zone d'étude, la recharge annuelle moyenne varie entre 200 et 300 mm/an. Les zones où la recharge potentielle est la plus élevée correspondent aux secteurs d'aquifère granulaire en nappe libre, comme les sections amont et centres de la rivière Rouge, la partie amont du bassin versant de la rivière du Nord, et le secteur amont de la rivière du Lièvre, à la limite de la zone d'étude. Les zones de faible recharge se trouvent où les dépôts argileux affleurent, comme dans la vallée de la rivière du Nord et dans la MRC Les Moulins. Entre 1961 et 2017, la recharge annuelle médiane a varié de 150 mm/an à près de 320 mm/an pour les années les plus humides (**Figure 44**). La recharge potentielle mensuelle médiane varie entre 0 mm/mois (certaines zones ne reçoivent pas de recharge, comme les zones urbaines, ou les étendues d'eau et 58 mm/mois (recharge printanière d'avril) (**Figure 45**). La variation interannuelle de la recharge mensuelle est plus grande pendant la période printanière, car la fonte de la neige débute à des moments différents d'une année à l'autre. Elle est beaucoup plus faible pendant les mois de juillet à septembre, alors que l'évapotranspiration contrôle la recharge.

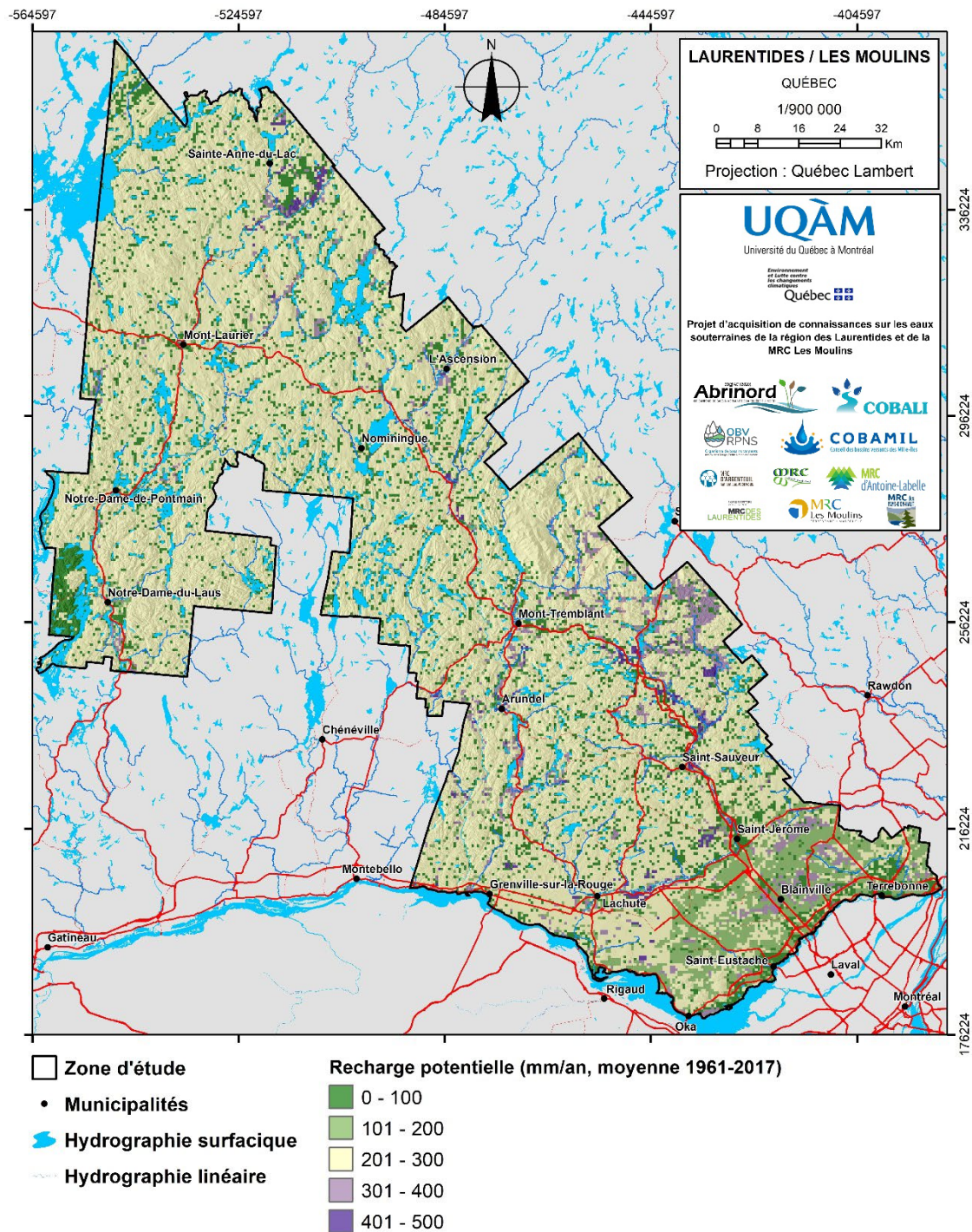


Figure 43 : Répartition spatiale de la recharge potentielle moyenne annuelle de 1961 à 2017

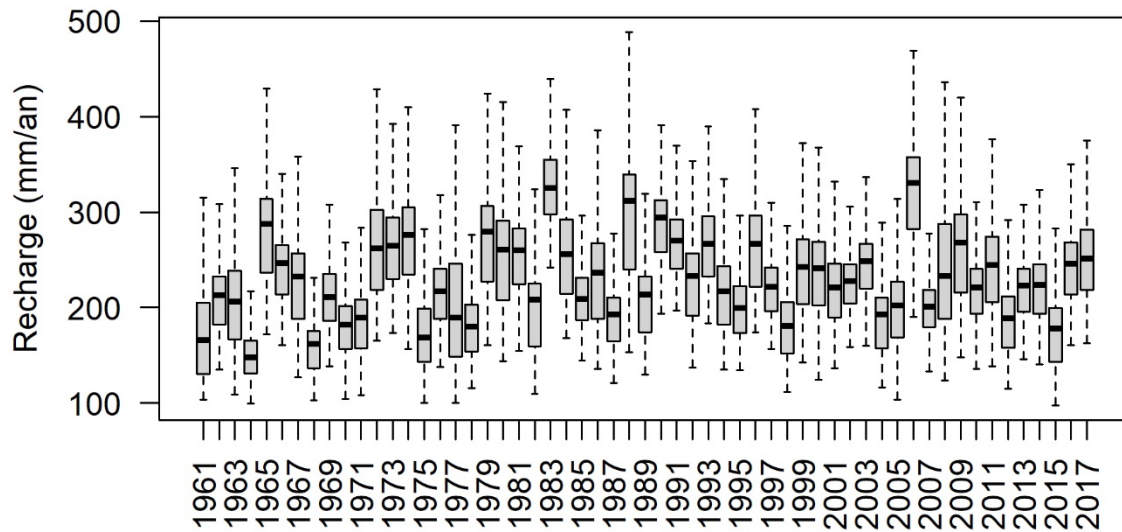


Figure 44 : Variations interannuelles de la recharge pour toute la zone d'étude de 1961 à 2017

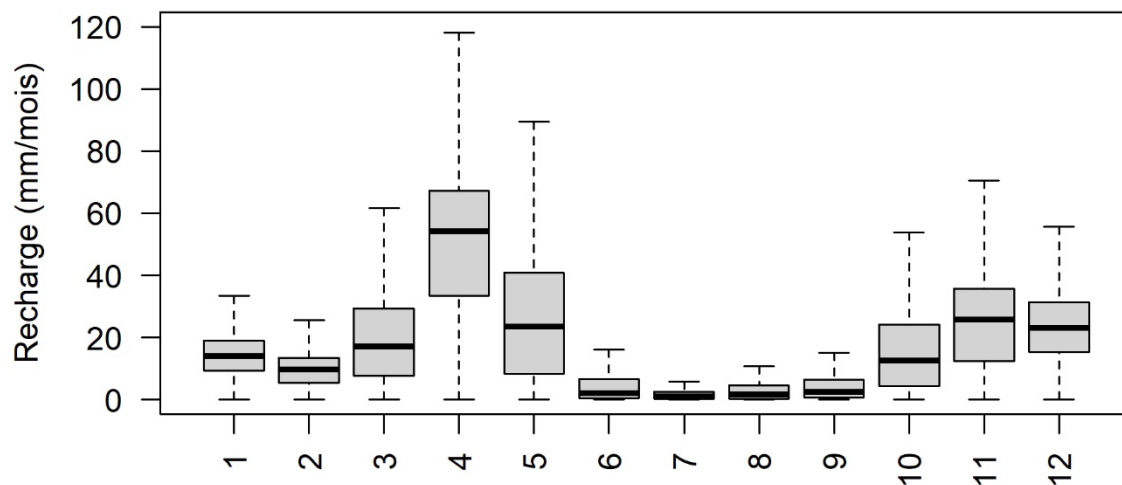


Figure 45 : Variation intermensuelle de la recharge pour toute la zone d'étude de 1961 à 2017

4.4.4 Zones de recharge préférentielle et de résurgence

Le 75^e percentile des valeurs spatialement distribuées de recharge annuelle moyenne, c.-à-d. 265 mm/an, a été utilisé comme valeur seuil pour la recharge préférentielle. Cette valeur a été utilisée pour cartographier les zones de recharge préférentielles sur toute la zone d'étude. Celles-ci sont réparties de manière relativement homogène sur toute la zone d'étude. Le secteur amont de la

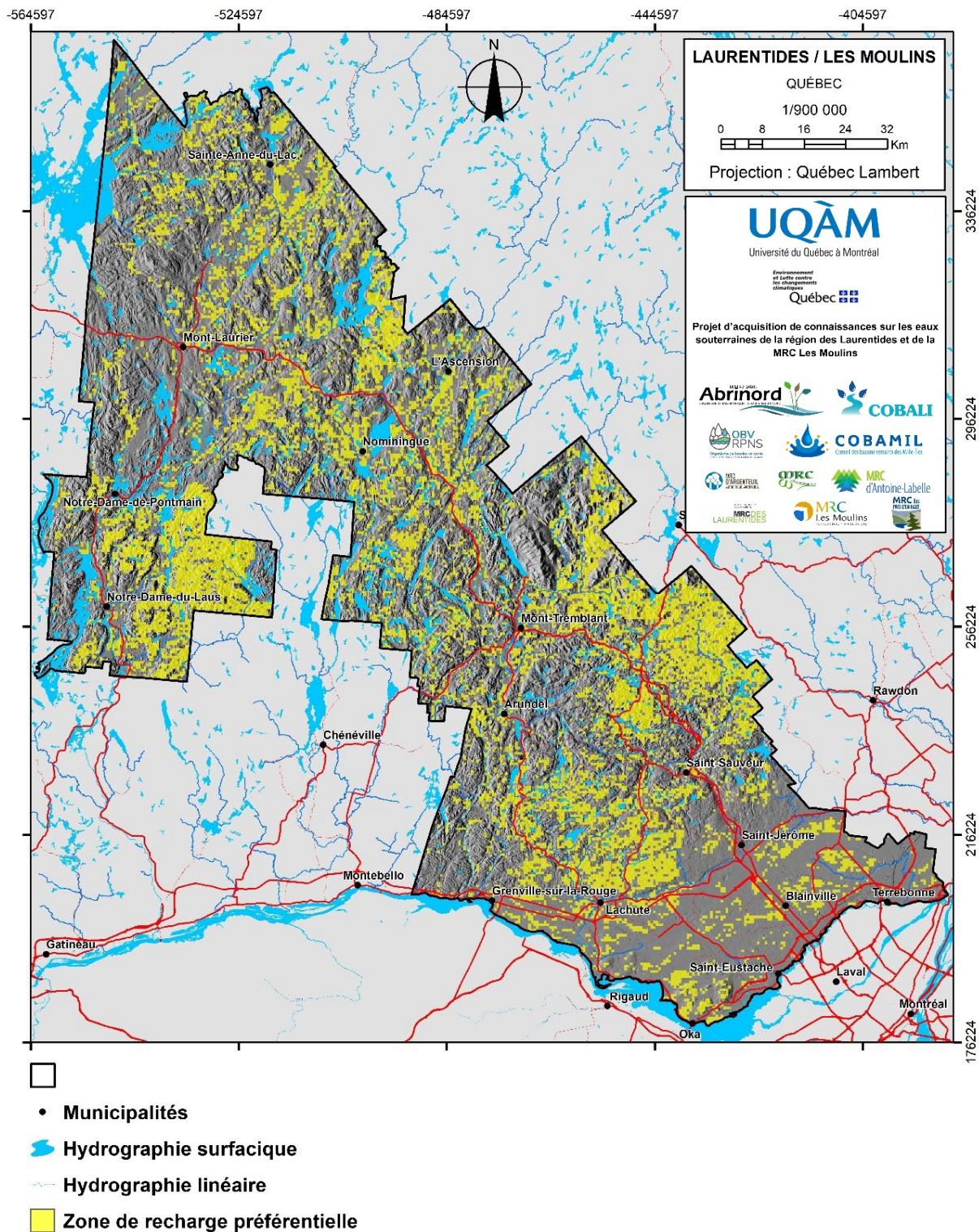
rivière du Nord et la région de Notre-Dame-du-Laus, sont les endroits où la concentration de pixels ayant une recharge supérieure à 265 mm/an est la plus élevée (**Figure 46**).

Afin de déterminer les zones de résurgence et les zones d'échange possibles entre l'eau souterraine et l'eau de surface, une analyse spatiale des cours d'eau a été réalisée de manière automatisée. Pour chacun des tronçons de cours d'eau du GRHQ (2019), l'information de la géologie du Quaternaire a été extraite sur une zone tampon de 100 m et le type de dépôt ayant la superficie la plus importante a été conservé. Par la suite, les types de dépôts meubles ont été classés selon leur potentiel aquifère (faible, moyen, élevé ; **Tableau 22**). Les dépôts granulaires perméables ont une conductivité hydraulique généralement plus élevée que le roc et le till et ils ont généralement aussi une porosité plus importante. Ces deux facteurs font que leur potentiel à décharger des volumes d'eau souterraine importants aux cours d'eau est plus élevé que le roc et le till. Le potentiel de connectivité aquifère-cours d'eau ne permet pas de déterminer si un cours d'eau est en connexion ou non avec l'eau souterraine ni de déterminer le sens des échanges.

Tableau 22 : Classement des dépôts quaternaires selon leur potentiel aquifère

Type de dépôts meubles	Potentiel aquifère
Argile et silt	Faible
Roc, till et milieux humides	Moyen
Dépôts deltaïques, littoraux, éoliens, morainiques et eskers	Élevé

Les cours d'eau situés dans les grandes vallées où des aquifères en nappe libre sont présents ont tous un potentiel d'échange élevé (**Figure 47**). Dans les secteurs montagneux où le roc et le till dominent, les potentiels d'échanges sont généralement moyens. Les zones avec une forte concentration de dépôts argileux et, dans une moindre mesure, les zones avec une forte concentration de milieux humides constituent les zones à faible potentiel d'échange. Les résultats montrent que 29 % des cours d'eau ont un potentiel élevé de connectivité nappe/rivière, que près de la moitié (58%) ont un potentiel de connectivité moyen et 13 % ont un potentiel de connectivité faible (**Tableau 23**).



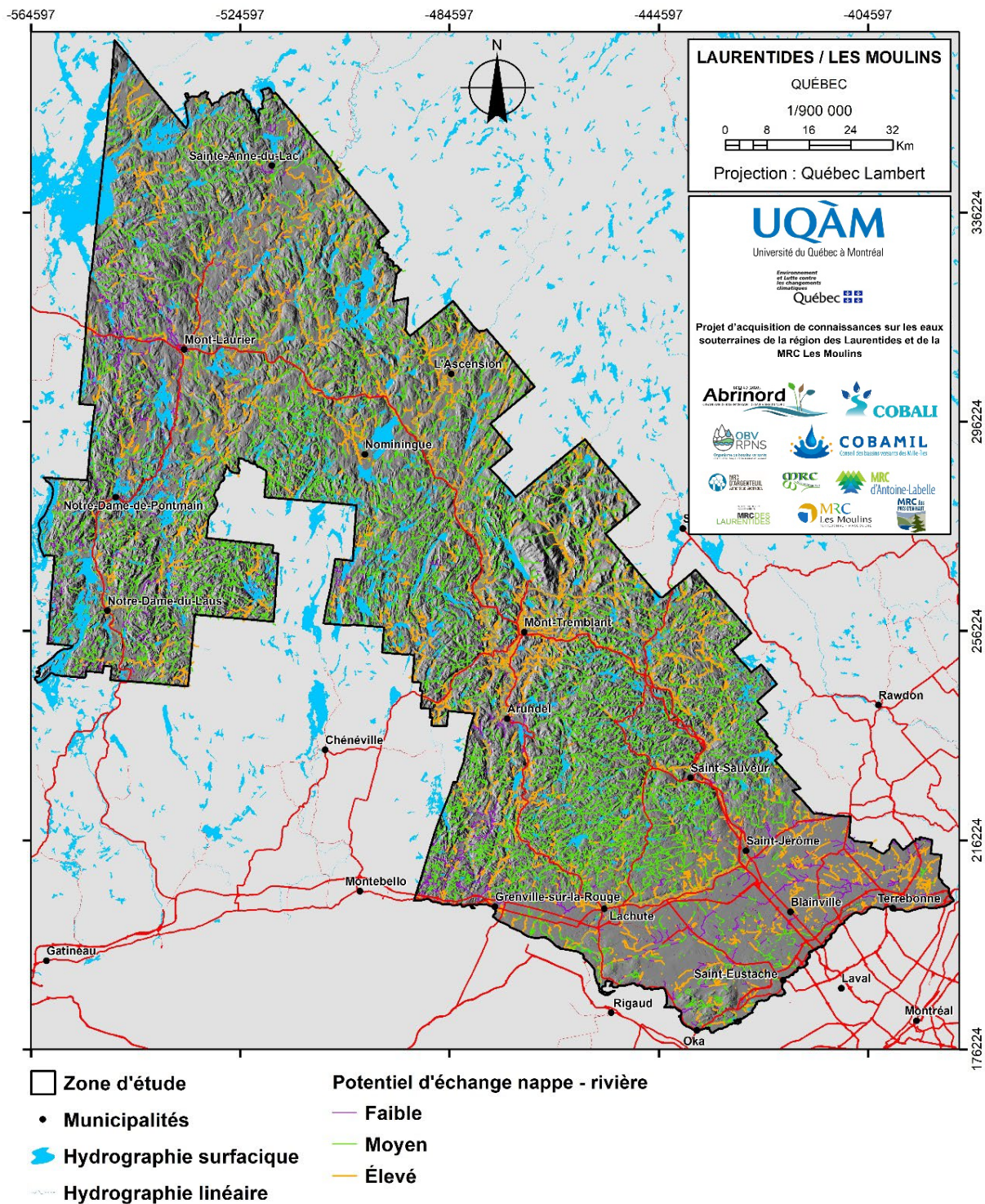


Figure 47 : Potentiel d'échange nappe-rivière pour le réseau hydrologique du GRHQ

Tableau 23 : Potentiel de connectivité nappe-rivières pour toute la zone d'étude

Potentiel	Longueur totale de tronçons (km)	%
Faible	1805	13
Moyen	8782	58
Élevé	4349	29
Total	15368	100

Dans le cadre du projet PACES-LAULM, deux puits d'observation ont été installés près de cours d'eau. Le premier (station RSESQ 04020005 de la Conception) est dans un aquifère de sable moyen à nappe libre situé à 120 m de la rivière Rouge, et l'autre (station RSESQ 04010003 de Morin-Heights) dans un aquifère fracturé également à nappe libre à 70 m de la rivière à Simon, un affluent de la rivière du Nord. En utilisant le LIDAR (MFFP, 2020) pour identifier la variation de niveau possible dans la rivière, les données montrent que les variations du niveau de l'eau souterraine au puits RSESQ 04020005 de la Conception sont semblables à la gamme des niveaux de la rivière Rouge (**Figure 48**). Ceci suggère que l'aquifère sableux du secteur joue un rôle d'emmagasinement lors de crues et de décharge lors d'étiage. Une démarche similaire montre que les variations du niveau de l'eau souterraine du puits RSESQ 04010003 de Morin-Heights sont généralement plus haut que ceux de la rivière à Simon lors de la crue printanière, ce qui suggère une contribution d'eau souterraine à la rivière à ce moment. Un peu en amont du forage, le niveau de la rivière à Simon est contrôlé manuellement pendant la période estivale. Ce contrôle semble se traduire par un niveau artificiellement élevé de l'eau souterraine entre les mois de juillet et août, alors que l'étiage devrait mener à des niveaux minimums.

Des échanges entre l'eau souterraine et les lacs sont aussi observés dans les données piézométriques. En comparant les variations du niveau de l'eau souterraine au puits 04010001 du RSESQ situé à 150 m du lac Saguay à l'élévation du lac Saguay (estimation avec données LiDAR), il semble que le lac pourrait être en connexion avec l'aquifère granulaire qui l'entoure, oscillant au cours d'une année entre des conditions d'alimentation et d'émergence. Finalement sur la rivière du Nord, les données piézométriques du puits RSESQ 04010002 de Piedmont (à 200 m de la rivière) sont en dessous du niveau de la rivière. Dans ce secteur, celle-ci serait donc déconnectée de l'aquifère granulaire captif dans lequel le puits est installé. La comparaison de l'hydrogramme du puits avec l'hydrogramme de la rivière montre que le niveau piézométrique varie de manière très différente de la chronique de débits, ce qui pourrait indiquer que l'aquifère est influencé par la recharge en amont hydraulique plus que par l'apport d'eau de surface.

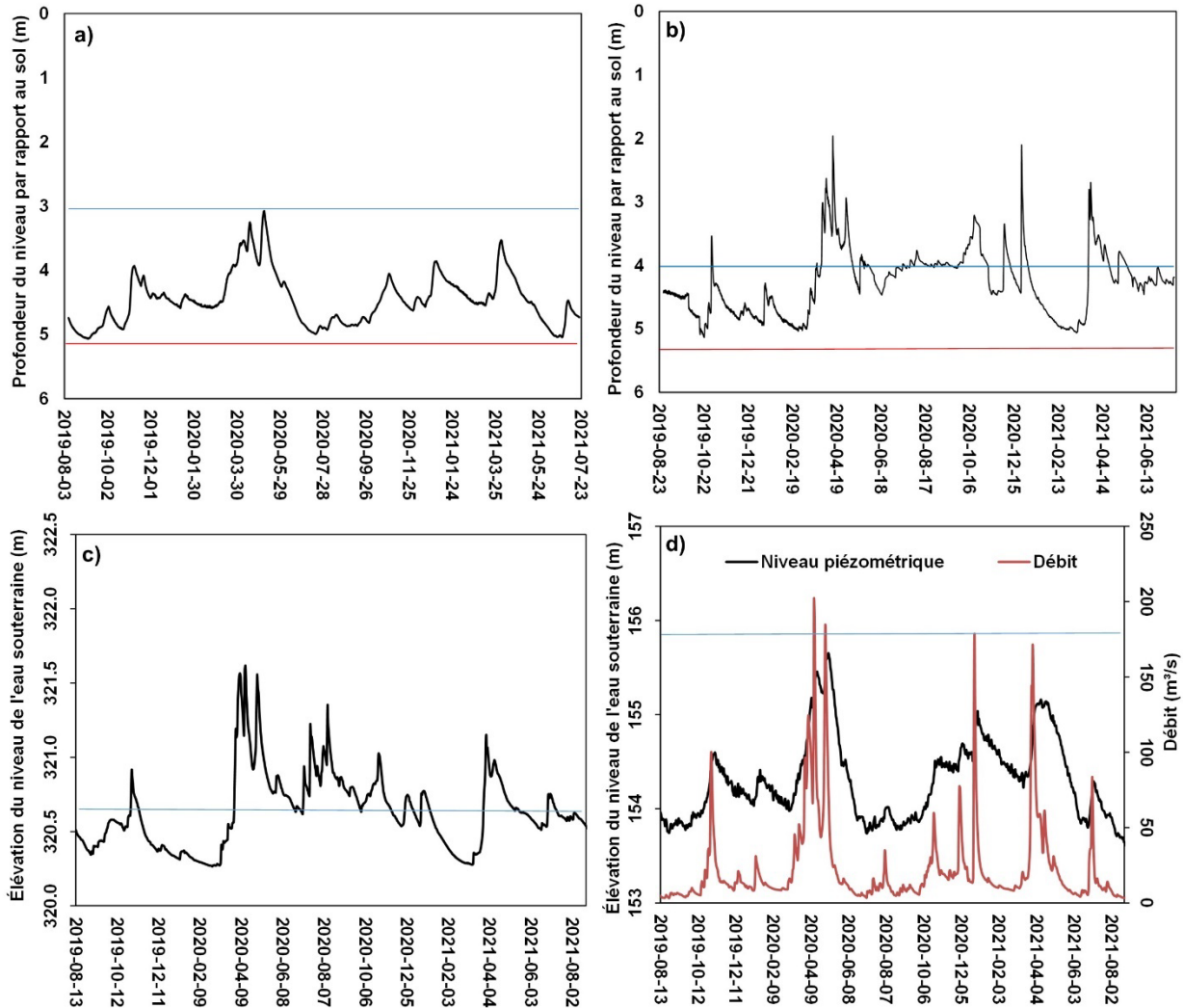


Figure 48 : Variations des niveaux d'eau et des profondeurs de l'eau à différents puits

a) Variation de la profondeur du niveau de l'eau souterraine à la station RSESQ 04020005 à La Conception comparée aux niveaux minimum (rouge) et maximum (bleue) de la rivière Rouge estimés avec les données LiDAR. b) Variation de la profondeur du niveau de l'eau souterraine à la station RSESQ 04010003 à Morin-Heights comparée aux niveaux minimum (rouge) et maximum (bleue) de la rivière à Simon estimés avec les données LiDAR. c) Variation de l'élévation du niveau de l'eau souterraine à la station RSESQ 04020001 de Lac Saguay comparée au niveau du lac Saguay (ligne bleue) estimé avec les données LiDAR. d) Variation de l'élévation du niveau de l'eau souterraine la station RSESQ 04010002 de Piedmont et du débit de la rivière du Nord à Saint-Jérôme (station 40110) comparée au niveau de la rivière du Nord (ligne bleue) estimée avec les données LiDAR.

4.5 Bilan hydrique régional

Les résultats de la modélisation de la recharge à l'échelle régionale avec le modèle HydroBudget ont permis de dresser un bilan hydrique de toute la zone d'étude, en utilisant les flux moyens pour les 4500 mailles de calcul qui couvrent la zone d'étude. Le bilan hydrique comporte quatre composantes, les apports verticaux (somme des précipitations liquides et de la fonte de la neige), le ruissellement (eau qui s'écoule en surface et qui ne s'infiltre pas dans le sol), l'évapotranspiration potentielle (ETP) (somme de l'évaporation potentielle et de la transpiration potentielle par les plantes, c.-à-d. en conditions où l'eau disponible n'est pas limitée) et la recharge potentielle (eau disponible pour la recharge si les conditions géologiques le permettent).

Pour l'ensemble de la zone du PACES-LAULM, et pour la période 1961 à 2017, les apports verticaux mensuels moyens varient de 18 mm/mois en janvier à 200 mm/mois en avril (**Figure 49**). Les apports verticaux sont importants en avril en raison de la fonte printanière (peu de précipitations liquides entre décembre et mars). Les précipitations neigeuses s'accumulent durant l'hiver et, à la fonte printanière, beaucoup d'eau devient disponible. Au moment de la fonte à la fin mars et en avril, les sols parfois gelés et souvent saturés limitent l'infiltration et contribuent au ruissellement. C'est à cette période que le ruissellement (110 mm/mois) et la recharge potentielle (40 mm/mois) sont les plus importants. Durant les mois d'été (juin à septembre), l'augmentation de l'ETP jusqu'à des taux de 100 mm/mois fait en sorte que la recharge potentielle diminue, même si les apports verticaux sont relativement stables. À l'automne, on observe une seconde augmentation de la recharge potentielle à la suite de la diminution de l'ETP. La répartition temporelle des composantes du bilan hydrique est très similaire pour les quatre zones de gestion intégrée de l'eau (ZGIE) (**Figure 50**). La ZGIE COBAMIL se distingue légèrement des autres avec des apports verticaux un peu plus importants en mars et une recharge moyenne interannuelle légèrement plus faible et moins variable d'une année à l'autre.

Pour l'ensemble de la zone d'étude, la recharge moyenne entre 1961 et 2017 représente 19 % des apports verticaux, le ruissellement représente 34 % des apports verticaux et l'ETP représente 47 % des apports verticaux (**Tableau 24**). Le bilan hydrologique a aussi été estimé pour chaque ZGIE. Les moyennes annuelles 1961-2017 ne montrent pas de différences très marquées entre les ZGIE. Une augmentation de l'ETP se dessine toutefois du nord vers le sud, c.-à-d. de la ZGIE COBALI vers celle du COBAMIL, sans doute engendrée par des températures moyennes plus élevées. Cette augmentation de l'ETP est sans doute en partie responsable, avec la plus grande couverture d'argile en surface (cf. section 6.5.1) de la plus faible recharge dans la ZGIE COBAMIL.

Le ruissellement est aussi plus élevé pour les zones RPNS et ABRINORD. Le relief de ces zones est beaucoup plus accidenté que les deux autres, ce qui contribue à augmenter le ruissellement.

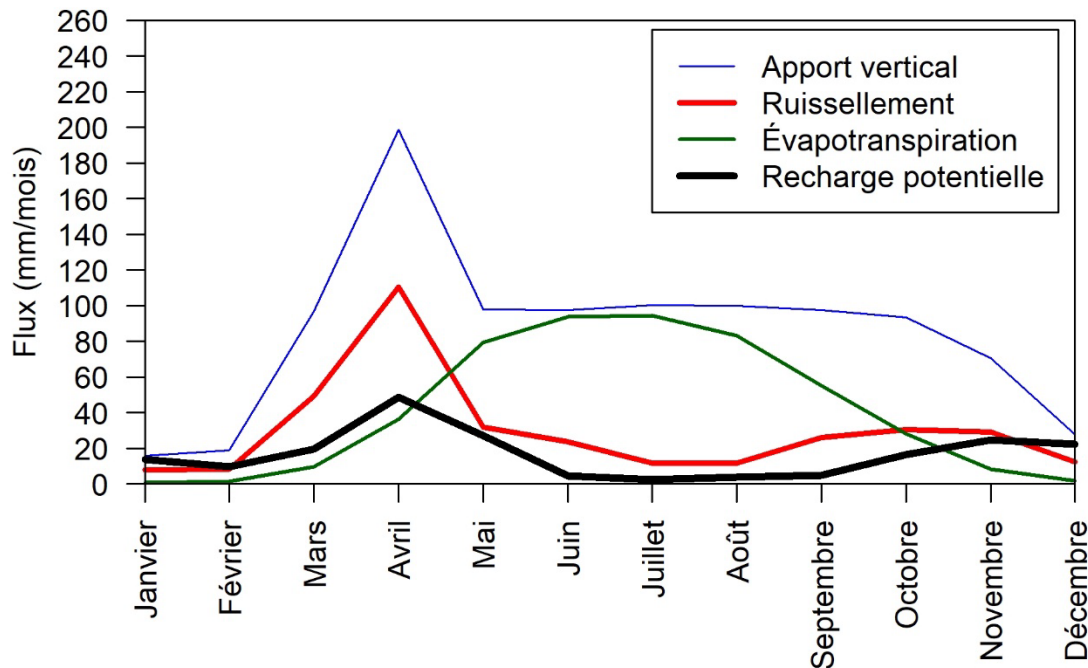


Figure 49 : Composante du bilan hydrique moyenne mensuelle pour la période de 1961 à 2017 pour toute la zone du PACES-LAULM

Tableau 24 : Valeurs annuelles moyennes des composantes du bilan hydrique pour chacun des ZGIE (portion incluse dans la zone PACES-LAULM) et pour l'ensemble de la zone d'étude pour la période 1961-2017

ZGIE	Recharge potentielle	Moyenne annuelle (mm/an)		
		Ruissellement	Évapotranspiration	Précipitations
COBALI	198	321	483	1002
RPNS	203	362	491	1056
ABRINORD	209	394	500	1102
COBAMIL	187	330	504	1022
Zone d'étude	198	353	491	1042

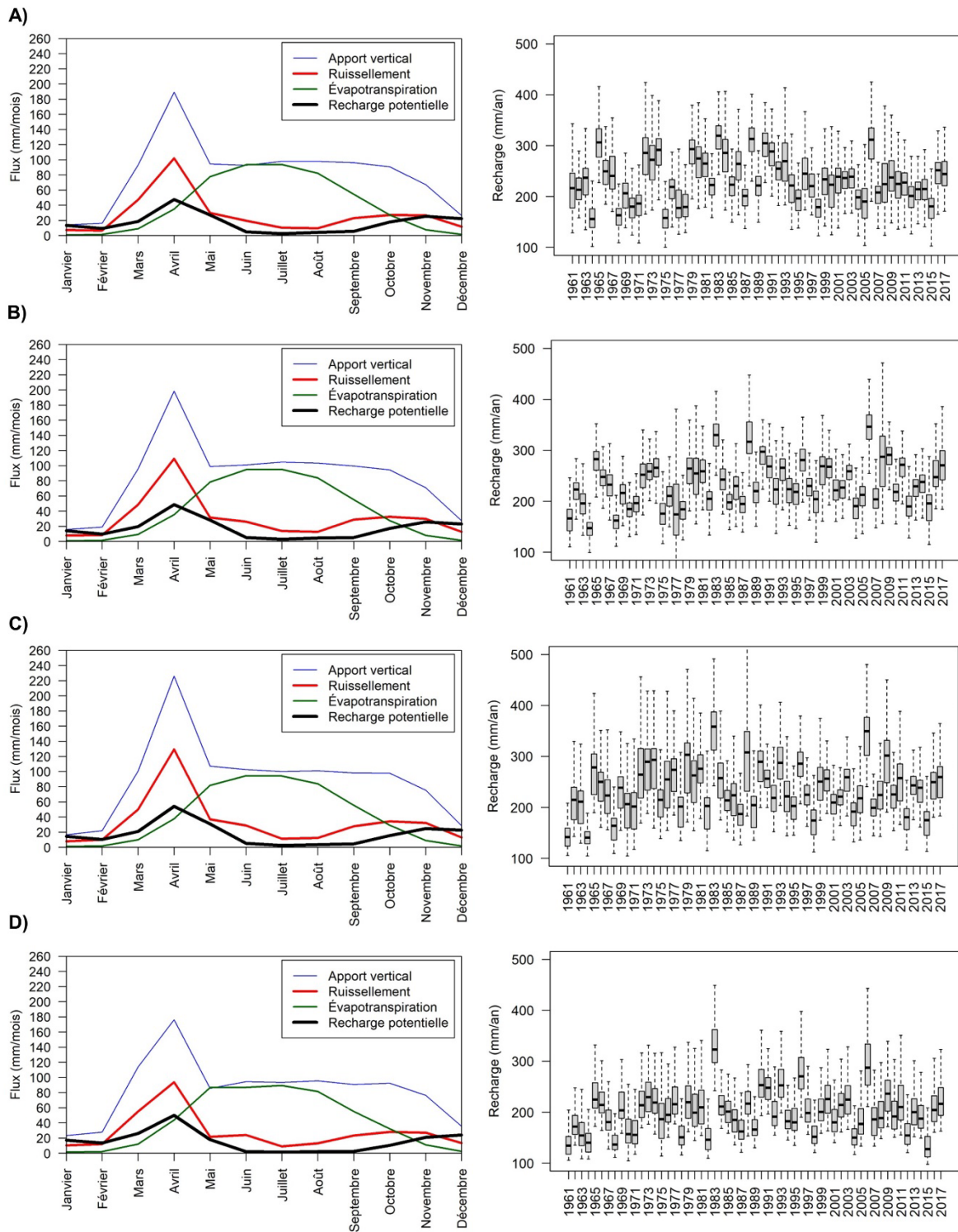


Figure 50 : Bilan hydrique par ZGIE a) COBALI, b) RPNS, c) ABRINORD et d) COBAMIL. La colonne de gauche représente les valeurs moyennes mensuelles 1961-2017 des composantes du bilan hydrique et la colonne de droite représente les recharges moyennes annuelles 1961-2017.

4.6 Géochimie de l'eau souterraine

4.6.1 Détermination des types d'eaux

Les types d'eau sont définis selon les concentrations en ions majeurs (Ca, Mg, K, Na, SO_4 , Cl et HCO_3) mesurées de l'eau. Les concentrations pour les anions HCO_3^- sont calculées à partir de la valeur de l'alcalinité en CaCO_3 à pH 4,5, et la présence de CO_2^{3-} est considérée comme négligeable dans les réservoirs d'eau étudiés. L'électroneutralité de chaque échantillon a été vérifiée en calculant la balance ionique à l'aide des concentrations des cations majeurs (Ca, Mg, Na et K) et en anions majeurs (HCO_3 , SO_4 et Cl). Tous les échantillons dépassant $\pm 10\%$ de la balance ionique ont été écartés. Sur 392 échantillons, 366 ont été retenus, soit 93% des échantillons. Parmi les puits échantillonnés, 76 % interceptent un aquifère en nappe libre (281 puits), 15 % interceptent une nappe captive (55 puits) et 8 % interceptent une nappe semi-captive (30 puits), selon les conditions de confinement déterminées précédemment (**Tableau 25**). Au total, 65% des puits échantillonnés sont dans un aquifère de roc fracturé (237 puits) et 35% sont dans un aquifère granulaire (128 puits).

L'analyse des données géochimiques montre un type d'eau dominant de composition Ca- HCO_3 dans 75% (275 puits) des puits échantillonnés (**Tableau 25**, **Figure 51**, **Figure 52**). Ce faciès est associé à des eaux peu minéralisées issues des précipitations récemment infiltrées et est rencontré dans des conditions de nappe libre dans 82 % des cas (227 puits). Au total, 17 % des puits échantillonnés ayant le type d'eau Ca- HCO_3 (48 puits) sont en condition de nappe captive ou semi-captive, ce qui indique que les conditions hydrogéologiques limitant la recharge sont généralement de faible étendue. Les eaux de recharge des zones en nappe libre s'infiltrent et circulent vers les zones captives influençant la géochimie de ces aquifères. Les faciès de type Na- HCO_3 et Na-Cl (respectivement 8% (28 puits) et 6% (22 puits)) représentent des eaux plus minéralisées ayant séjourné plus longtemps dans l'aquifère depuis la recharge. Ces types d'eau souterraine sont rencontrés dans différents contextes hydrogéologiques, à la fois en nappe libre et en nappe captive. La majorité des nappes captives les plus évoluées se situent dans la MRC Les Moulins où les types d'eau Na- HCO_3 , Cation mixte- HCO_3 et Na-Cl peuvent refléter une influence de dépôts salins hérités de la Mer de Champlain (**Figure 53** et **Figure 54**) ou un faible taux de recharge. Malgré la faible couverture de matériaux géologiques imperméables plus au nord dans la zone d'étude, une eau souterraine plus évoluée est également rencontrée dans le Bouclier canadien. Le type d'eau Ca- SO_4^{2-} se trouve principalement dans des nappes libres dans le secteur de Nominigou. Cette composition provient probablement de l'influence des sulfates des lithologies locales, entre autres du gneiss tonalitiques (Suite magmatique de Lacoste),

paragneiss (suite supracrustale de l'Ascension) ou de la syénite (suite intrusive du Chevreuil). Les autres types d'eau (Mg-HCO_3 , NaSO_4^{2-}) sont rencontrés chacun à un seul puits. Le type d'eau Ca-anions mixtes est souvent caractérisé par une concentration en chlorures à plus de 20%. L'absence de bromures dans ces eaux traduit une influence anthropique sur la provenance des chlorures (Pithon, 2021). La **Figure 54** met en évidence les processus d'échanges cationiques et de mélanges dans l'eau souterraine. Beaucoup d'échantillons du type d'eau Ca-HCO_3 montrent un enrichissement en sodium, car ils ne suivent pas la droite de dilution (Na=Cl). C'est un indicateur direct d'un échange entre les cations Ca et Na. Également, les échantillons du type d'eau Na-HCO_3 se trouvent tous au-dessus de la droite Na=Cl , ce qui est encore une fois un indicateur de l'échange cationique Ca-Na. Les échantillons du type Na-HCO_3 les plus chargés en sodium suivent davantage la droite Na-Cl et semblent venir se mélanger avec les échantillons du type d'eau Na-Cl . D'ailleurs, les échantillons du type d'eau Na-Cl suivent majoritairement la droite de dilution ce qui démontre un processus naturel d'évolution. Toutefois, les trois échantillons les plus concentrés en chlorures et en sodium sont proches de la composition chimique de l'eau de mer, démontrant qu'ils sont encore influencés par l'eau salée de l'ancienne mer de Champlain, ou des argiles contenant encore de l'eau salée, alors que les autres sont plus dilués. Enfin, certains échantillons de types d'eau Ca-Cl , Ca-anions mixtes et Ca-HCO_3 présentent un enrichissement en chlorure qui pourrait traduire une origine non naturelle des chlorures.

Tableau 25: Répartition des faciès selon le type d'aquifère et le degré de confinement

Faciès	Granulaire			Fracturé			Granulaire et fracturé			Total
	C*	S-C*	L*	C	S-C	L	C	S-C	L	
Ca-HCO₃	6	3	90	21	18	137	27	21	227	275
Na-HCO₃	1	0	1	11	1	14	12	1	15	28
Na-Cl	2	0	7	3	3	7	14	3	5	22
Ca-Cl	0	2	4	0	1	6	0	3	10	13
Ca-anions mixtes	0	1	7	0	0	4	0	1	11	12
Ca-SO₄²⁻	0	0	3	0	1	7	0	1	10	11
Cations mixtes-HCO₃	0	0	1	2	0	0	2	0	1	3
Mg-HCO₃	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Na-SO₄²⁻	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
	9	6	113	37	24	177	55	30	281	366

*C : nappe captive; S-C : nappe semi-captive; L : nappe libre

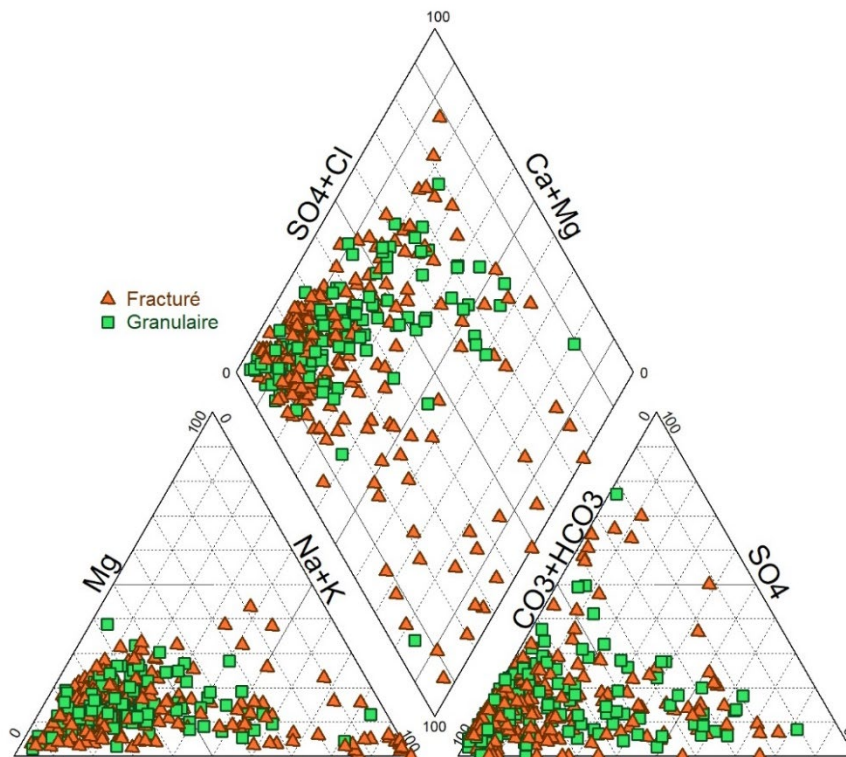


Figure 51 : Types d'eau selon le type d'aquifère

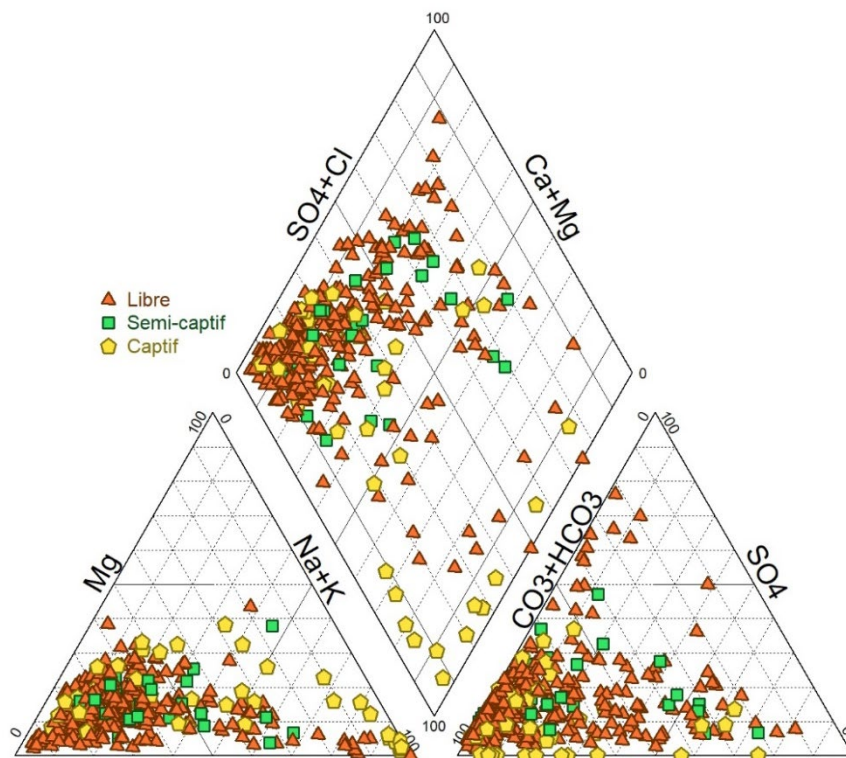


Figure 52 : Types d'eau selon le confinement de la nappe

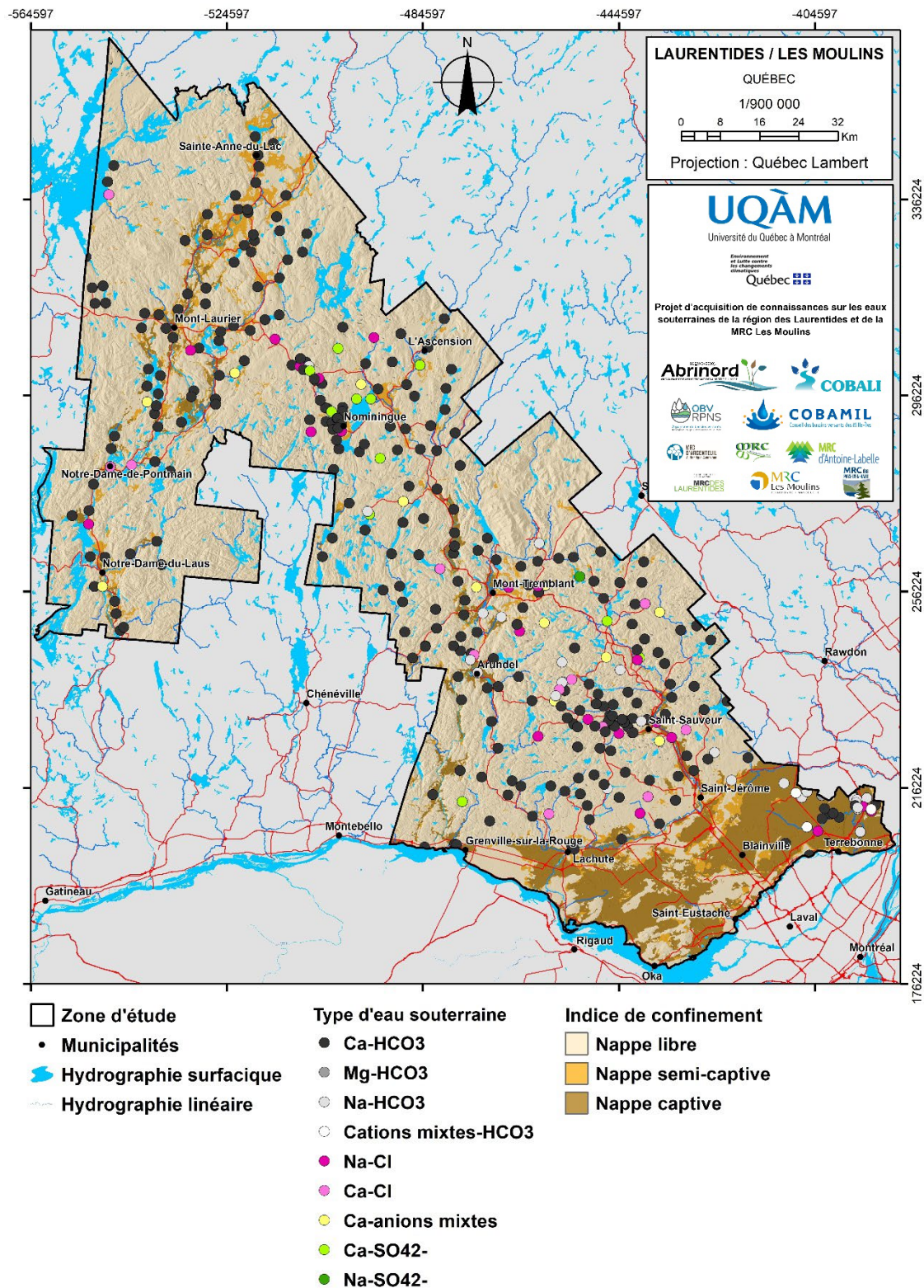
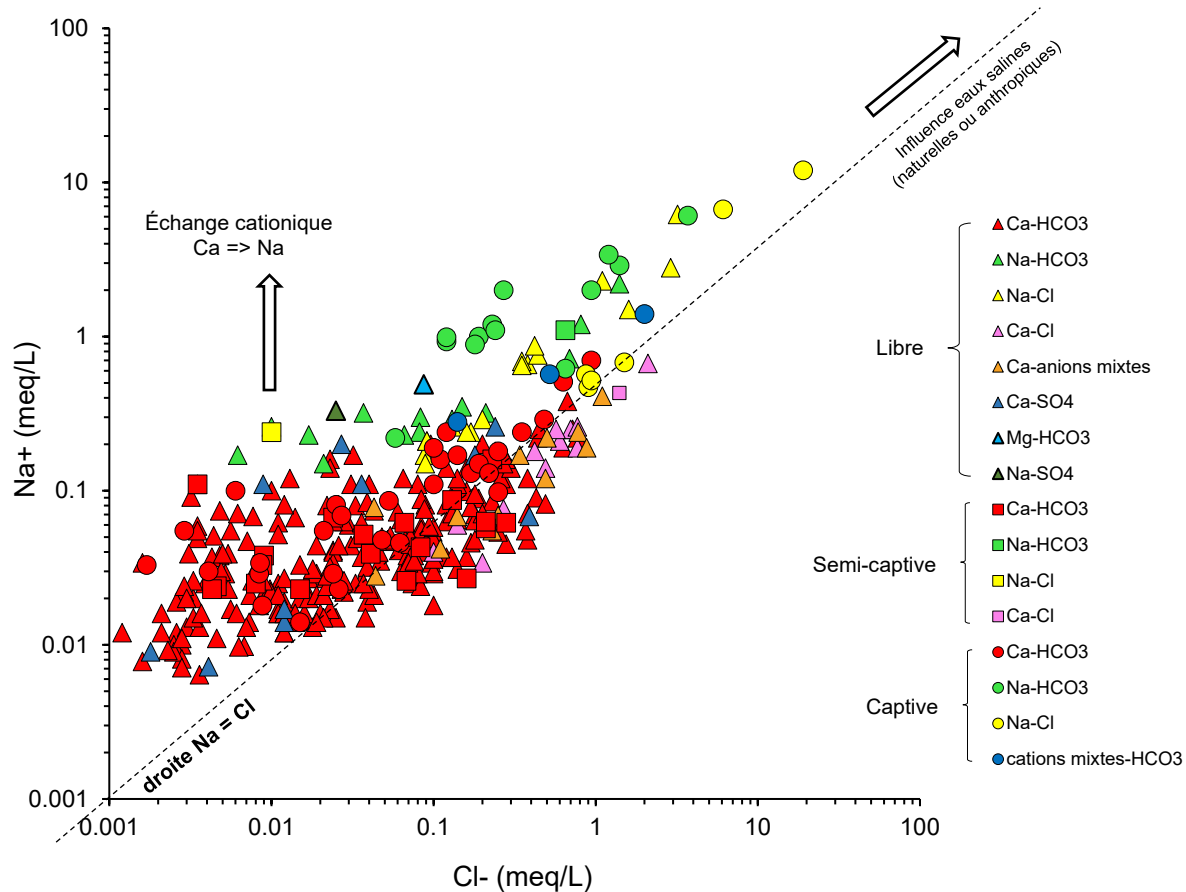


Figure 53 : Répartition spatiale des types d'eau et de l'indice de confinement

Figure 54 : Relation Na^+/Cl^- dans l'eau souterraine

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

L'échantillonnage de l'eau souterraine pour l'analyse des isotopes stables de l'eau a été réalisé au cours de l'été 2019 tandis que celui de l'eau des précipitations a été réalisé chaque mois entre juin 2019 et avril 2020. En raison des restrictions liées à la pandémie, les précipitations du mois de mai 2020 n'ont pas pu être collectées. Une estimation de la composition isotopique des précipitations pour ce mois a été réalisée en effectuant une moyenne avec les résultats $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations du mois de juin 2019 à avril 2020.

La composition isotopique des précipitations et de l'eau souterraine s'aligne sur cette droite météorique locale (**Figure 55**). Ceci indique que l'évaporation de l'eau des précipitations dans le sol ou préalablement à son infiltration est négligeable et que l'interaction entre les formations géologiques et l'eau de pluie n'entraîne pas de modification isotopique significative, témoignant ainsi d'une recharge plutôt récente. La moyenne annuelle de la composition isotopique, pondérée avec les précipitations mensuelles aux deux stations météorologiques (Arundel : $-13,0 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$, -

91,4 ‰ $\delta^2\text{H}$; Ferme-Neuve : -12,97 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, -91,2 ‰ $\delta^2\text{H}$) est légèrement appauvrie par rapport à celle des échantillons d'eau souterraine (-11,5 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, -78,8 ‰ $\delta^2\text{H}$). Ceci pourrait provenir du fait que les eaux plus enrichies de l'automne ont participé abondamment à la recharge pendant l'année au cours de laquelle la composition isotopique des précipitations a été étudiée. La gamme des compositions isotopiques de l'eau souterraine est toutefois similaire à celle des précipitations des mois de mars, avril et mai (période de recharge) pour les deux stations météorologiques. Il n'y a pas de différence notable entre la composition isotopique de l'eau souterraine provenant d'un aquifère granulaire ou de celle provenant du roc fracturé, ni entre celles des nappes libres et des nappes captives. Un appauvrissement de l'eau souterraine est observé du sud vers le nord (**Figure 56**), traduisant l'appauvrissement de la composition isotopique des précipitations du sud vers le nord.

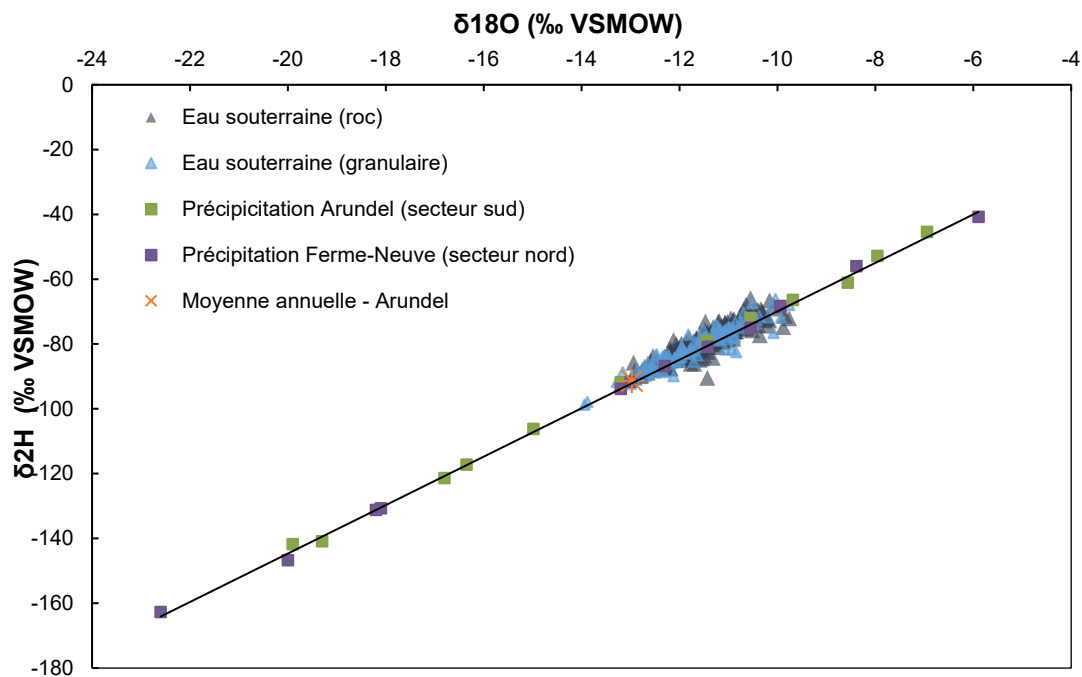


Figure 55 : Composition isotopique $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau dans la zone d'étude

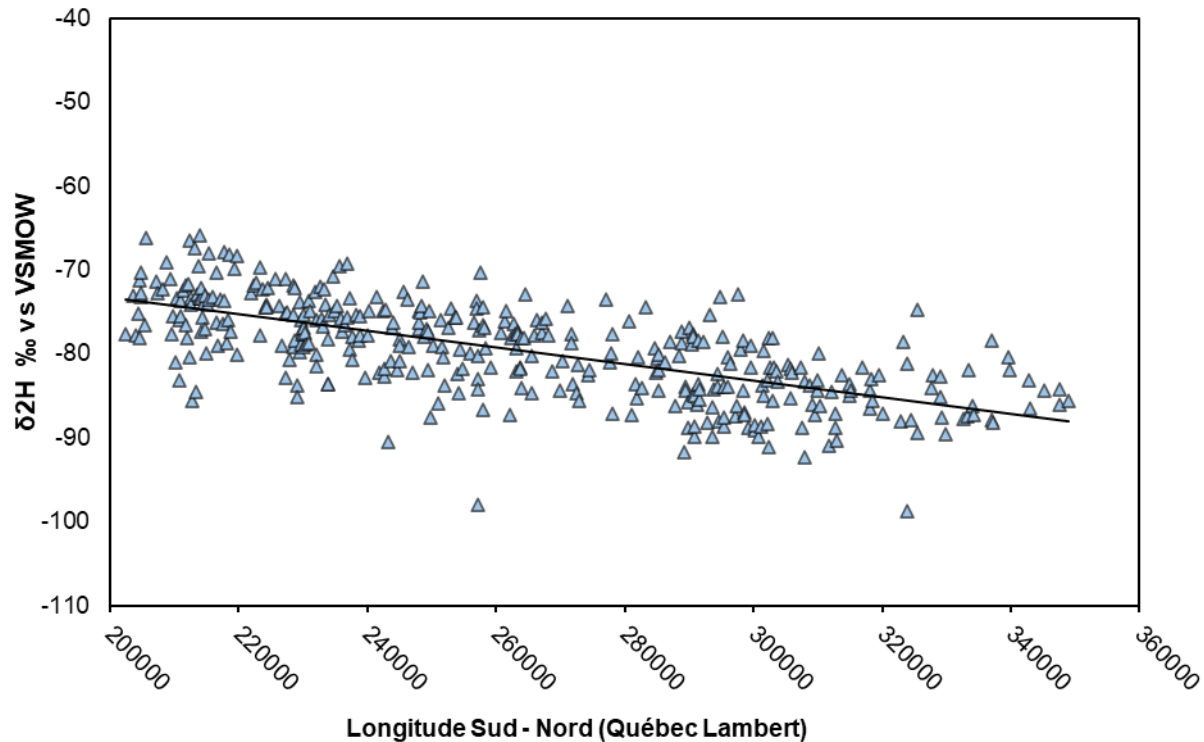


Figure 56 : Répartition spatiale des $\delta^2\text{H}$ en fonction de la latitude

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

La composition isotopique en ^{18}O et ^{15}N issue des nitrates (NO_3) permet de cibler les sources potentielles à l'origine des nitrates dans l'eau souterraine. Aucun échantillon prélevé dans la zone d'étude n'a montré une concentration en NO_3 dépassant la norme de potabilité (10 mg N- NO_3/L). Seulement 72 des 360 échantillons prélevés ont été analysés pour leur composition en isotopes stables des nitrates.

Les compositions isotopiques mesurées se situent dans plusieurs gammes correspondant aux fertilisants organiques, aux nitrates naturellement présents dans le sol, au NH_4 des fertilisants synthétiques (Kendall et al., 1998) (**Figure 57**). Les fumiers et lisiers ne semblent pas contribuer de manière importante aux concentrations mesurées. Les échantillons provenant d'aquifères granulaires ou d'aquifères au roc ont des compositions isotopiques similaires. L'analyse détaillée des résultats a montré que la dénitrification n'est pas un phénomène important dans la zone d'étude. Les concentrations en nitrates retrouvées dans les échantillons sont donc contrôlées par des processus de mélanges. Dans son mémoire de maîtrise, Fanny Pithon (2021) présente une analyse plus détaillée des sources de contaminants.

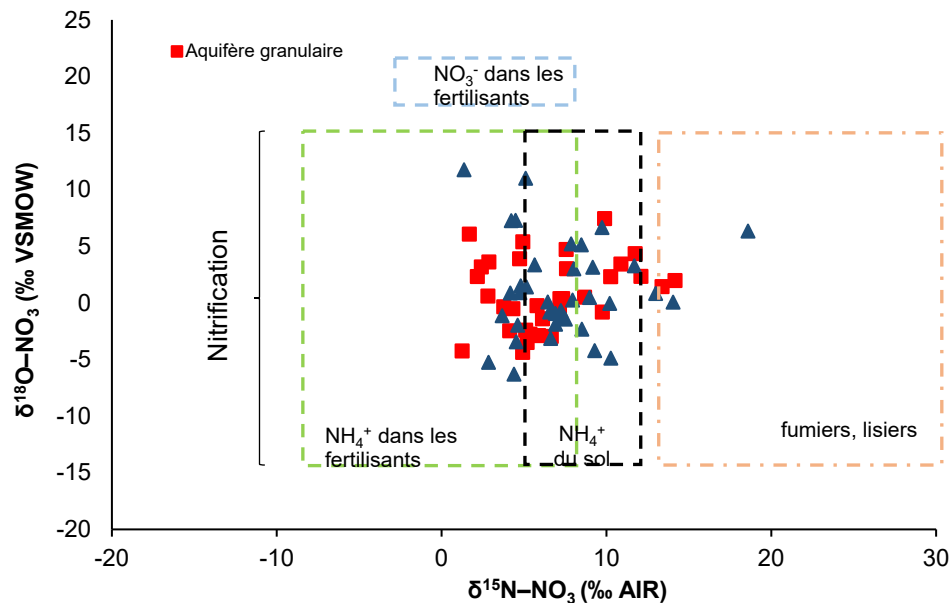
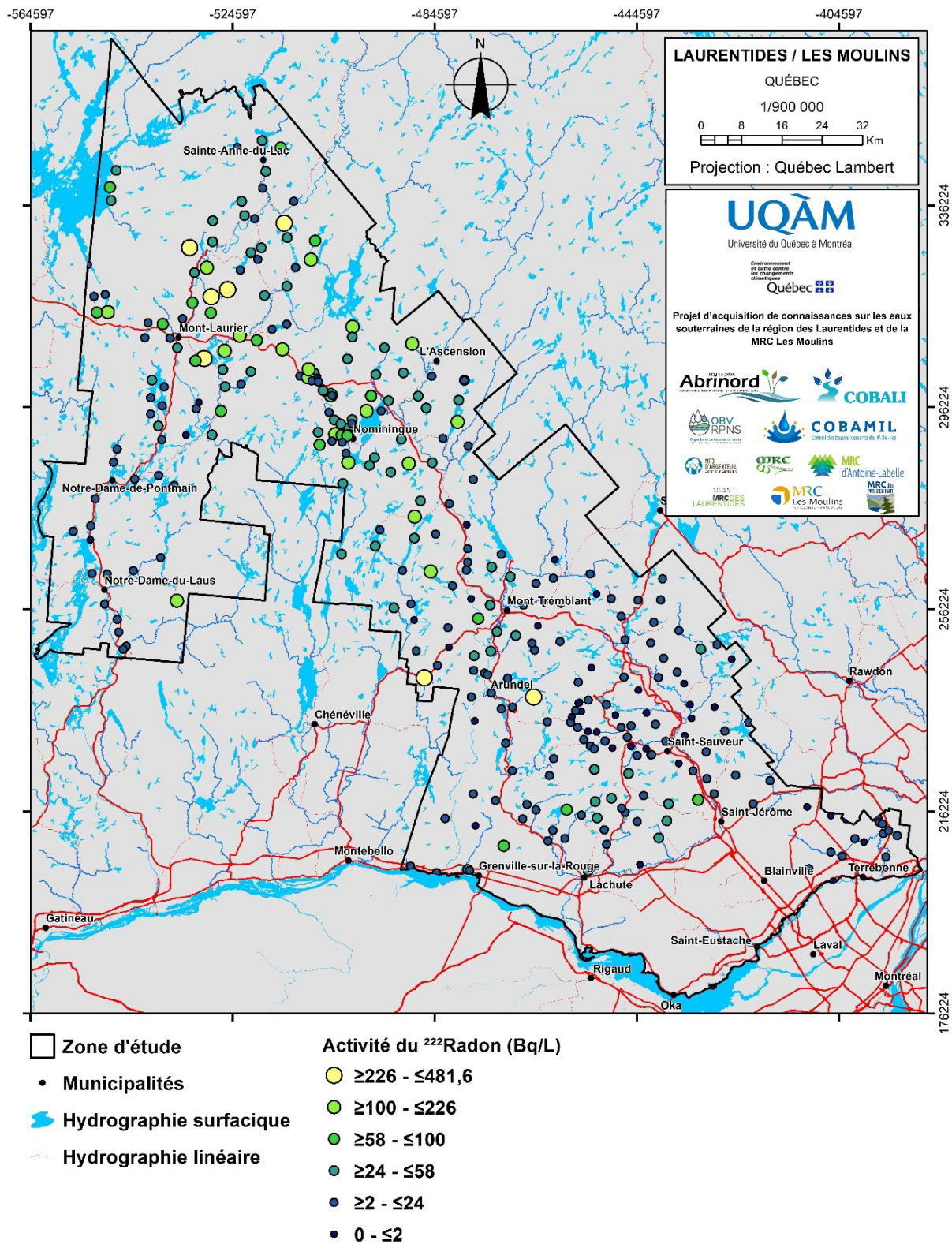


Figure 57 : Compositions isotopiques en $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des nitrates dans l'eau souterraine et gammes de valeurs pour les sources potentielles selon Kendall et al. (2008)

4.6.4 Radon (^{222}Rn)

Le ^{222}Rn est un gaz inerte soluble dans l'eau, issu de la désintégration radioactive du ^{226}Ra faisant partie de la chaîne de désintégration du ^{238}U . L'uranium étant naturellement présent dans la plupart des types de roches, le ^{222}Rn est un gaz ubiquiste dans l'eau souterraine. Toutefois, dès que l'eau souterraine atteint la surface, dans un lac, un cours d'eau ou un milieu humide, le ^{222}Rn se volatilise rapidement dans l'atmosphère. Sa présence dans l'eau des réservoirs superficiels est donc une indication d'un apport d'eau souterraine très récent.

Parmi les 358 échantillons d'eau souterraine analysés pour l'activité en ^{222}Rn , 69 % sont issus d'un aquifère de roc fracturé et 29 % proviennent d'un aquifère granulaire. Les secteurs de la région de Mont-Laurier et Ferme-Neuve ont été identifiés comme étant particulièrement riches en uranium, notamment les lithologies comme le Granite de Lanthier et le paragneiss de la Suite supracrustale de l'Ascension (Drolet et al. (2013) ; Lacoste, 2000 et Nantel, 2008). Ceci explique sans doute le fait que l'activité ^{222}Rn est plus importante dans cette zone, avec une valeur moyenne de 50 Bq/L, 25 puits indiquant une activité > 100 Bq/L, et un maximum de 481 Bq/L (**Figure 58**). Une distinction significative est observée avec le secteur sud des Hautes-Laurentides, où la moyenne est de 17 Bq/L et la plupart des échantillons ont des activités entre 2 et 24 Bq/L.

Figure 58 : Activité du ^{222}Rn dans l'eau souterraine

Ceci traduit la faible teneur en uranium dans le granite et l'anorthosite de la suite de AMCG de Morin. Dans la MRC Les Moulins, les activités ^{222}Rn sont faibles avec une moyenne de 4 Bq/L.

Bien qu'il n'existe pas de norme au Québec pour l'activité du ^{222}Rn dans l'eau potable, le ^{222}Rn dans l'air des maisons est une préoccupation dans plusieurs régions (Santé Canada, 2019). Le ^{222}Rn n'est pas problématique lors de sa consommation, mais il peut s'avérer cancérigène si son inhalation dure longtemps (Darby, 2005 ; Chen, 2019). La présence de ^{222}Rn dans l'eau souterraine est un bon indicateur des régions où le ^{222}Rn dans l'air des maisons peut dépasser les normes (Drolet, 2013).

4.6.5 Datation et traçage isotopique

Les activités de ^3H (en unités T.U., Tritium Units) ont été comparées avec les concentrations de l'élément fils, le ^3He pour calculer un temps de résidence. Étant donné que la demi-vie du ^3H est de 12,32 ans (Lucas, 2000) et qu'il y a un écart de presque un an entre la mesure de tritium à Ottawa et celle de ^3He à Montréal, l'activité du ^3H a été ramenée à la période de mesure de son fils, le ^3He en utilisant la loi de radioactivité (Boucher, 2013). D'autre part, le ^3He peut être d'origine radiogénique (par réactions neutronique avec le lithium contenu dans les roches), atmosphérique (dissous à la recharge suivant sa solubilité dans l'eau) ou tritiogénique (par décroissance du ^3H), ou il peut provenir de l'excès d'air (par contamination de l'air lors du prélèvement). Toutes ces composantes ont été identifiées et quantifiées en utilisant les valeurs de Li dans les roches de la région (Pinti, 2011) et de ^{22}Ne pour quantifier les deux composantes atmosphériques (Vautour, 2015) et donc la seule fraction tritiogénique a été isolée et utilisée avec le ^3H dans l'équation d'âge où $^3\text{He}_{\text{tri}}$ est la fraction tritiogénique de l'hélium :

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \left(1 - \frac{^3\text{He}_{\text{tri}}}{^3\text{H}} \right) \quad (\text{éq. 1})$$

Les temps de résidence $^3\text{H}/^3\text{He}$ varient entre 2,5 et la limite de la méthode, soit environ 75 ans (**Figure 59**) et la médiane est environ de 31.

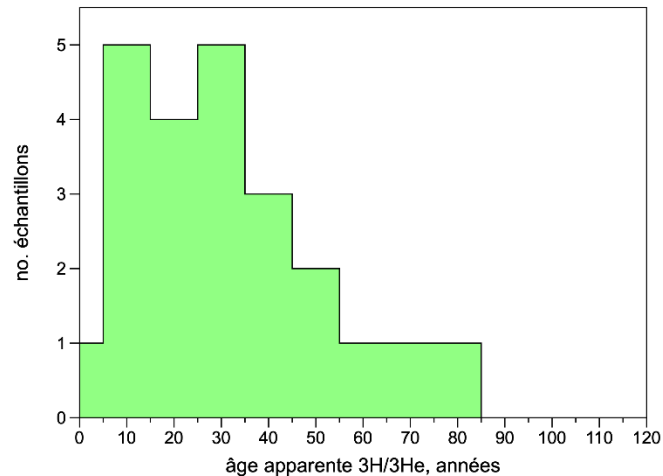


Figure 59. Temps de résidence $^3\text{H}/^3\text{He}$

L'activité du ^{14}C varie entre 11 et 101 pCi/L ce qui est proche de la valeur moderne de 120 pCi/L. Cette variabilité indique la présence à la fois d'eau récente (comme indiqué par ailleurs par les âges $^3\text{H}/^3\text{He}$) et d'eau ancienne caractérisée par une quantité de ^{14}C proche de la valeur naturelle ($\cong 0$ pCi/L). Ce résultat semble contredire celui de la méthode $^3\text{H}/^3\text{He}$ qui indique des eaux très jeunes. En réalité, dans tous ces systèmes hydrogéologiques complexes, l'eau souterraine est souvent un mélange de deux pôles, c.-à-d. une eau moderne ou submoderne et une eau ancienne. Grâce à la quantité de carbone organique dissous et à la composition isotopique mesurée, les corrections nécessaires ont été appliquées pour estimer les âges ^{14}C corrigés. Plusieurs modèles ont été testés, mais celui de Fontes et Garnier (1979) donnent les résultats les plus fiables (**Figure 60**). Les âges corrigés ^{14}C varient entre modernes et 17 700 ans. La majorité des échantillons ont des âges entre modernes et 5000 ans (médiane de 2481 ans) tandis que deux échantillons ont des âges ^{14}C corrigés de 6 787 et 17 700 ans. Les âges ^{14}C ont été confirmés (6 450 et 17 660 ans) pour ces deux puits lors d'un second échantillonnage au courant de l'été 2021.

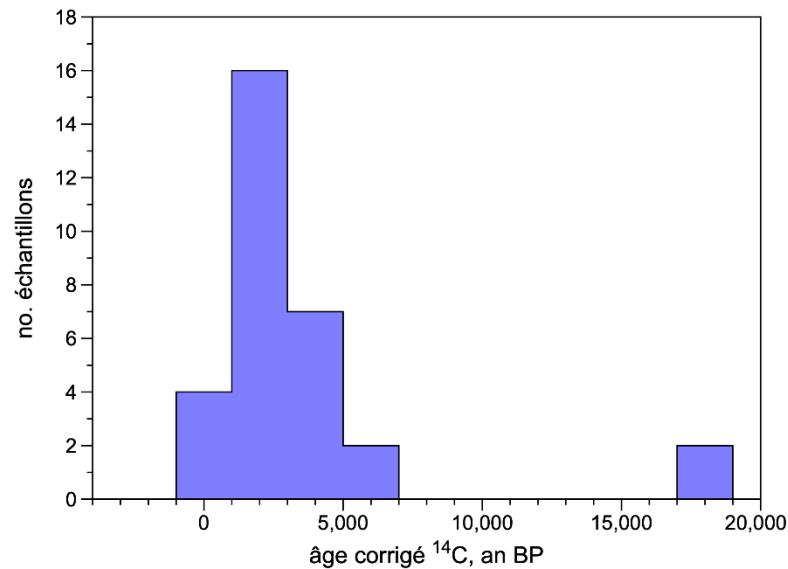


Figure 60. Âges corrigés ^{14}C par la méthode de Fontes et Garnier (1979)

Ces résultats sont très intéressants de point de vue de la recharge de l'aquifère et le contrôle climatique de la dernière glaciation sur l'hydrogéologie locale (Lemieux, 2008 ; McIntosh, 2005 ; Saby, 2016). En effet, après la déglaciation les aquifères ont subi de nombreuses invasions d'eaux glaciaires qui ont littéralement dilué toute l'eau souterraine ancienne pré-Holocène et Quaternaire. À partir de 6000-5000 ans, le rebond isostatique au Québec a ralenti considérablement et la géométrie des aquifères s'est figée (Lamarche, 2007) permettant de conserver des poches d'eau Holocène comme semble être le cas dans les Laurentides.

5 RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

5.1 Usage de la ressource

Les usages de l'eau habituellement répertoriés incluent les usages résidentiels, les usages industriels, commerciaux et institutionnels (ICI), et les usages agricoles (cultures et élevages). Au Québec, les municipalités ayant un système d'aqueduc s'approvisionnent dans les rivières ou dans les aquifères. En dehors des centres urbains, l'approvisionnement en eau se fait habituellement à partir de puits privés. Afin de dresser un portrait régional de l'utilisation de l'eau sur la zone d'étude, les données sur l'utilisation de l'eau du MELCC, du MAMH et du MAPAQ ont été compilées. Il est important de préciser que les résultats présentés sont une combinaison d'estimations de volumes d'eau et de volumes d'eau réellement utilisés. Par exemple, la consommation agricole animale est estimée selon un volume d'eau par animal et non à partir de compteur d'eau. Au Québec, seuls les préleveurs de plus de 75 m³/jour ont l'obligation de déclarer les volumes d'eau qu'ils utilisent (RPEP, 2020). La méthode de travail utilisée dans cette section est inspirée de celle du projet RADEAU II (Charron et al, 2020). Les méthodes utilisées sont présentées à l'**ANNEXE E**.

Dans la région d'étude, 49 municipalités (58 %) s'approvisionnement en eau souterraine, 21 municipalités (17%) utilisent de l'eau de surface provenant de lacs ou de cours d'eau et trois utilisent à la fois l'eau souterraine et l'eau de surface. Les autres municipalités (25 %) ne possèdent pas de système d'approvisionnement et de distribution d'eau, ce sont souvent les moins peuplées. Certaines de ces municipalités importent parfois l'eau d'une municipalité voisine (p.ex. : Estérel) ou les habitants s'approvisionnent à partir de puits résidentiels. La répartition des approvisionnements souterrains ou de surface est répartie sur la zone d'étude (**Figure 61**). Ce sont surtout les municipalités avec le plus de population (p.ex. : Terrebonne, Mascouche, Mont-Laurier, Saint-Jérôme) qui ont recours à un approvisionnement en eau de surface.



Sur la zone d'étude (sans la zone AFSOQ), environ 62 Mm³/an sont consommés par année (**Tableau 26** et **Figure 64**). Ce sont les MRC Les Moulins, des Laurentides et de la Rivière-du-Nord qui ont les consommations totales les plus importantes, avec respectivement 27, 24 et 23 % de la consommation totale d'eau sur la zone d'étude. Les trois autres MRC présentent des consommations moindres en raison d'un nombre de résidents plus faible et une activité industrielle moins importante. Ainsi, les MRC des Pays-d'en-Haut, d'Argenteuil, d'Antoine-Labelle consomment respectivement 12, 7 et 7 % de toute l'eau utilisée sur le territoire.

L'eau consommée est majoritairement utilisée à des fins résidentielles, avec 37 Mm³/an, soit 60 % de l'utilisation régionale. La MRC Les Moulins et celle de la rivière du Nord sont les municipalités où les volumes consommés pour les usages résidentiels sont les plus importants en raison de la présence des centres urbains très peuplés de Terrebonne et Saint-Jérôme. Ces deux dernières s'approvisionnent à partir d'eau de surface provenant de la rivière du Nord et de la rivière des Mille-Îles. Il faut souligner que la municipalité de Terrebonne reçoit également des volumes provenant de la station de traitement de Repentigny, une municipalité hors de la zone d'étude. Ces volumes reçus ont été comptabilisés dans le bilan de la MRC.

La catégorie ICI et pertes représentent 32 % de la consommation. Ce type d'utilisation est la plus élevée dans les MRC des Laurentides et des Pays-d'en-Haut. Cette consommation s'explique, entre autres, par la présence de plusieurs sites de récréotourisme utilisant des ressources eau. Les pertes d'eau au sein des réseaux de distribution sont estimées au moyen d'un coefficient qui est appliqué aux volumes annuels des grands préleveurs selon leurs classifications industrielles. Les pertes en eau potentielles à l'échelle de la zone d'étude sont estimées à 27 % de l'utilisation totale (MAPAQ, 2016).

Sur la zone d'étude, 8 % des volumes pompés sont dédiés à un usage agricole. Ces volumes d'eau sont en majorité allouée à l'élevage. La MRC des Laurentides arrive en tête avec la présence d'activités piscicoles, puis la MRC d'Antoine-Labelle où on retrouve de nombreux terrains agricoles dans la vallée de la Lièvre. L'estimation des volumes utilisés pour l'irrigation a été réalisée à partir de la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées de 2020 (BDPPAD). Étant donné le nombre important de parcelles pour lesquelles aucune information n'est fournie (cf. section **2.2.4**), l'utilisation de l'eau à des fins agricoles est probablement sous-estimée.

Tableau 26 : Consommation d'eau par type d'usage et par MRC*

MRC	Résidentielle (m³/an)	ICI et pertes (m³/an)	Agricole (m³/an)	Total (m³/an)
d'Antoine-Labelle	2 772 129	1 003 735	285 604	4 061 468
d'Argenteuil	2 624 662	1 699 727	231 350	4 555 739
de la Rivière du Nord	10 685 592	3 285 168	115 922	14 086 683
des Laurentides	3 993 956	6 650 450	4 066 575	14 710 981
des Pays d'en-Haut	4 029 197	3 738 167	1 680	7 769 044
les Moulins	13 176 529	3 758 052	73 140	17 007 721
Total (m³/an)	37 282 066	20 121 361	4 774 271	62 191 636

*Zone d'étude PACES-LAULM, sans la zone AFSOQ.

Les données compilées à partir du registre des grands préleveurs d'eau (soumis à la réglementation sur le prélèvement d'eau si $Q > 75 \text{ m}^3/\text{j}$) indiquent que sur la zone d'étude (sans la zone AFSOQ), la grande majorité de l'eau prélevée provient des eaux de surface (**Figure 62**). Cependant, cette eau est principalement prélevée par les grandes villes de la partie sud de la zone d'étude. Les prélèvements en eau de surface sont relativement stables depuis 2015 avec une moyenne de $55 \text{ Mm}^3/\text{an}$, et un nombre peu variable de sites de prélèvement (**Figure 63**). Pour l'eau souterraine, les données indiquent une hausse de $\sim 30 \%$ des prélèvements pour la période 2018-2019 comparativement à la période 2015-2017, et ce, malgré le fait qu'il n'y ait pas eu d'augmentation du nombre de sites de prélèvements. La moyenne des prélèvements annuels d'eau souterraine est de $7,8 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Répartie sur toute la zone d'étude, le volume d'eau de surface prélevé équivaut à une lame d'eau de $5 \text{ mm}/\text{an}$ et le volume d'eau souterraine à une lame d'eau de $1 \text{ mm}/\text{an}$.

En comparant les données du **Tableau 26** (qui incluent les données des GPE – grands préleveurs d'eau) avec les données présentées à la **Figure 62** pour l'année 2019 (année utilisée pour faire le **Tableau 26**), il est possible de déterminer qu'environ 8% ($62,2 \text{ Mm}^3/\text{an} - 61,3 \text{ Mm}^3/\text{an}$) des prélèvements ne sont pas comptabilisés dans le registre des GPE. Ces prélèvements représentent la consommation d'eau hors réseau, la consommation agricole et les autres prélèvements non soumis à la réglementation. Le suivi des données issues des GPE constitue donc un bon indicateur des prélèvements sur la zone d'étude.

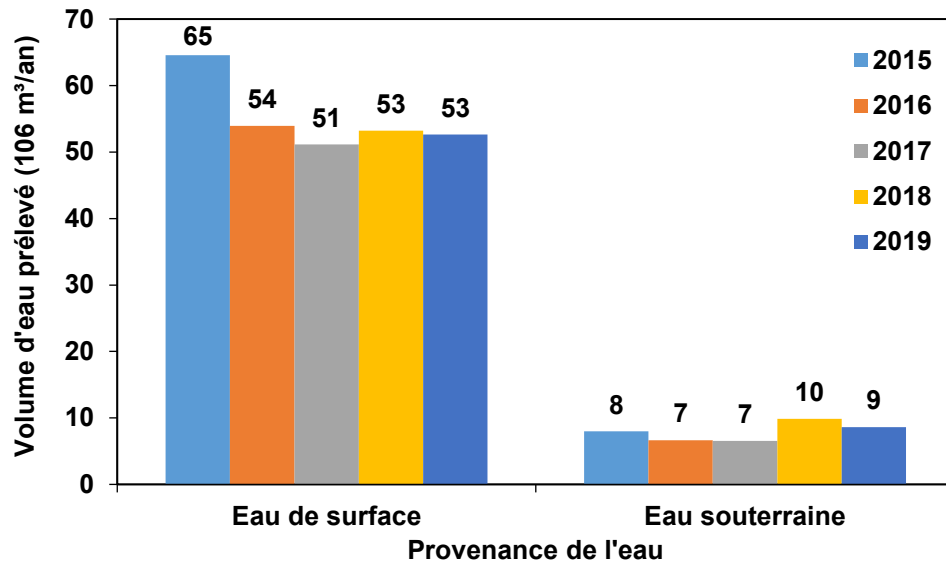


Figure 62 : Volume d'eau prélevé selon la provenance de l'eau pour la période 2015-2019 (zone d'étude excluant la zone AFSSQ ; GPE - MELCC, 2019c)

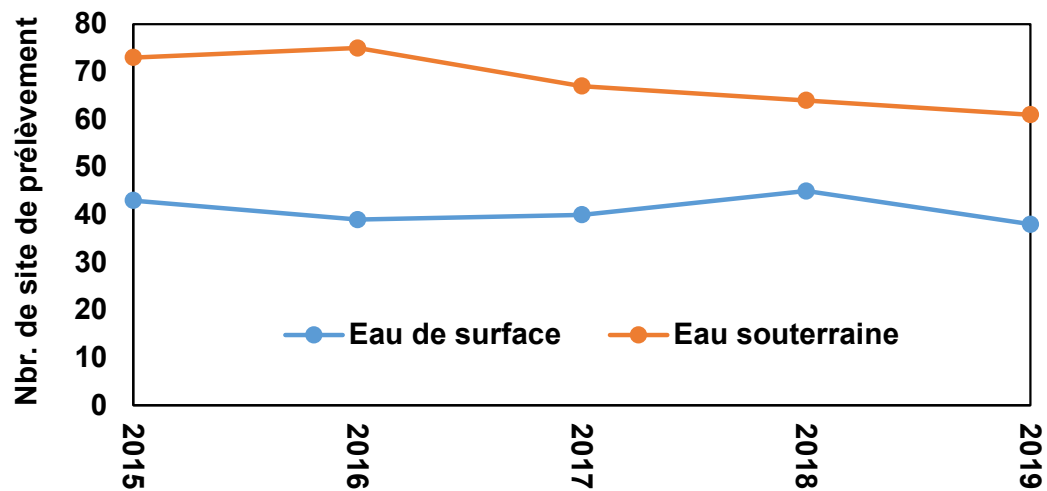


Figure 63 : Nombre de sites de prélèvement pour la période 2015-2019 selon la provenance de l'eau (GPE - MELCC, 2019c)

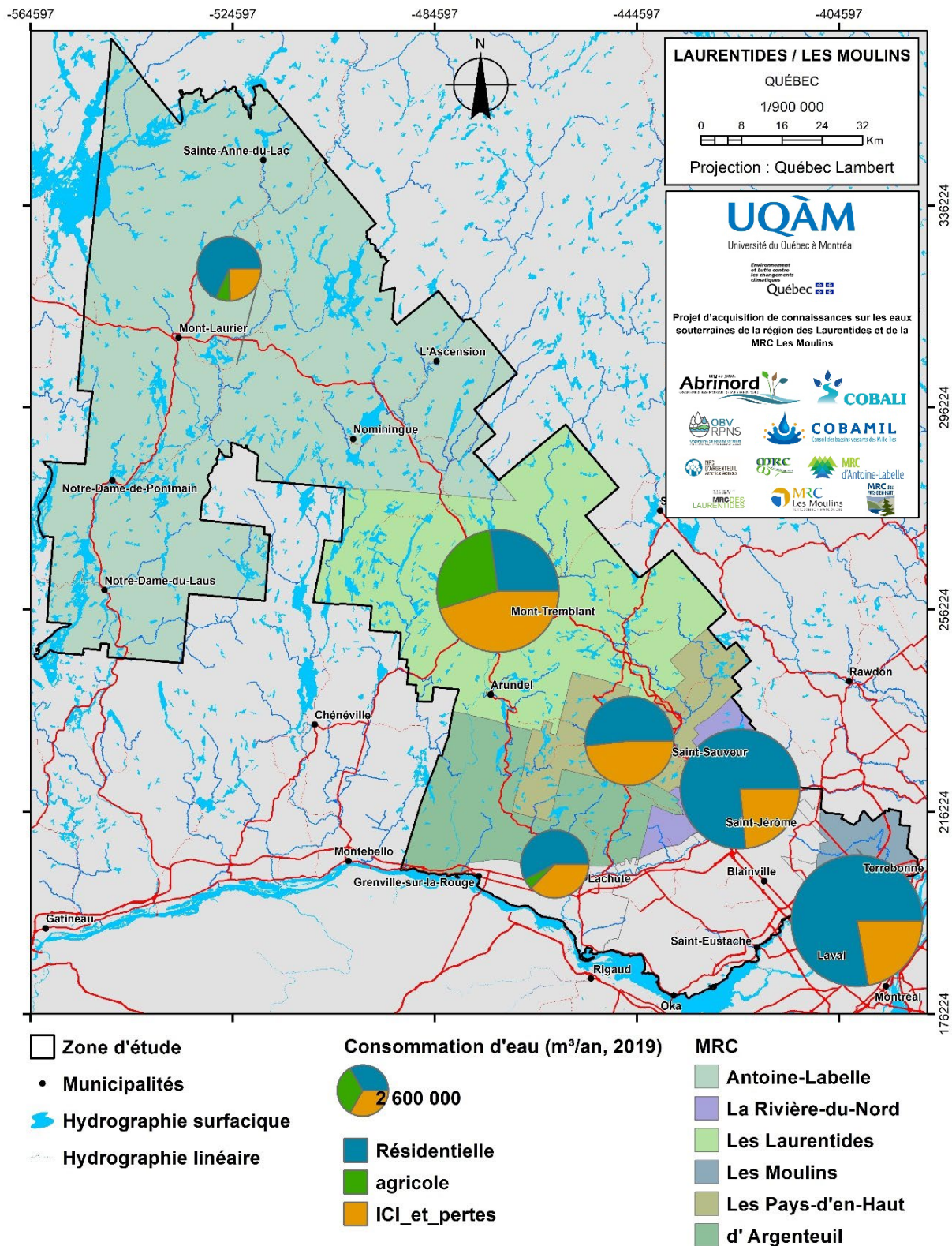


Figure 64 : Consommation de l'eau selon les usages par MRC

5.2 Qualité de la ressource

5.2.1 Normes de potabilité

Selon le règlement sur la Qualité de l'eau potable (Québec, 2019), dix dépassements de normes de potabilité ont été relevés dans 392 puits (**Tableau 27** et **Figure 65**). Un dépassement en baryum, sept dépassements en fluor et deux dépassements en uranium ont été répertoriés. À ceux-ci s'ajoutent 40 dépassements en manganèse selon les recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2019). Les dépassements en baryum, fluor et uranium proviennent de puits qui pompent dans un aquifère au roc fracturé. Les dépassements en manganèse proviennent également des aquifères de roc fracturé et de dépôts meubles. Les dépassements en uranium se trouvent dans le secteur de Mont-Laurier et Ferme-Neuve connu pour la présence de lithologies riches en uranium (Lacoste, 2000). Les dépassements en fluor et baryum sont en majorité présents dans la MRC Les Moulins, expliqués par la présence de lithologies sédimentaires et de présence d'eau évoluée (cf. section 4.5.1).

Les paramètres bactériologiques ont été analysés dans tous les puits domestiques. Les résultats pointent des conditions très locales découlant de l'état et de l'entretien du puits, et de la présence de contaminations ponctuelles ou diffuses à proximité de ce dernier. Selon les normes du règlement sur la Qualité de l'eau potable (Québec, 2019), 105 puits ont au moins un dépassement de la norme de potabilité, soit 29% de puits de la région (**Tableau 28** et **Figure 66**). Selon le règlement sur la qualité de l'eau potable, une eau est considérée comme potable seulement si elle ne contient aucune bactérie d'origine fécale (*E. coli* ou entérocoques). Dans le cas contraire, l'eau est considérée comme non potable et un avis d'ébullition est émis au propriétaire du puits, et celui-ci est dans l'obligation de le désinfecter. Si l'eau contient plus de 10 coliformes totaux et/ou plus de 200 bactéries atypiques, l'eau est considérée comme non conforme. Une inspection du puits doit alors être réalisée. Il faut noter que la présence de bactéries atypiques en trop grands nombres peut venir masquer le comptage des bactéries pathogènes. La majorité des dépassements de normes de portabilité ont été observés dans des puits de surface en nappe libre. Ces derniers sont plus vulnérables aux sources de contamination potentielles des alentours et aux variations hydrologiques au printemps et à l'automne.

Tableau 27 : Sommaire des dépassements de normes de qualité de l'eau potable*

Paramètres	Statistiques (mg/L)					Critère de potabilité (mg/L)	NB dépassements
	Nb	Min	Max	Moyenne	Ecart-Type		
Arsenic (As)	392	0	0,002	0,000004	0,000	0,01	0 (0 %)
Bore (B)	392	0	1,900	0,045	0,172	5	0 (0 %)
Baryum (Ba)	392	0	3,000	0,045	0,164	1	1 (1 %)
Cadmium (Cd)	392	0	0,002	0,00001	0,000	0,005	0 (0 %)
Chrome (Cr)	392	0	0,002	0,0001	0,000	0,05	0 (0 %)
Fluor (F)	392	0	4,100	0,210	0,394	1,5	7 (2 %)
Manganèse (Mn)**	392	0	2,000	0,050	0,158	0,12	40 (10 %)
Nitrites/Nitrates (NO₂-NO₃, mg N/L)	392	0	5,200	0,481	0,765	10	0 (0 %)
Plomb (Pb)	392	0	0,003	0,0003	0,000	0,01	0 (0 %)
Antimoine (Sb)	392	0	0,000	0,000	0,000	0,006	0 (0 %)
Sélénium (Se)	392	0	0,000	0,000	0,000	0,01	0 (0 %)
Uranium (U)	392	0	0,033	0,001	0,003	0,02	2 (1 %)

*Règlement de la qualité de l'eau potable (MELCC, 2019)

Tableau 28 : Sommaire des dépassements de type bactériologique

Paramètres	Nb	Critère de potabilité	Nb dépassements	Proportion (%)
Bactéries atypiques	361	< 200	58	16%
Coliformes totaux	361	< 10	100	28%
Escherichia coli	361	> 0	25	7%
Entérocoques fécaux	361	< 0	38	11%
Puits avec au moins un dépassement			105	29%





5.2.2 Objectifs esthétiques

Les objectifs esthétiques ne font pas l'objet de normes de potabilité (Santé Canada, 2019) puisqu'ils n'ont pas d'incidence sur la santé. Ils sont des recommandations afin d'éviter des inconvénients lors de l'utilisation de l'eau comme l'odeur, le goût, des tâches ou des obstructions du système de tuyauteries. Les dépassements d'objectifs esthétiques présents dans la région d'études sont en pH (181), manganèse (103), dureté (28), fer (30), MTD (40), sulfures (16), aluminium (9), sodium (8), chlorures (5) et température (3) (**Tableau 29**).

Tableau 29 : Sommaire des dépassements objectifs esthétiques (OE)

Paramètres	Nb	Statistiques (mg/L)				Critère OE	Nb Dépassement
		Min	Max	Moyenne	Écart-Type		
Aluminium (Al) (mg/L)	392	0,00	0,34	0,01	0,03	0,10	9 (2 %)
Chlorures (Cl-) (mg/L)	392	0,12	1900,00	27,07	110,77	250,00	5 (1 %)
Fer (Fe) (mg/L)	392	0,00	8,80	0,18	0,84	0,30	30 (7 %)
Manganèse (Mn) (mg/L)	392	0,00	2,00	0,05	0,16	0,02	103 (26 %)
Sodium (Na) (mg/L)	392	0,64	1200,00	24,11	84,66	200	8 (2 %)
pH	392	4,90	10,13	7,15	0,99	7-10,5	181 (46 %)
Sulfure (S ²⁻) (mg/L)	392	0,00	1,20	0,02	0,10	0,05	16 (4 %)
Sulfates (SO ₄ ²⁻) (mg/L)	392	0	180	16,26	20,31	500	0 (0 %)
Température (°C)	392	1,13	17,43	9,33	1,79	15,0	3 (1 %)
Dureté (mg/L)	392	21,00	826,00	175,66	128,10	200	28 (7 %)
TDS (mg/L)	392	0,00	469,51	89,12	68,38	500	40 (1 %)

Les recommandations pour un pH entre 7 et 10,5 sont importantes afin de contrôler la corrosion et diminuer le relargage des éléments composant la plomberie. Le manganèse est un élément issu de la dissolution des minéraux que l'on retrouve dans les sols et roches, il devient problématique lorsque la concentration est telle qu'elle engendre de la précipitation et des dépôts qui peuvent colmater les tuyaux. La dureté est contrôlée par les concentrations en calcium et magnésium, notamment dans les sédiments ou les roches sédimentaires d'origine chimique ou biochimique. Ce type de roche est très peu présent dans le secteur du Bouclier canadien, mais caractéristique dans le secteur de la MRC Les Moulins qui est située sur la plateforme

sédimentaire des Basses-Terres du Saint-Laurent. Les dépassements en chlorures (Cl^-), sodium (Na) et sulfures (S^{2-}) sont d'ailleurs également retrouvés dans ce secteur dû aux roches carbonatées et la présence de sédiments de la mer de Champlain (Globensky, 1987). Les cartes de la localisation des dépassements pour chacun des paramètres présentés au **Tableau 29** sont présentées à l'**ANNEXE I**.

5.2.3 Pesticides et produits pharmaceutiques (PPP)

Des pesticides ou des produits pharmaceutiques ont été retrouvés dans 63 puits sur les 386 puits échantillonnés (16 %). Sept pesticides ont été détectés à l'échelle de traces (ng/L) : l'herbicide pendiméthaline (2 puits) et les insecticides phosmet (4 puits), diazinon (2 puits), malathion (2 puits), parathion (2 puits), chlorpyros (1 puits) et dinotéfuran (1 puits) (**Figure 67** et **ANNEXE F**). Aucun dépassement de norme de potabilité n'a été observé. Il est toutefois important de souligner que seulement 16 pesticides sont normés au Québec et parmi ceux-ci, seulement sept ont été analysés dans cette étude (carbaryl, carbofuran, chlorpyros, diazinon, diuron et metolachlor, simazine).

Trois produits pharmaceutiques sont retrouvés dans l'eau souterraine, l'acétaminophène (44 puits), le carbamazépine (4 puits) et le ciprofloxacine (1 puits), pour un total de 49 détections dans 386 puits (**Figure 67** et **ANNEXE F**). La caféine a été mesurée dans 266 puits (non illustré). Les traces d'acétaminophène sont retrouvées à l'échelle régionale dans des puits résidentiels. Les traces de ciprofloxacine et de carbamazépine sont présentes dans des puits d'approvisionnement municipaux. Les produits pharmaceutiques peuvent provenir de différentes sources, mais le plus probable ici semble être des fuites diffuses de fosses septiques non étanches ou de champs d'épuration résidentiels, ou encore des fuites de réseau de collecte des eaux usées ou des rejets de stations d'épuration (Husk et al., 2019).

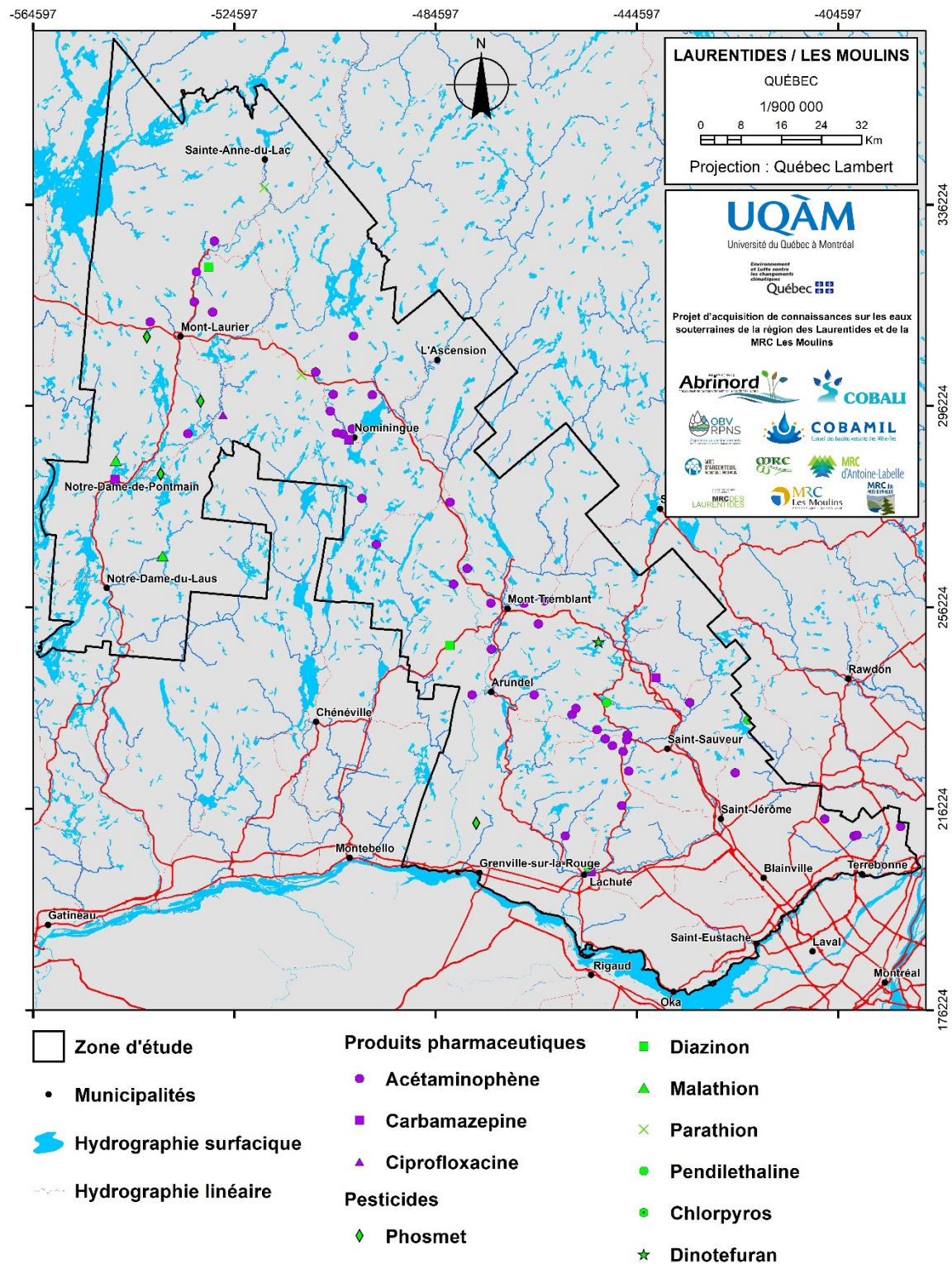


Figure 67 : Pesticides et produits pharmaceutiques détectés dans l'eau souterraine

5.3 Indice de vulnérabilité DRASTIC

L'indice de vulnérabilité DRASTIC (Aller et al., 1987) permet de cartographier la vulnérabilité de l'eau souterraine à un contaminant provenant de la surface et circulant verticalement vers la zone saturée. La carte est réalisée en procédant au traitement de sept couches d'information spatiale : la profondeur du niveau de l'eau souterraine (D), la recharge de l'eau souterraine (R), le type d'aquifère (A), le type de sol (S), la pente (T), la nature de la zone non saturée (I) et la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Les détails de la méthodologie utilisée sont présentés à l'**ANNEXE G**. Dans ce présent projet, l'indice DRASTIC est calculé pour le premier aquifère rencontré. Par exemple, dans les zones de till ou de faible épaisseur de dépôts meubles (< 5 m) l'indice DRASTIC est celui du socle rocheux. Dans les zones où l'épaisseur des dépôts meubles perméables est > 5 m, l'indice DRASTIC est celui des dépôts en surface. Finalement, dans le cas où il y a plus de 5 m de dépôts argileux en surface, l'indice représente la vulnérabilité des matériaux géologiques sous l'argile. Sur la zone d'étude, 78 % du territoire présente une vulnérabilité DRASTIC moyenne (entre 100 et 180), 16 % présente une vulnérabilité DRASTIC faible (< 100) et 6 % présente une vulnérabilité DRASTIC élevée (> 180) (**Figure 68**). La forte proportion du territoire ayant une vulnérabilité moyenne provient du fait que les paramètres DRASTIC sont relativement homogènes sur la zone d'étude. Les contrastes importants dans les conditions hydrogéologiques et dans la répartition spatiale de l'indice DRASTIC (**Figure 69**) se trouvent dans les secteurs de dépôts granulaires perméables des grandes vallées (profondeur de la nappe faible, recharge importante, aquifère perméable, sol bien drainé, pente faible, zone non saturée peu épaisse et conductivité hydraulique élevée) et dans les zones argileuses des Basses-Terres du Saint-Laurent (nappe profonde, aquifère captif, recharge faible, aquifère peu perméable, sol mal drainé, conductivité hydraulique moyenne à faible).

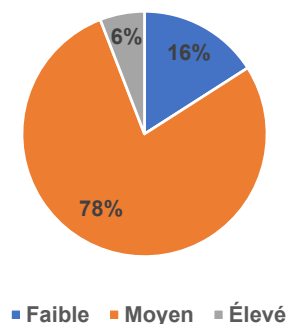


Figure 68 : Répartition des indices de vulnérabilité DRASTIC. Les classes sont basées sur le RPEP (RPEP, 2020), c.-à-d. qu'un indice faible est < 100, un indice moyen est entre 100 et 180 et un indice élevé est > 180.

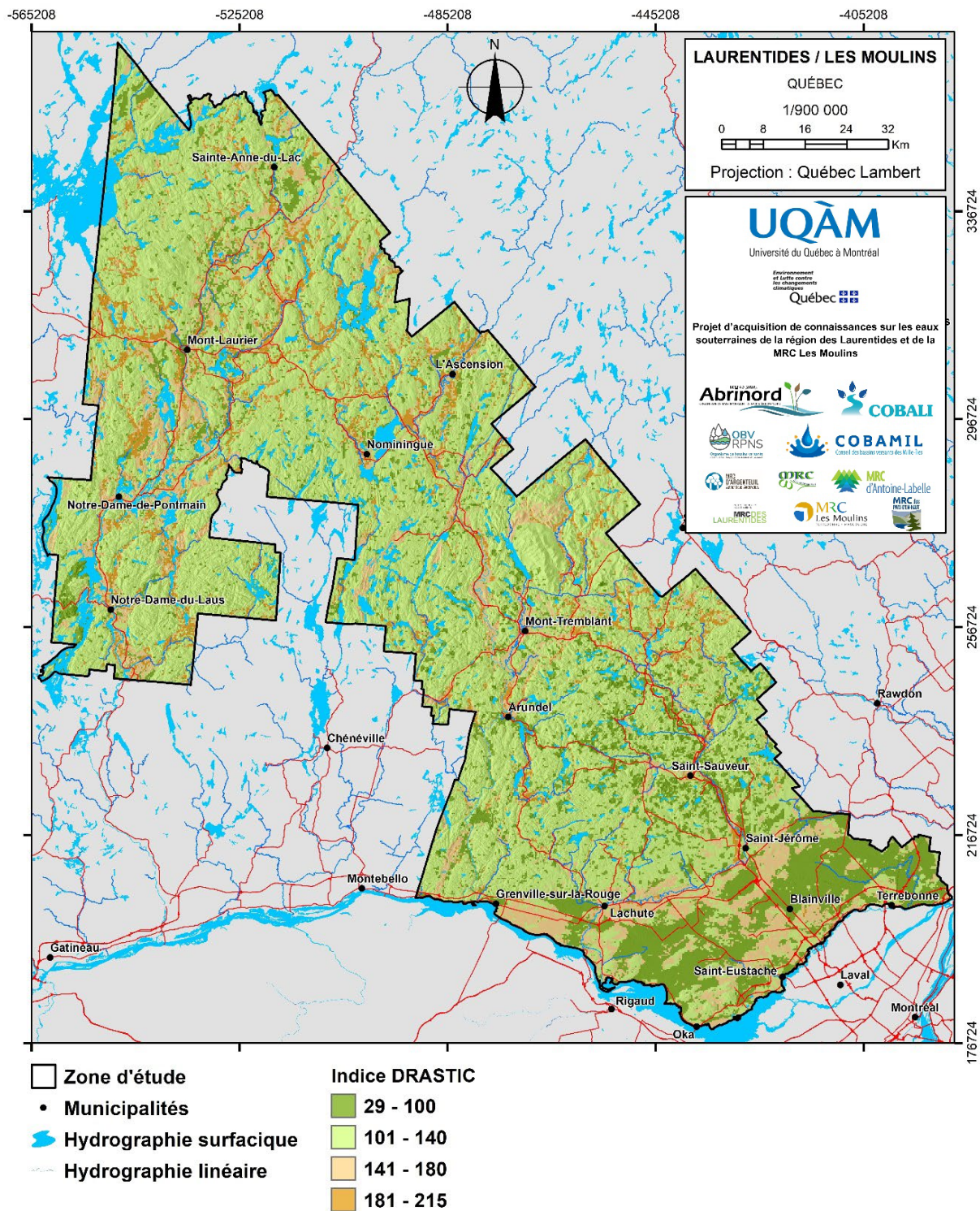


Figure 69 : Indice de vulnérabilité DRASTIC du premier aquifère rencontré

5.4 Densité du risque anthropique

Les sources de contamination peuvent être diffuses, c.-à-d. des faibles quantités de polluants atteignant l'aquifère sur de grandes surfaces (p.ex. épandages agricoles ou sels de route), ou ponctuelles, c.-à-d. des quantités plus importantes de polluants atteignant l'aquifère sur des surfaces limitées (p.ex. : stations-service, usines, sites d'enfouissement). Afin de cartographier les risques pour l'eau souterraine associés aux activités anthropiques, celles-ci ont été classées selon le risque qu'elles représentent pour l'eau souterraine à l'aide des données des Codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) qui ont été classées selon le protocole présenté à l'**ANNEXE H**. Pour l'analyse, les données agricoles et les données de résidences ayant un système de collecte des eaux usées autonome ont été retirées afin d'enlever les sources de pollution diffuse dont le risque est plus complexe à quantifier.

Les valeurs maximales et minimales de la densité du risque anthropique pour les activités rencontrées sur la zone d'étude varient de 48 (raffinage et transformation de produits pétroliers, sites d'enfouissement, etc.) à 7 (commerce de détail, production et distribution d'électricité et de gaz, etc.). La densité du risque anthropique (DRA) est calculée en faisant la somme des risques de chacune des activités anthropiques par km², donc plus la valeur est élevée, plus il y a d'activités ayant un potentiel élevé d'impact anthropique sur l'eau souterraine. Les valeurs de DRA pour chaque km² varient de 0 (faible) à 101 (élevé) (**Figure 70**). Le 75^e percentile de toutes les valeurs de DRA estimées pour la zone d'étude est 4,3. Cette valeur a été utilisée, de manière arbitraire, pour cartographier les secteurs de densités faibles et élevées. Les zones ayant les DRA élevées sont principalement situées dans le secteur de la rivière du nord où la densité de la population est élevée, le secteur de la municipalité de Mont-Tremblant, ainsi que quelques noyaux urbanisés de la MRC Antoine-Labelle. Il est intéressant de constater que les points où des sites contaminés sont répertoriés (MELCC, 2019d) se trouvent dans les zones de DRA élevées. Ces zones sont donc à surveiller pour la contamination potentielle de l'eau souterraine. Dans la zone où la DRA est élevée, l'indice DRASTIC moyen est 117 (écart-type de 37), c.-à-d. représentant une vulnérabilité moyenne de l'eau souterraine. Près de 70 % de la zone a un indice DRASTIC inférieur à 140 ce qui indique qu'en moyenne, les zones à fort risque anthropique ont une vulnérabilité faible (près de 100) à moyen (< 140) (**Figure 71**).

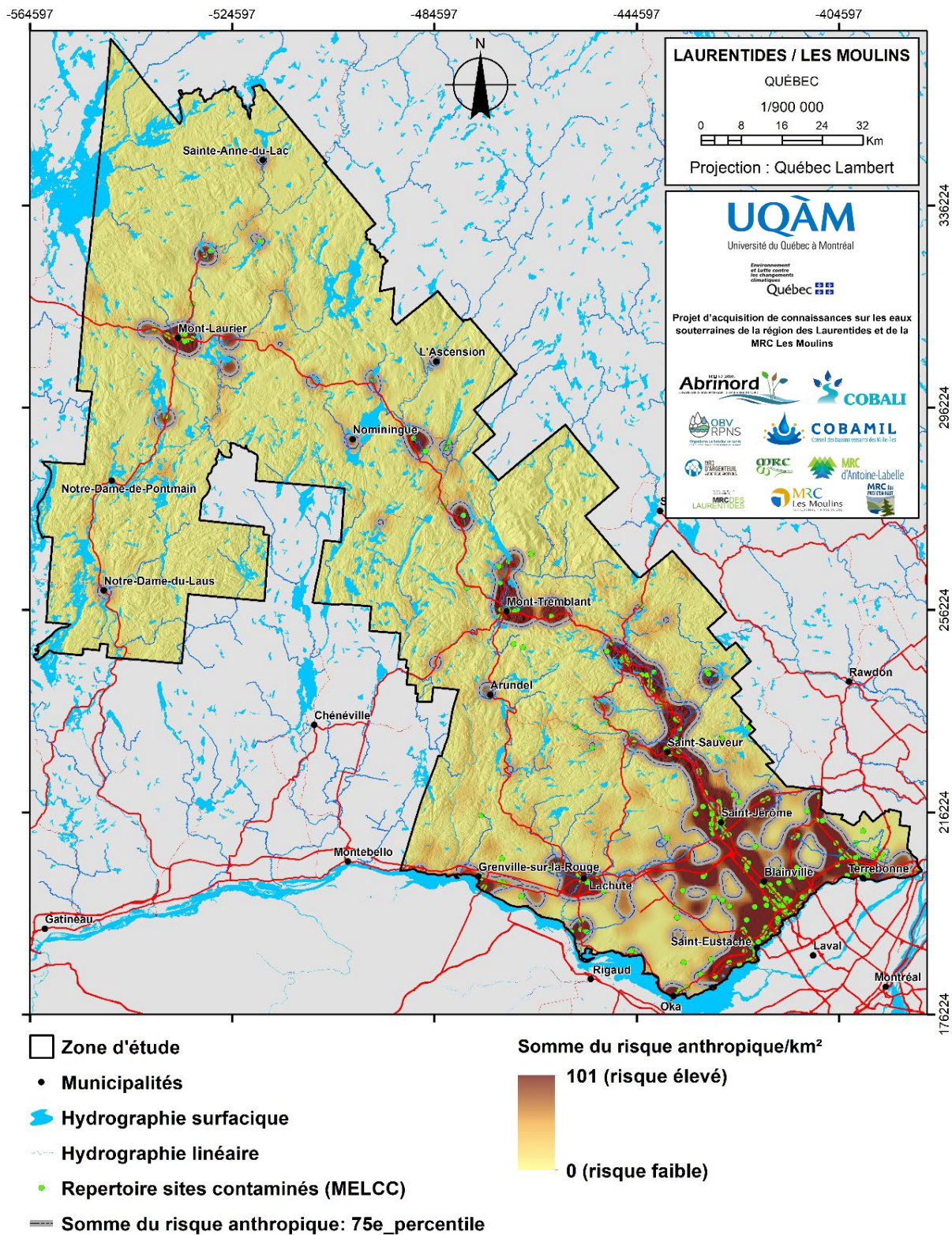


Figure 70 : Densité du risque anthropique et localisation des sites contaminés (MELCC, 2019d)

Il est important de considérer qu'une activité ponctuelle n'entraîne généralement pas une contamination à l'échelle régionale. Cependant, la présence de plusieurs activités anthropiques présentant un risque pour l'eau souterraine pourrait entraîner, à long terme, une contamination sur une superficie de l'ordre du km². Les résultats de qualité de l'eau obtenus dans ce projet n'ont montré aucune contamination importante. Toutefois, il faut rappeler que de nombreux contaminants potentiels (notamment les produits pétroliers) n'ont pas été analysés et que l'échantillonnage a été réalisé à l'échelle régionale avec un échantillon à tous les 25 km² en moyenne.

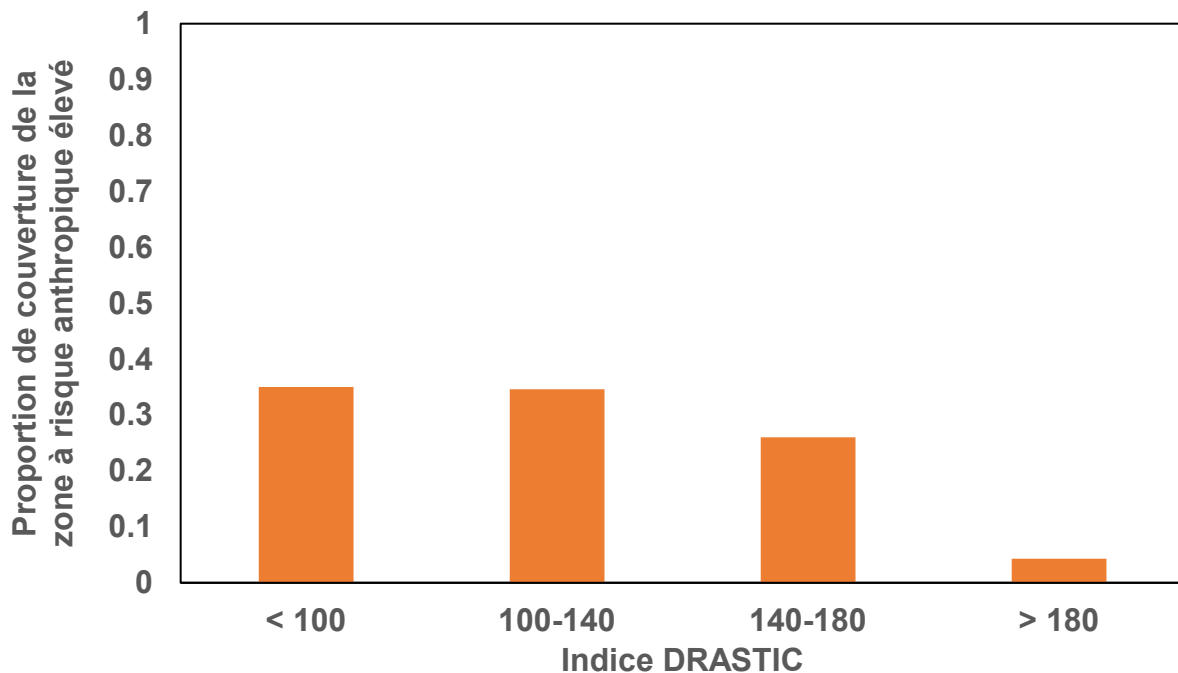


Figure 71 : Proportion de superficies selon l'indice DRASTIC pour les zones où la densité des activités anthropiques est élevée

5.5 Contextes hydrogéologiques régionaux

Le portrait hydrogéologique de la zone d'étude du PACES-LAULM peut être établi à la lumière des données stratigraphiques, géochimiques et hydrogéologiques. Afin d'établir un lien avec les quatre grands bassins versants principaux (rivières du Lièvre, Rouge, du Nord et Mascouche), le portrait hydrogéologique est tracé pour les zones de gestion intégrée de l'eau (ZGIE) du COBALI, du RPNS, d'ABRINORD et du COBAMIL.

5.5.1 Hydrostratigraphie et confinement

Les ZGIE du COBALI, du RPNS et ABRINORD, situées en grande partie dans la Province géologique du Grenville, sont dominées par les contextes de till, d’affleurement rocheux et de dépôts meubles reposant directement sur le roc (89, 95 et 84 % respectivement) (**Tableau 30**). Ces trois ZGIE ont des proportions relativement faibles de dépôts perméables captifs sous argile, sans dépôts perméables affleurants (argile/till-roc et argile/sable-gravier/till-roc), mais celle de COBALI présente les valeurs les plus importantes (total 4 %). Parmi ces trois ZGIE, celle d’ABRINORD a une proportion plus importante (7 %) d’aquifères de dépôts meubles affleurants (sable/argile/till-roc et sable-gravier/argile/sable et gravier/till-roc) (total 9 %). La ZGIE COBAMIL, située dans les Basses-Terres du Saint-Laurent, est couverte par les dépôts perméables sur argile (sable/argile/till-roc; 29 %) et par les contextes hydrostratigraphiques où l’argile est en surface (21 % argile/till-roc et 16 % argile/sable-gravier/till-roc).

La prédominance de l’argile en surface a un impact direct sur le confinement de l’aquifère régional (roc fracturé) et de certaines zones de dépôts granulaires en nappe captive. Ainsi, sur la ZGIE COBAMIL, 68 % du territoire est en conditions de nappe captive et seulement 25 % sont en conditions de nappe libre (**Tableau 31**). À l’inverse, les ZGIE de COBALI, RPSN et ABRINORD sont très majoritairement en conditions de nappe libre respectivement sur 87, 93 et 84 % de leur territoire.

Tableau 30 : Proportions (%) du territoire des ZGIE pour les différents contextes hydrostratigraphiques

ZGIE	Till-roc	Sable-gravier/roc	Argile/till-roc	Argile/sable-gravier/till-roc	Sable/argile/till-roc	Sable-gravier/argile/sable-gravier/till-roc
COBALI	45	44	1	4	3	3
RPNS	52	43	0	1	2	2
ABRINORD	42	42	4	3	7	2
COBAMIL	7	18	21	16	29	9

Tableau 31 : Proportions (%) du territoire des ZGIE pour les différents degrés de confinement

ZGIE	Libre	Semi-captif	Captif
COBALI	87	9	4
RPNS	93	4	3
ABRINORD	83	4	13
COBAMIL	25	7	68

5.5.2 Recharge

La recharge potentielle moyenne et médiane varie relativement peu d'une ZGIE à l'autre (**Tableau 32**). Les ZGIE COBALI, ABRINORD, et RPNS reçoivent en moyenne légèrement plus de recharge que la ZGIE COBAMIL. La présence importante de zones captives sur cette dernière a un impact direct sur la recharge qui peut atteindre l'aquifère régional puisque 68 % de ce territoire est en condition de nappe captive. La majeure partie de la recharge potentielle sur la ZGIE COBAMIL ne s'infiltre probablement pas en profondeur, mais retourne plutôt rapidement dans le réseau hydrographique et les milieux humides sous forme de débit de base ou de résurgences. Pour les autres ZGIE, les secteurs d'aquifères captifs peuvent aussi limiter la recharge à certains endroits, mais ceux-ci sont généralement localisés dans les vallées et leur impact sur la recharge de l'aquifère régional est limité.

Tableau 32 : Recharge moyenne et médiane pour chacune des ZGIE pour la période 1961-2017

ZGIE	Moyenne (mm/a)	Médiane (mm/an)	% de confinement
COBALI	198	236	4
RPNS	203	236	3
ABRINORD	209	243	13
COBAMIL	187	197	68

5.5.3 Vulnérabilité, activité anthropique et qualité de l'eau souterraine

L'analyse de l'indice DRASTIC par ZGIE montre bien le lien entre les contextes hydrostratigraphiques et la vulnérabilité. Les ZGIE qui sont dominées par des contextes de till et d'affleurement de roc ont un indice DRASTIC plus élevé (**Tableau 33**). La présence de contextes argileux réduit fortement l'indice DRASTIC dans la zone du COBAMIL. C'est sur la zone du

COBALI que l'on retrouve le plus fort pourcentage de couverture d'indice DRASTIC élevé. Cependant, c'est aussi dans cette zone que l'indice de densité anthropique est le plus faible quoique similaire à la zone RPNS (**Tableau 34**). Dans la zone ABRINORD, la combinaison d'une couverture de 74 % d'indice DRASTIC moyen et de 19 % de densité anthropique élevée constitue un risque plus important pour l'altération de la qualité de l'eau souterraine. Pour la zone COBAMIL, la proportion d'indices anthropiques élevée est la plus importante (54 %) parmi les quatre ZGIE, mais la zone est dominée par des indices DRASTIC faibles (69 %) et la proportion d'indices élevés est nulle. La combinaison des indices DRASTIC moyens et élevés et de densité anthropique élevée ne se traduit pas nécessairement par un impact anthropique plus important sur l'eau souterraine. En effet, les proportions de dépassement de la norme bactériologique et de détection des pesticides et produits pharmaceutiques sont assez uniformes entre les ZGIE. Une proportion légèrement plus élevée de dépassement de la norme bactériologique dans la zone de COBAMIL pourrait cependant être liée à la présence d'agriculture.

Tableau 33 : Proportion (%) du territoire des ZGIE pour l'indice DRASTIC

ZGIE	< 100	100-180	> 180
COBALI	10	80	10
RPNS	11	82	7
ABRINORD	22	74	4
COBAMIL	69	31	0

Tableau 34 : Proportion de territoire (%) des ZGIE pour l'indice de densité anthropique et la couverture agricole

ZGIE	Bas	Élevé (> 4,6)	Couverture agricole
COBALI	97	3	5
RPNS	94	6	3
ABRINORD	81	19	1
COBAMIL	46	54	26

Tableau 35 : Proportion (%) des échantillons qui dépassent la norme bactériologique et où des pesticides ou des produits pharmaceutiques (PPP) ont été détectés

ZGIE	Avec dépassement bactériologique	Détection PPP
COBALI	24	20
RPNS	35	17
ABRINORD	21	18
COBAMIL	39	15

En conclusion, il existe un contraste important entre les ZGIE de la partie nord de la zone d'étude et celle des Basses-Terres. Malgré ce contraste, la proportion de dépassement de norme bactériologique et de détection de pesticides et de produits pharmaceutiques est assez homogène entre ces quatre zones. Comme il a été mentionné à la section **5.2.1** les dépassements sont liés aux conditions locales (champ d'épuration, mauvais état du puits, lien avec l'eau de surface, etc.) du puits plutôt qu'à une problématique régionale. Cependant, les ZGIE COBALI, RPNS et ABRINORD demeurent des zones avec des indices DRASTIC moyens à élever et une approche par précaution est de mise dans la planification régionale.

5.5.4 Prélèvement en eau

Les données des prélèvements de plus de 75 m³/j (grands préleveurs d'eau - GPE), ont été résumées pour chacune des ZGIE (incluant la zone AFSOQ). Ces résultats diffèrent donc de ceux présentés à la section **5.1**. Les résultats montrent qu'il existe une importante différence dans les prélèvements d'eau entre les ZGIE (**Figure 72** et **Figure 73**). Cette différence peut s'expliquer par la densité de population contrastée entre les ZGIE. Autant au niveau de l'eau souterraine que de l'eau de surface, les ZGIE ABRINORD et COBAMIL sont celles où les prélèvements sont les plus importants et aussi celles qui ont les plus grandes populations. L'augmentation de prélèvement en eau souterraine décrite à la section **5.1** semble être principalement située sur la zone ABRINORD. Les autres ZGIE ne montrent pas d'augmentation et ont des prélèvements plutôt stables dans le temps, autant au niveau de l'eau souterraine que de l'eau de surface. Lorsque répartis sur les superficies des ZGIE, les volumes d'eau prélevés pour l'eau souterraine, représentent de 0 à 9 mm/an et de 1 à 24 mm/an pour l'eau de surface (

Tableau 36 et Figure 74). Comparés à la recharge, ces prélèvements en eau souterraine représentent de <1 à 5 % de la recharge selon la ZGIE. Cependant, en considérant que seulement le tiers de la zone COBAMIL est à nappe libre et peut recevoir de la recharge (**Section 5.5.2**), les prélèvements en eau souterraine représentent 16 % de la recharge pour cette ZGIE.

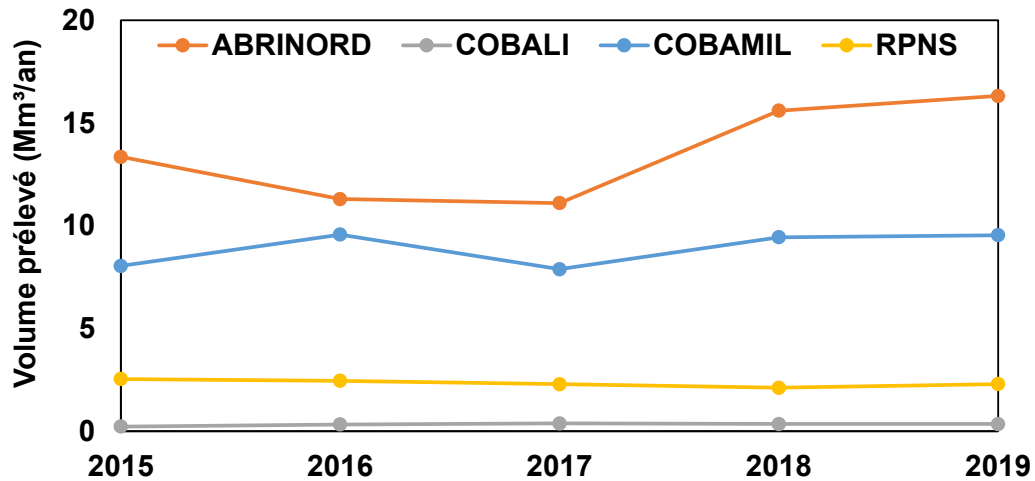


Figure 72 : Volume d'eau souterraine prélevé selon le registre des grands préleveurs pour chacune des ZGIE (MELCC, 2019e ; données confidentielles)

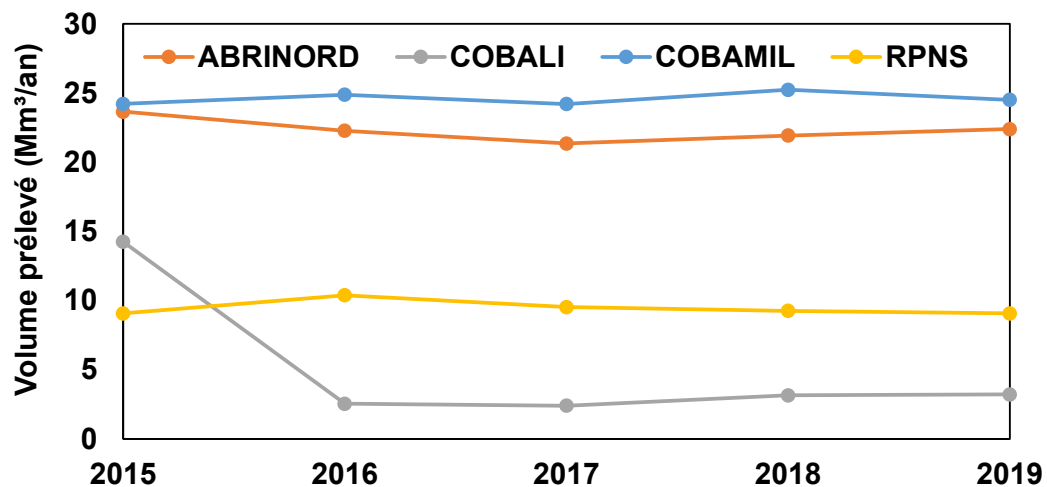


Figure 73 : Volume d'eau de surface prélevé selon le registre des grands préleveurs pour chacune des ZGIE (GPE MELCC 2019 ; données confidentielles)

Tableau 36 : Équivalent en mm/an des prélèvements en eau selon la ZGIE pour l'année 2019

ZGIE	Prélèvement 2019	
	Souterrain (mm)	Surface (mm)
COBALI	0 (< 1 %)	1
RPNS	1 (<1 %)	2
ABRINORD	7 (3 %)	10
COBAMIL	9 (5 %)	24

* Les nombres entre parenthèses représentent le % de la recharge moyenne

En conclusion de cette section sur les contextes hydrogéologiques régionaux, une synthèse conceptuelle du bilan hydrique est présentée à la **Figure 74**. La zone d'étude reçoit en moyenne 1042 mm d'apports verticaux (pluie et fonte de neige) par année. De ce volume, près de la moitié (491 mm/an) retourne à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. Le reste est distribué à 65 % en ruissellement (353 mm/an) et 35 % sous forme de recharge (198 mm/an). Cette recharge peut circuler rapidement dans les aquifères granulaires superficiels ou dans ceux de roc fracturé pour rejoindre les petits cours d'eau ou les milieux humides sous forme d'émergence. La recharge peut aussi circuler pour de plus longues périodes dans l'aquifère de roc fracturé et, dans une moindre mesure, dans les aquifères granulaires d'importance. Cette eau souterraine circule des hauts topographiques vers les grandes vallées ou elle fait résurgence dans les cours d'eau majeurs et les aquifères granulaires lorsque les conditions hydrogéologiques le permettent. À l'échelle de la zone d'étude, les prélèvements en eau souterraine représentent 1 mm (~0,5 % de la recharge) et les prélèvements en eau de surface 5 mm (~1 % de la recharge et du ruissellement). Ces flux sont très faibles comparativement aux autres composantes du bilan hydrique à l'échelle régionale. Cependant, il convient de rappeler que le portrait régional pourrait ne pas être représentatif des pressions qui s'exercent sur l'eau souterraine à l'échelle locale.

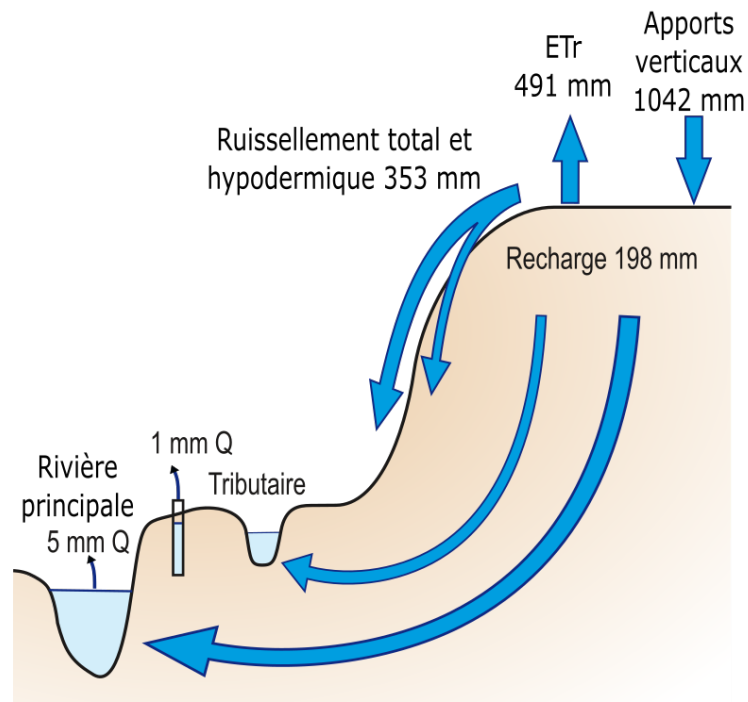


Figure 74 : Modèle conceptuel du bilan hydrogéologique régional

5.6 Gestion durable de la ressource

5.6.1 Principes de gestion durable

La gestion durable des ressources eau est basée sur le principe du développement durable selon lequel les ressources doivent être utilisées de manière à répondre aux besoins de la société tout en préservant leur pérennité à long terme (https://fr.wikipedia.org/wiki/Gestion_de_l%27eau). Comme pour d'autres types de ressources, la gestion durable des ressources en eau est le résultat d'un ensemble de compromis définis et acceptés par la société. Les ressources en eau sont exposées à un ensemble de pressions parmi lesquelles certaines concernent plus spécifiquement l'eau souterraine. Celles-ci incluent entre autres les pressions suivantes :

- Les changements dans l'utilisation du territoire qui peuvent avoir des effets sur les processus du cycle de l'eau à l'échelle des bassins versants, incluant par exemple l'étalement urbain, le développement de nouvelles terres agricoles ou la mise en place de nouvelles industries ;
- L'augmentation des prélèvements d'eau souterraine pour répondre aux changements dans l'utilisation du territoire, notamment pour l'alimentation en eau potable (p.ex. : augmentation de la population ou transfert des sources de surface vers les sources souterraines pour assurer le maintien de la qualité de l'eau et de la quantité d'eau disponible), pour l'agriculture (p.ex. : nouvelles cultures maraîchères nécessitant de l'irrigation) ou pour l'industrie (p.ex. : pompages en lien avec le développement minier) ;
- L'augmentation de la pollution d'origine diffuse, par exemple en lien avec l'intensification des pratiques agricoles et l'augmentation de pollutions ponctuelles accidentelles en lien avec le développement industriel du territoire ;
- La réduction de la recharge de l'eau souterraine à la suite de l'imperméabilisation des surfaces, du développement forestier, de l'assèchement des milieux humides ou du réchauffement du climat.

Le projet PACES-LAULM a permis de construire une base de données fiable des connaissances actuelles sur l'eau souterraine pour une région où peu de données étaient jusqu'ici disponibles. Les cartes développées ainsi que l'ensemble des travaux complémentaires réalisés dans le cadre de ce projet forment une base solide sur laquelle pourra s'appuyer la gestion durable des ressources en eau.

Cette gestion doit maintenant être réalisée de concert avec les acteurs de l'eau de la région. Plusieurs ont d'ailleurs été partenaires du PACES-LAULM, ce qui témoigne de leur grand intérêt pour la question. Pour y parvenir, les acteurs locaux doivent toutefois disposer d'indicateurs de quantité et de qualité qui traduisent l'état actuel de la ressource en eau souterraine dans la région.

Afin de permettre une gestion à long terme, ces indicateurs devront faire l'objet d'un suivi à long terme.

5.6.2 Indicateurs de quantité

Dans son ensemble, la zone du PACES-LAULM ne présente pas de déficit en eau. Comme ailleurs dans le Québec méridional, les précipitations sont largement excédentaires et l'évapotranspiration est limitée. Cependant, en raison de l'omniprésence du roc fracturé du Bouclier canadien qui forme un aquifère peu productif et de la faible étendue spatiale des aquifères granulaires situés dans les vallées, certaines régions de la zone d'étude peuvent éprouver des difficultés à s'approvisionner, ou encore se voir contraintes à limiter les débits exploités.

Les prélèvements actuels d'eau souterraine dans la région représentent 1 mm/an, soit 0,5 % de la recharge annuelle. Ces chiffres régionaux peuvent toutefois cacher des disparités locales importantes en raison de la nature même des matériaux géologiques (contraste entre le roc fracturé peu productif et les aquifères granulaires plus productifs). Une augmentation des pompages dans les aquifères granulaires, pour satisfaire aux besoins en eau de nouveaux développements résidentiels ou pour répondre à une intensification des activités agricoles ou industrielles, pourrait poser des contraintes sur les ressources en eau souterraine et entraîner des conflits d'usage. Selon les données disponibles, dans les conditions actuelles, il ne semble toutefois pas y avoir de problématique de quantité d'eau disponible dans les aquifères superficiels. Néanmoins, les temps de séjour montrent que, malgré la présence d'eau souterraine relativement jeune (quelques décennies), une certaine proportion de l'eau souterraine peut également séjourner dans l'aquifère pendant plusieurs millénaires. La présence de cette eau souterraine plus ancienne doit inciter à la prudence dans l'exploitation de la ressource.

Une baisse des niveaux de nappe qui résulterait par exemple d'une diminution de la recharge en raison de l'imperméabilisation des surfaces ou des changements climatiques pourrait avoir un impact global sur le cycle de l'eau dans l'ensemble de la zone d'étude, notamment par l'augmentation du ruissellement de surface et la diminution des débits de base des cours d'eau. Ces changements pourraient entraîner une réduction des volumes d'eau souterraine disponibles pour les municipalités, altérer la qualité de l'eau en rivière et modifier les écosystèmes aquatiques de la région.

Le RSESQ mis en place par le MELCC depuis le début des années 2000 est un outil crucial pour assurer le suivi des niveaux d'eau dans les aquifères. Le projet PACES-LAULM a permis de bonifier de manière importante les forages du RSESQ dans la région d'étude, ce qui permettra de

monitorer les changements de niveaux de nappe qui pourraient résulter d'une baisse de la recharge. Toutefois, en raison des fluctuations intra- et interannuelles naturelles de la recharge, les données acquises par les nouvelles stations du RSESQ mises en place grâce au PACES-LAULM ne seront pleinement utiles pour détecter des tendances (à la hausse ou à la baisse) des niveaux piézométriques que dans une ou deux décennies.

Le réseau existant de stations de mesure des débits en rivière, opéré par la DEH, est un autre outil important pour suivre les flux d'eau souterraine. Dans le Québec méridional, les débits en rivière intègrent en général une proportion importante d'écoulements souterrains et hypodermiques. Ceci est particulièrement vrai dans la zone d'étude où une grande partie de la recharge est drainée par les cours d'eau. Le suivi des débits, particulièrement en période d'étiage, est donc très important pour quantifier l'eau souterraine qui s'écoule dans la portion la plus dynamique de l'aquifère. Il serait donc souhaitable que les stations existantes de mesure des débits en rivière soient maintenues à long terme et que le réseau soit éventuellement développé. Le PACES-LAULM lègue notamment à la région deux des trois bassins versants expérimentaux instrumentés en cours de projet. Les organismes de bassin versant impliqués vont assurer le suivi de ces stations.

5.6.3 Indicateurs de qualité

La zone d'étude ne présente aucun problème important de qualité de l'eau souterraine, et ce, malgré une vulnérabilité DRASTIC moyenne dans 78% de la région. Afin d'assurer une eau souterraine de qualité, la gestion durable de la ressource en eau doit néanmoins inclure le suivi d'indicateurs de qualité. Le PACES-LAULM a permis de mettre en évidence certains indicateurs de qualité de l'eau qui devraient être suivis par les différents acteurs de l'eau de la région. Ceux-ci incluent certains polluants normés dits *naturels* parce qu'ils proviennent de la roche elle-même (baryum, fluor, manganèse et uranium), d'autres proviennent de sources anthropiques (nitrates, bactéries, pesticides et produits pharmaceutiques). Plusieurs objectifs esthétiques ont également été dépassés, mais ceux-ci ne représentent pas nécessairement une problématique pour la santé humaine.

Seuls quelques dépassements des normes pour la qualité de l'eau potable ont été observés, la plupart étant causés par des échanges naturels entre les formations géologiques et l'eau souterraine qui circule dans les aquifères. Ces dépassements, dans l'ensemble peu nombreux, concernent le baryum (un puits), le fluor (7 puits) et l'uranium (2 puits). Les teneurs en manganèse ont dépassé la norme de Santé Canada (2019) à 10 % des puits échantillonnés. Ces concentrations sont le résultat du contact entre les formations géologiques et l'eau souterraine et

ne sont pas de source anthropique, mais peuvent poser des problèmes de santé publique notamment pour les jeunes enfants (cf. Bouchard et al., 2011).

Plusieurs critères esthétiques ont été dépassés, notamment celui pour le pH (46 %), le manganèse (26 %), le fer (7 %) et les sulfures (4 %). Le dépassement des critères peut entraîner des problèmes d'odeur, de goût, de coloration ou d'obstruction des conduites. Les critères dépassés sont difficiles à contrôler, mais certaines mesures peuvent être prises par les municipalités et propriétaires de puits pour en réduire les inconvénients.

Les concentrations en nitrates dans l'eau souterraine font partie des problématiques qui doivent être suivies plus particulièrement. Même si elles n'excèdent nulle part le critère pour la qualité de l'eau potable, les concentrations mesurées dans les zones de recharge sont parfois supérieures au seuil d'impact anthropique. L'analyse a montré que les activités agricoles sont en partie responsables des concentrations observées. Les pesticides et les produits pharmaceutiques ont été détectés dans 16 % des puits de la zone d'étude, mais leurs concentrations sont près du seuil de détection et aucun dépassement de norme n'a été observé. Néanmoins, leur détection dans l'eau souterraine indique que certains produits d'origine anthropique peuvent migrer rapidement des réseaux d'égouts municipaux et des systèmes individuels de traitement de l'eau usée vers l'eau souterraine. Leur détection confirme également la présence d'eau souterraine ayant séjourné relativement brièvement dans l'aquifère avant d'être pompée, ce qui est indicateur de problématiques possibles de contamination à court et moyen terme. Par ailleurs, au moins un dépassement de normes bactériologiques a été observé dans 29 % des échantillons, ce qui indique des cas locaux de contamination.

L'activité en ^{222}Rn dans l'eau est déterminée par la nature des formations géologiques, mais ne fait pas l'objet d'une norme pour la qualité de l'eau potable au Canada. Néanmoins, une eau dans laquelle l'activité en ^{222}Rn est élevée peut être la source du radon dans l'air (p.ex. : par dégazage dans la douche) et peut-être indicateur de la présence de ^{222}Rn dans l'air et dans les sous-sols. Il serait pertinent de sensibiliser les propriétaires à cette problématique dans les zones où les activités les plus élevées ont été mesurées.

6 CONCLUSIONS

Le but du projet PACE-LAULM était d'établir la cartographie hydrogéologique d'une portion de la région administrative des Laurentides et de la MRC Les Moulins, incluant une partie ou l'entièreté des ZGIE COBALI, RPNS, ABRINORD et COBAMIL, tout en intégrant les données du projet AFSOQ (Savard et al., 2013). Les travaux réalisés ont permis d'atteindre les objectifs spécifiques suivants : 1) comprendre la nature des formations aquifères, 2) connaître l'origine et les directions d'écoulement de l'eau souterraine, 3) décrire la qualité de l'eau souterraine, 4) quantifier le bilan hydrique de l'aquifère et les volumes d'eau exploitables de façon durable, et 5) déterminer la vulnérabilité de l'eau souterraine aux activités humaines.

Les travaux réalisés ont permis de décrire la nature des formations géologiques aquifères et de délimiter les principaux aquifères granulaires de la région. De manière générale, le roc fracturé du Bouclier canadien est peu productif et la majorité des villes pompent dans des aquifères de dépôts meubles situés dans les vallées. L'eau souterraine circule généralement des hauts topographiques vers les vallées qui drainent l'eau vers la rivière des Outaouais au Sud. La recharge potentielle de l'aquifère est relativement importante et se produit principalement au printemps. Le bilan hydrique des aquifères fracturés et granulaires montre que les volumes d'eau souterraine utilisés par les particuliers, les villes, l'agriculture et l'industrie représentent environ 0,5 % de la recharge. En général, il est admis que l'exploitation de l'eau souterraine est durable tant qu'elle ne dépasse pas 10% de la recharge. Même s'il ne semble pas y avoir de pression anthropique importante sur les volumes d'eau souterraine à l'échelle régionale, la situation pourrait être différente localement. Les temps de séjour de l'eau souterraine montrent toutefois que l'eau souterraine résulte d'un mélange d'eau relativement jeune et d'eau plus ancienne. Les vitesses d'écoulement souterrain apparaissent donc comme étant très variables.

L'eau souterraine de la zone d'étude est de bonne qualité de manière générale. Mis à part des dépassements pour la bactériologie, peu de dépassements des normes pour la qualité de l'eau potable ont été identifiés. Certaines problématiques doivent néanmoins être suivies pour éviter des problèmes de santé publique. En particulier, la présence de nitrates, de pesticides et de produits pharmaceutiques, même si leurs concentrations ne dépassent pas les normes pour l'eau potable, est indicatrice de sources de pollution. Les concentrations élevées en manganèse sont également une préoccupation, de même que les importantes activités en radon dans certains secteurs. La vulnérabilité DRASTIC de l'aquifère est considérée comme moyenne sur la grande majorité de la zone d'étude. Des secteurs de vulnérabilité élevée ont été identifiés dans les

aquifères granulaires de vallée en condition de nappe libre, tandis que les aquifères granulaires en condition de nappe captive de la portion sud de la zone d'étude sont peu vulnérables.

Les résultats de ce projet permettent d'émettre certaines recommandations :

- Le PACES-LAULM fournit des données hydrogéologiques de base à l'échelle régionale. Dans l'ensemble de la région, l'aquifère fracturé est peu productif et les principales ressources en eau souterraine proviennent d'aquifères de dépôts meubles dont l'étendue est limitée. Il est recommandé de **réaliser des études complémentaires à l'échelle locale** avant tout nouveau projet d'exploitation de l'eau souterraine ou le développement de projets qui pourraient avoir un impact sur la quantité ou la qualité de l'eau souterraine.
- Il est recommandé d'assurer le suivi à long terme des **nouveaux forages mis en place dans le PACES-LAULM et récemment intégrés au RSESQ**. Des stations supplémentaires du RSESQ pourraient être mises en place dans les plus importants aquifères granulaires pour monitorer l'évolution des niveaux de nappe de manière plus spécifique dans les aquifères sollicités. Ces suivis sont absolument nécessaires pour identifier des changements à long terme des volumes d'eau disponibles. Il est également recommandé de maintenir et si possible étendre le suivi à long terme des débits en rivières.
- La recharge potentielle est relativement importante dans l'ensemble de la région. Toutefois, en raison de l'omniprésence du roc fracturé peu perméable du Bouclier canadien, de vastes régions ne présentent pas un potentiel aquifère important. Il est donc recommandé **d'assurer la protection des zones de recharge**, dans le but d'assurer un renouvellement maximal de la nappe. Ceci implique de planifier le développement urbain de manière à limiter l'imperméabilisation des surfaces.
- Il est recommandé de réaliser un **suivi à long terme des forages où des dépassements de normes ont été observés**, notamment dans cas de la présence de polluants agricoles (nitrates et pesticides). D'autres campagnes d'échantillonnage pourraient être réalisées pour confirmer la présence de problématiques spécifiques et le cas échéant identifier des solutions possibles. Un suivi annuel de la qualité bactériologique par les propriétaires de puits est recommandé dans les secteurs où des dépassements ont été observés.
- Il est recommandé d'**informer la population au sujet de certaines problématiques de santé publique** liées à l'utilisation de l'eau souterraine par les particuliers. Notamment, la contamination bactériologique de l'eau des puits individuels, la présence fréquente de manganèse et les importantes activités en ^{222}Rn dans certains secteurs pourraient faire l'objet d'une campagne de sensibilisation.

Finalement, il est important de rappeler que les résultats présentés dans ce rapport ont été rendus possibles grâce à la collaboration logistique et financière de plusieurs partenaires de la région : les organismes de bassin versant COBALI, RPNS, ABRINORD et COBAMIL, les MRC d'Antoine-Labelle, d'Argenteuil, de la rivière du Nord, des Laurentides, des Pays-d'en-Haut et des Moulins. Le projet PACE-LAULM apporte des connaissances très importantes pour la région au sujet de l'eau souterraine. Les données acquises, les cartes produites et les analyses qui en découlent seront directement utiles pour la gestion de la ressource en eau à l'échelle de la zone d'étude. La disponibilité des nouvelles données soulève maintenant le défi de la poursuite des suivis initiés dans le projet et de la mise à jour des informations au fur et à mesure qu'elles deviendront disponibles. Un autre défi majeur consistera à assurer le transfert des connaissances acquises au sein de la communauté d'acteurs dans la région. Une approche proactive pour relever ces défis permettra de maximiser les retombées du projet PACES-LAULM et d'assurer la pleine utilisation des données disponibles dans les plans de gestion du territoire et des ressources en eau existants.

7 RÉFÉRENCES

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Pretty, R.J., Hackett, G. (1987) DRASTIC: A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA-600/2-87-035.
- BDPPAD (2020) Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD). Financière agricole du Québec. Téléchargé du site : [Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées \(BDPPAD\) – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](https://donneesquebec.ca).
- BDTQ (2016) Base de données topographiques du Québec à l'échelle de 1/20 000. Téléchargé du site : [Cartes topographiques à l'échelle de 1/20 000 – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](https://donneesquebec.ca)
- Bergeron, O. (2016) Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2, Québec, ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques., Direction du suivi de l'état de l'environnement.
- Beaumier, Kirouac, Leduc (1994) Base de données géochimiques du Québec, en totalité support numérique (D. g. d. l. i. géographique, Trans.). Québec : Ministère des Ressources naturelles.
- Bouchard, M.F., Sauvé, S., Barbeau, B., Legrand, M., Brodeur, M.-E., Bouffard, T., Limoges, E., Bellinger, D.C., Mergler, D. (2011) Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 119(1), <https://doi.org/10.1289/ehp.1002321>.
- Boucher, C. (2013) Datation et traçage par les isotopes des gaz rares des eaux souterraines d'Amos, Abitibi-Témiscamingue, Canada. Mémoire de maîtrise en sciences de la Terre, Université du Québec à Montréal, Montréal QC, 155 p.
- Chabot-Grégoire, J. (2022) Recharge des eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC les Moulins. Mémoire de maîtrise en sciences de la Terre, UQAM. 165 p.
- Charron et al. (2020) Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU II) – Laurentides. MAPAQ, Groupe Agéco, Ouranos, IRDA, INRS: 278.
- Chen, J. (2019) A discussion on issues with radon in drinking water. *Radiation Protection Dosimetry* 185(4) : 526-531.
- CIC et MDDELCC (2016) Cartographie détaillée des milieux humides. Téléchargé du site : [Milieux humides cartographie détaillée – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](https://donneesquebec.ca)
- Climat Québec (2019) Données climatiques : observations quotidiennes 1961-2017 (cartes, graphiques et tableaux). Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/surveillance/index.asp>
- Corriveau, L., Morin, D. (2001) Modelling 3D architecture of western Grenville from surface geology, xenoliths, styles of magma emplacement, and Lithoprobe reflectors. *Canadian Journal of Earth Sciences* 37.

- Corriveau, L., Van Breeman, O (2000) Docking of the Central Metasedimentary Belt to Laurentia in geon 12 : evidence from the 1.17-1.16 Ga Chevreuil intrusive suite and host gneisses. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37: 253-269.
- Crough (1981) Mesozoic hotspot epeirogeny in eastern North America. *Geology*. Volume 9.
- Darby et al. (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* doi: 10.1136/bmj.38308.477650.63
- Davis, D. W., Nantel, S. (2016) Datations U-Pb dans la partie nord de la Ceinture centrale des métasédiments, Province de Grenville, région de Mont-Laurier. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles : 52 p.
- DEH (2019) Direction de l'expertise hydrique du Québec. Données hydrométriques Récupéré de <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm>
- Doig (1991) U-Pb zircon dates of Morin anorthosite suite rocks. *Journal of Geology* 99: 729-738.
- Drolet et al. (2013) An approach to define potential radon emission level maps using indoor radon concentration measurements and radiogeochemical data positive proportion relationships. *J Environ Radioact* 124: 57-67.
- Dubois, E., Larocque, M., Gagné, S., Meyzonnat, G. (2021) Simulation of long-term spatiotemporal variations in regional-scale groundwater recharge : contributions of a water budget approach in cold and humid climates. *HESS*, 25: 6567-6589.
- Eckhardt, K. (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19: 507–515.
- Emslie et Hunt (1990) Ages and Petrogenetic Significance of Igneous Mangerite-Charnockite Suites Associated with Massif Anorthosites, Grenville Province. *The Journal of Geology* 98.
- Fontes, J.C., Garnier, F. (1979) Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: A review of the existing models and a new approach. *Water Resources Research* 15, 399-413.
- Friedman et Martignole (1995) Mesoproterozoïque sedimentation, magmatism, and metamorphic in the southern part of the Grenville Province (western Quebec): U-Pb geochronological constraints. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 32: pages 2103-2114.
- Fröhlich, K., Gellermann, R. (1987) On the potential use of uranium isotopes for groundwater dating. *Chemical Geology : Isotope Geoscience section* 65 : 67-77.
- Globensky, Y. (1987) Géologie des basses-terres du Saint-Laurent, Ministère de l'Énergie et des Ressources : 63.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 : 80–91.
- GRHQ (2019) Geobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ). Téléchargée du site : [Géobase du réseau hydrographique du Québec \(GRHQ\) – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://geobase.gouv.qc.ca/geobase/index.cfm).
- Healy, R. W., Scanlon, B. R. (2010) Estimating Groundwater Recharge, Cambridge University Press, United Kingdom.
- Hébert et Nantel (1999) Géologie de la région de l'Ascension (31J/10), Ministère des Ressources naturelles.

- Higgins (1982) Magmatism in the Grenville Province Since the Grenville Orogeny. *Geoscience Canada*. Volume 9, numéro 2.
- Husk, B., Sebastian, S., Leduc, R., Takser, L., Savary, O., Cabana, H. (2019) Pharmaceuticals and pesticides in rural community drinking waters of Quebec, Canada- a regional study on the susceptibility to source contamination. *Water Quality Research Journal*, 54(1) : 47-56.
- IRDA (2018a) Pédologie : région 14 – Lanaudière. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Récupéré de <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>
- IRDA (2018b) Pédologie : région 15 – Laurentides. Québec : Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Récupéré de <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>
- Jacoby (1975) Région du réservoir Baskatong, Service de l'exploration géologique. Ministère de l'Énergie et des ressources naturelles. RG167, 62 p.
- Kendall, C. (1998) Tracing Nitrogen Sources and Cycling in Catchments. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Ed. C. Kendall & J.J. McDonnell. Amsterdam, Pays-Bas, Elsevier, pp. 519-576.
- Kulongoski, J.T. et Hilton, D.R. (2011) *Applications of Groundwater Helium, Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Volume 1, 1 ed. Springer Isotope Handbook, Reston, VA, É.-U., pp. 285-304.
- Lacoste, P. (2000) Géologie de la région de Ferme-Neuve (31J/11), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles : 36.
- Lamarche, L., Bondue, V., Lemelin, M.J., Lamothe, M. and Roy, A.G. (2007) Deciphering the Holocene evolution of the St. Lawrence River drainage system using luminescence and radiocarbon dating. *Quaternary Geochronology*, 2 : 155-161.
- Laplante, R. (2021) Évaluation d'approches complémentaires pour déterminer la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine et de surface. Mémoire de maîtrise, UQAM. 127 p.
- Lefebvre, K., Barbecot, F., Larocque, M. Gagné, S. (2013) Full range determination of ^{222}Rn at the watershed scale by liquid scintillation counting. *Applied Radiation and Isotopes*, 75: 71-76.
- Lemieux, J.M., Sudicky, E.A., Peltier, W.R., Tarasov, L. (2008) Dynamics of groundwater recharge and seepage over the Canadian landscape during the Wisconsinian glaciation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 113.
- Lucas, L.L., Unterwieser, M.P. (2000) Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 105: 541-549.
- Lyne, V., Hollick, M. (1979) Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, vol. 1979, Institute of Engineers Australia National Conference, Perth, 89–93.
- MAMH (2020) Portrait provincial de l'affectation du territoire (PPAT). Québec, Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation.
- Marine, I.W. (1979) The use of naturally occurring helium to estimate groundwater velocities for studies of geological storage of radioactive waste. *Water Resources Research* 15 : 1130-1136.

- Martignole, L., Corriveau, L. (1991) Lithotectonic studies in the Central Metasedimentary Belt of the southern Grenville Province: lithology and structure of the Saint-Jovite map area, Quebec. Commission géologique du Canada, 77-87.
- McIntosh, J.C., Walter, L.M. (2005) Volumetrically significant recharge of Pleistocene glacial meltwaters into epicratonic basins: Constraints imposed by solute mass balances. *Chemical Geology*, 222 : 292-309.
- MELCC (2018a) Système d'information hydrogéologique (SIH). Québec : ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Récupéré de www.sih.mddep.gouv.qc.ca/
- MELCC (2019a) Bassins hydrographiques multiéchelle. Téléchargée du site : [Bassins hydrographiques multiéchelles du Québec – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://Bassins%20hydrographiques%20multi%C3%A9chelles%20du%20Qu%C3%A9bec%20%E2%80%93%20Jeu%20de%20donn%C3%A9es%20%E2%80%93%20Donn%C3%A9es%20Qu%C3%A9bec%20(donneesquebec.ca).).
- MELCC (2019b) Milieux humides potentiels. Téléchargé du site : [Milieux humides potentiels – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://Milieux%20humides%20potentiels%20%E2%80%93%20Jeu%20de%20donn%C3%A9es%20%E2%80%93%20Donn%C3%A9es%20Qu%C3%A9bec%20(donneesquebec.ca))
- MELCC (2019c) Utilisation du territoire. Téléchargé du site : [Utilisation du territoire – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://Utilisation%20du%20territoire%20%E2%80%93%20Jeu%20de%20donn%C3%A9es%20%E2%80%93%20Donn%C3%A9es%20Qu%C3%A9bec%20(donneesquebec.ca))
- MELCC (2019d) Répertoire des terrains contaminés. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>
- MELCC (2019e) . Registre des grands préleveurs d'eau (GPE). Données confidentielles soumises à une entente d'utilisation obtenues auprès du MELCC.
- MELCC (2021) Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ). : Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les Changements climatiques. Récupéré de <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/piezo/index.htm>
- MERN (2014) Symboles et abréviations de la carte géoscientifique. DV 2014-06. Gouvernement du Québec, direction générale de Géologie Québec. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2976606>
- MERN (2020a) Géologie du socle. Jeu de données cartographique. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. [Géologie du socle – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://G%C3%A9ologie%20du%20socle%20%E2%80%93%20Jeu%20de%20donn%C3%A9es%20%E2%80%93%20Donn%C3%A9es%20Qu%C3%A9bec%20(donneesquebec.ca))
- MERN (2020b) Géologie du Quaternaire. Jeu de données cartographique. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. [Géologie du quaternaire – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://G%C3%A9ologie%20du%20quaternaire%20%E2%80%93%20Jeu%20de%20donn%C3%A9es%20%E2%80%93%20Donn%C3%A9es%20Qu%C3%A9bec%20(donneesquebec.ca)).
- MFFP (2020) LIDAR – Modèles numériques (terrain, canopée, pente). Téléchargé du site : [LiDAR – Modèles numériques \(terrain, canopée, pente\) – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](http://LiDAR%20%E2%80%93%20Mod%C3%A8les%20num%C3%A9riques%20(terrain,%20canop%C3%A9e,%20pente)%20%E2%80%93%20Jeu%20de%20donn%C3%A9es%20%E2%80%93%20Donn%C3%A9es%20Qu%C3%A9bec%20(donneesquebec.ca).).
- Moukhils et al. (2015) Géologie de la région de Parent Haut-Saint-Maurice (partie ouest du Grenville), Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. GG201301, 62 p.
- Nantel, S. (2008) Géologie et aperçu de la géochronologie et des indices métalliques découverts entre 1996 et 2007 dans la partie nord de la Ceinture centrale des métasédiments, Province de Grenville, région de Mont-Laurier. Québec, Ministère des Ressources naturelles. 20 p.

- Pinti, D.L., Béland-Otis, C., Tremblay, A., Castro, M.C., Hall, C.M., Marcil, J.-S., Lavoie, J.-Y., Lapointe, R. (2011) Fossil brines preserved in the St-Lawrence Lowlands, Québec, Canada as revealed by their chemistry and noble gas isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75 : 4228-4243.
- Pithon, F. (2021) Caractérisation de la géochimie de l'eau souterraine et de l'impact anthropique sur la qualité de l'eau dans la région des Laurentides et de la MRC les Moulins. Mémoire de maîtrise en sciences de la Terre, UQAM. 206 p.
- PPAT (2018) Portrait provincial en aménagement du territoire. Ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire (MAMH).
- Québec (2019) Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP). Q-2, r.40. [q-2, r. 40 – Règlement sur la qualité de l'eau potable \(gouv.qc.ca\)](#).
- Randour, I., Daigneault R.-A., Lamothe M., Roy M., Robitaille Al. (2020) Cartographie des formations superficielles de la région des Laurentides phase 2. Rapport soumis à Énergie et Ressources Naturelles Québec. MB 2020-08. 51 p.
- Randour, I., Daigneault R.-A., Lamothe M., Roy M., Robitaille Al. (2021) Cartographie des formations superficielles de la région des Laurentides phase 3. Rapport soumis à Énergie et Ressources Naturelles Québec. MB 2021-02. 51 p.
- Roy M., Daigneault R.-A., Lamothe M., Milette S., Dubois-Verret M., Godbout P.-M., Horth N., Hurtubise M.-A., Lamarche O., Leduc É. (2015) Rapport des travaux de cartographie des formations superficielles réalisés dans la portion est du territoire municipalisé de l'Outaouais en 2011-2012. M.Rapport présenté à Énergie et ressources naturelles Québec. MB 2015-03. 43 p.
- RPEP (2020) chapitre Q-2, r. 35.2 : Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection Loi sur la qualité de l'environnement Québec : Législateur du Québec. Récupéré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2035.2>
- Saby, M., Larocque, M., Pinti, D.L., Barbecot, F., Sano, Y., Castro, M.C. (2016) Linking groundwater quality to residence times and regional geology in the St. Lawrence Lowlands, southern Quebec, Canada. *Applied Geochemistry*, 65 : 1-13.
- Santé Canada (2019) Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada – Tableau sommaire. Santé Canada. Récupéré de https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/pdf/pubs/water-eau/sum_guide-res_recom/sum_guide-res_recom-fra.pdf
- Savard, M. M., Nastev, M., Paradis, D., Lefebvre, R., Martel, R., Cloutier, V., Hamel, A. (2013) Inventaire canadien des ressources en eau souterraine : Caractérisation hydrogéologique régionale et intégrée du système fracturé du sud-ouest du Québec. (Vol. Bulletin 587). Commission géologique du Canada.
- SIEF (2018) Cartographie du 5^e inventaire écoforestier du Québec méridional, méthode et données associées. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers. Téléchargé du site : [Carte écoforestière originale et résultats d'inventaire – Jeu de données – Données Québec \(donneesquebec.ca\)](#)
- Sleep (1990) Montereian hotspot track: A long-lived mantle plume. *Journal of geophysical research : Solid Earth* 95: 21983-21990.

- Tardani, D., Roulleau, E., Pinti, D.L., Pérez-Flores, P., Daniele, L., Reich, M., Sanchez-Alfaro, P., Morata, D. et Richard, L. (2021) Structural control on shallow hydrogeochemical processes at Cavihue-Copahue Volcanic Complex (CCVC), Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 414, 107228.
- Taylor, C.B. (1977) Tritium enrichment of environmental waters by electrolysis: development of cathodes exhibiting high isotopic separation and precise measurement of tritium enrichment factors. *International Atomic Energy Agency* 42:32-42.
- Tolstikhin, I.N. et Kamensky, I.L. (1969) On the possibility of groundwater dating by the tritium-helium-3 method. *Geokhimiya* 8: 1027-1029.
- Vautour, G., Pinti, D.L., Méjean, P., Saby, M., Meyzonnat, G., Larocque, M., Castro, M.C., Hall, C.M., Boucher, C., Roulleau, E., Barbecot, F., Takahata, N., Sano, Y. (2015) $^3\text{H}/^3\text{He}$, ^{14}C and (U-Th)/He groundwater ages in the St. Lawrence Lowlands, Quebec, Eastern Canada. *Chemical Geology* 413: 94-106.

8 ANNEXE A – PHOTOGRAPHIES DES TRAVAUX DE TERRAIN



Photographie 1 : Forage au site du puits 04060002 à Notre-Dame-du-Laus (6 juin 2019)



Photographie 2 : Purge des puits 04060002 et 04060003 à Notre-Dame-du-Laus (6 juin 2019)



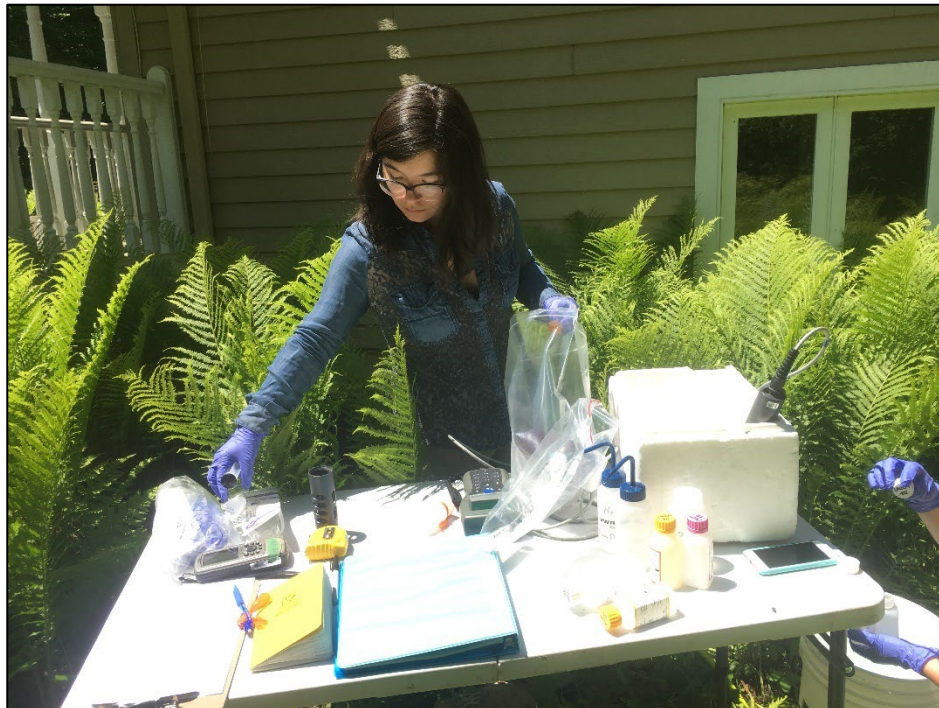
Photographie 3 : forage du puits 04020006 à Arundel (17 juin 2020)



Photographie 4 : Forage du puits 04010005 à Sainte-Agathe-des-Monts (16 juin 2020)



Photographie 5 : Essai de pompage et échantillonnage au puits 04010003 à Morin-Heights (25 octobre 2019)



Photographie 6 : Échantillonnage de l'eau souterraine chez un particulier (été 2019)



Photographie 7 : Mesure de débit à l'aide de l'ADCP sur la rivière À Simon (17 octobre 2018)



Photographie 8 : Mesure du niveau d'eau souterraine et des paramètres physico-chimique dans un milieu humide (juin 2019)

9 ANNEXE B – SCHEMAS DES PUIITS D'OBSERVATION INSTALLES DANS LE CADRE DU PROJET

SCHÉMA DU PUIITS D'OBSERVATION No. 04010003

MUNICIPALITÉ: **Morin-Heights**
 LONGITUDE: **-74.25541**
 LATITUDE: **45.90075**
 NAD: **83**
 ALTITUDE DU SOL (m): **243**

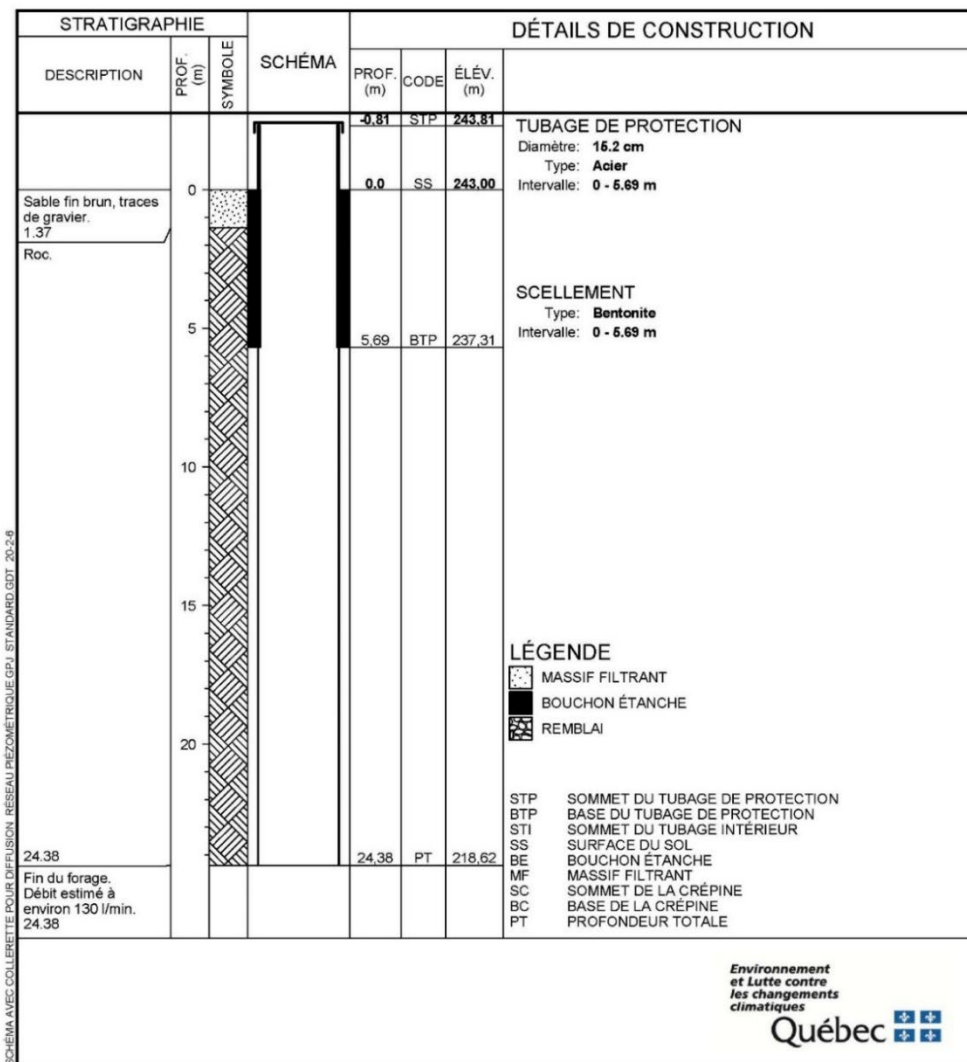
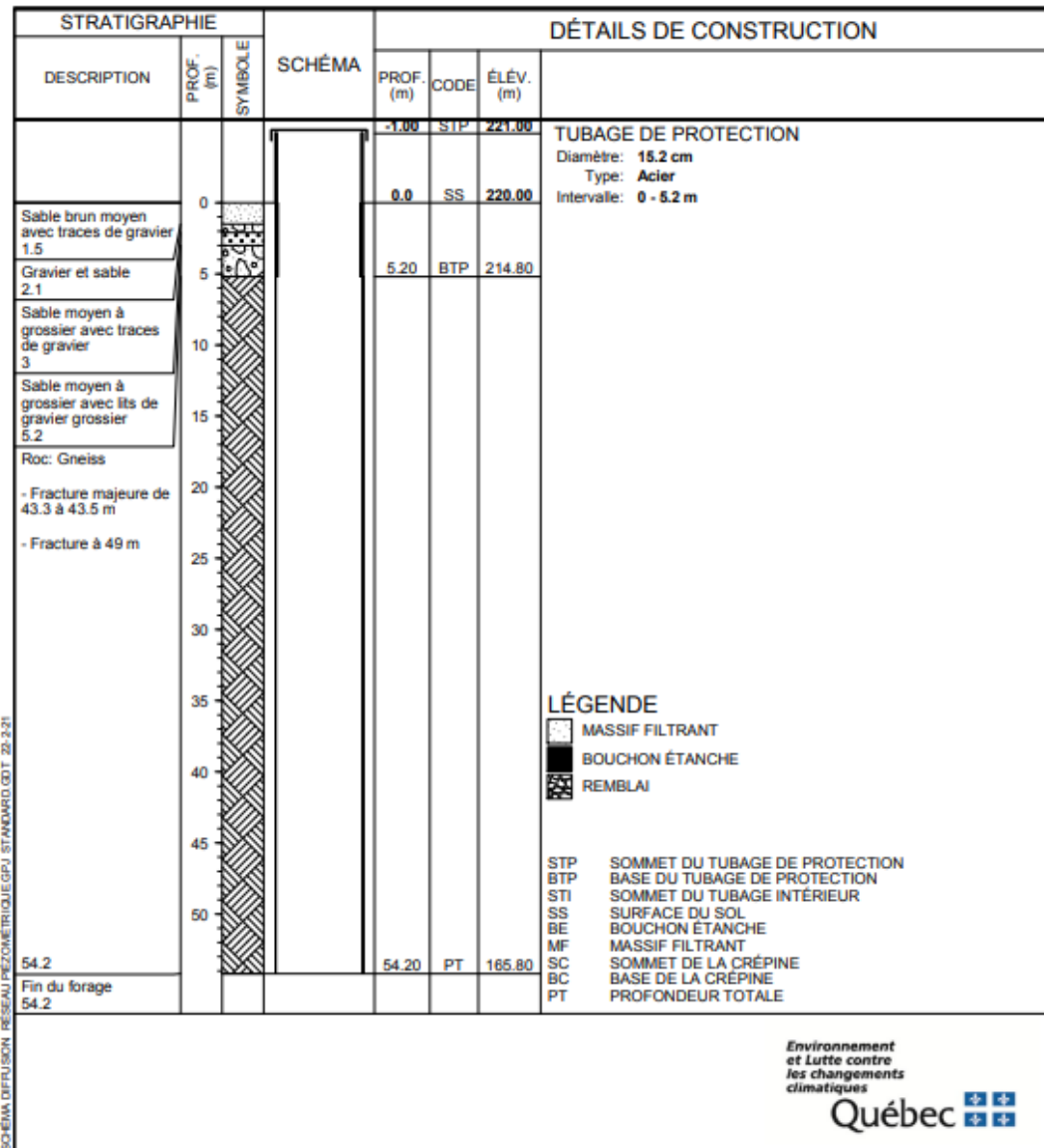


Figure 75. Schéma du puits d'observation 4020002

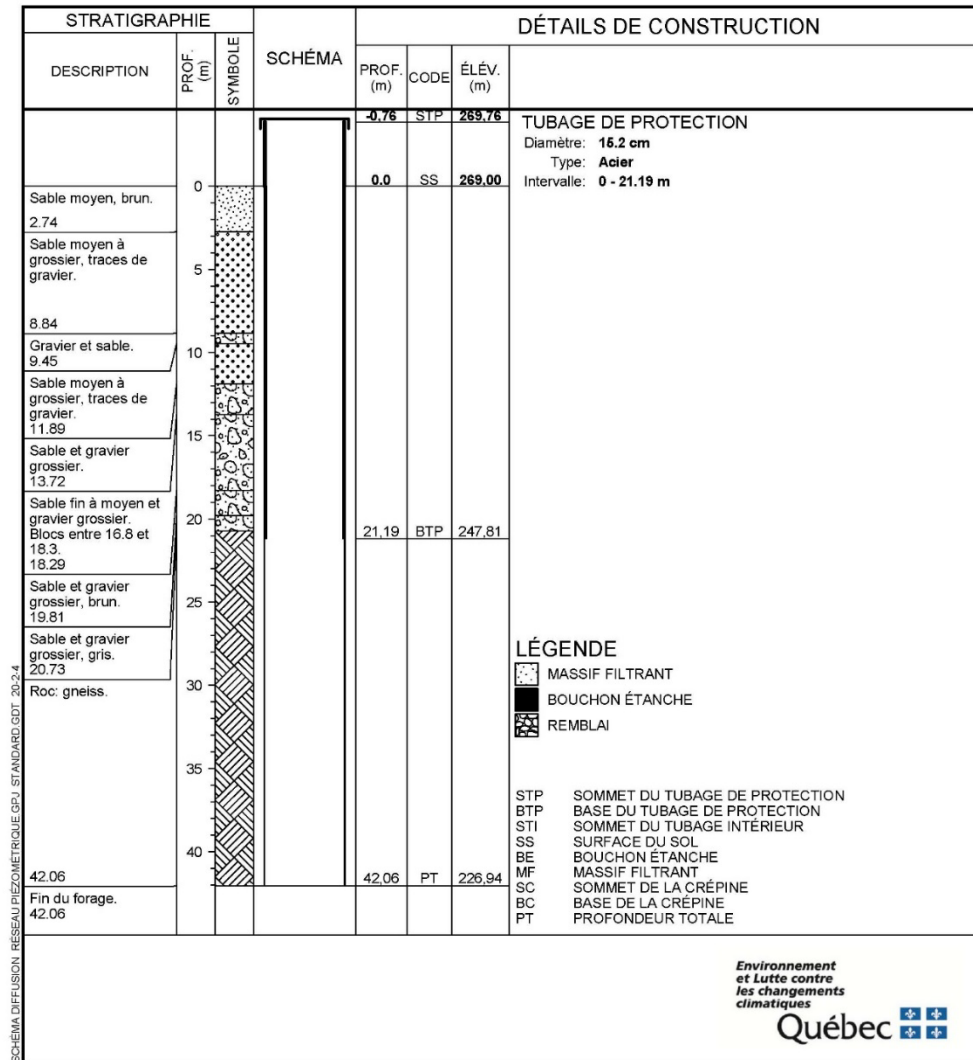
SCHÉMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04020006

MUNICIPALITÉ: **Arundel**
 LONGITUDE: **-74.62101**
 LATITUDE: **46.00202**
 NAD: **83**
 ALTITUDE DU SOL (m): **220**

**Figure 76 : Schéma du puits d'observation 4020006**

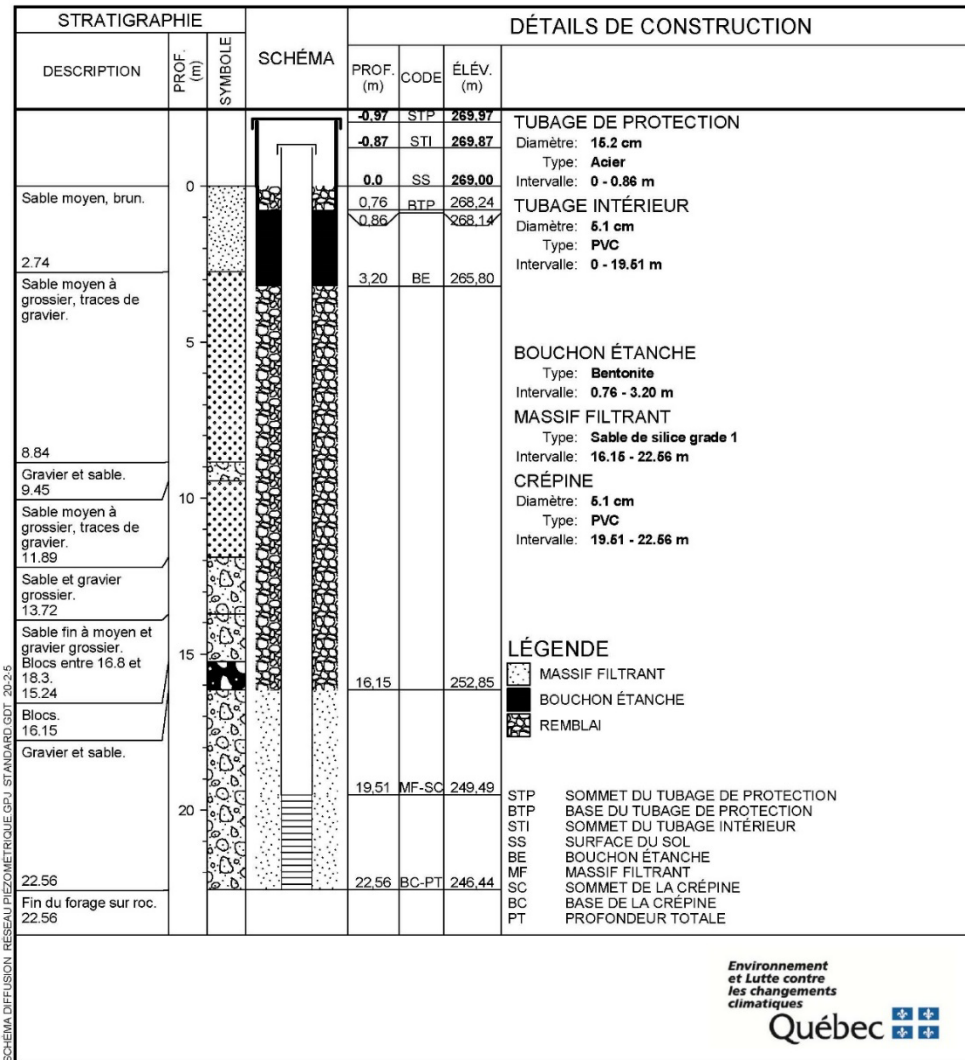
SCHEMA DU PUIT D'OBSERVATION No. 04020002

MUNICIPALITÉ: L'Ascension
 LONGITUDE: -74.78442
 LATITUDE: 46.61185
 NAD: 83
 ALTITUDE DU SOL (m): 269

**Figure 77. Schéma du puits d'observation 4020002**

SCHEMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04020003

MUNICIPALITÉ: L'Ascension
 LONGITUDE: -74.78433
 LATITUDE: 46.61184
 NAD: 83
 ALTITUDE DU SOL (m): 269

**Figure 78. Schéma du puits d'observation 4020003**

SCHEMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04020004

MUNICIPALITÉ: **La Conception**
 LONGITUDE: **-74.70409**
 LATITUDE: **46.19783**
 NAD: **83**
 ALTITUDE DU SOL (m): **212**

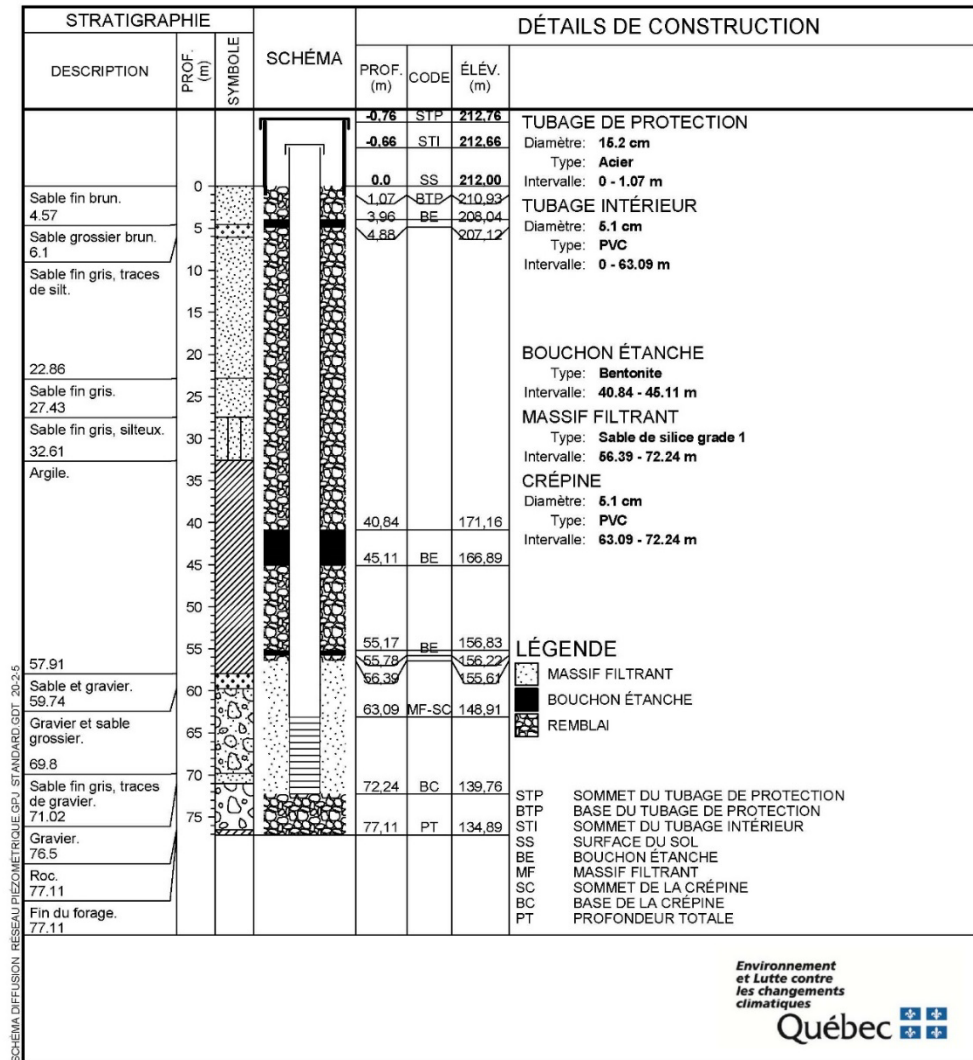
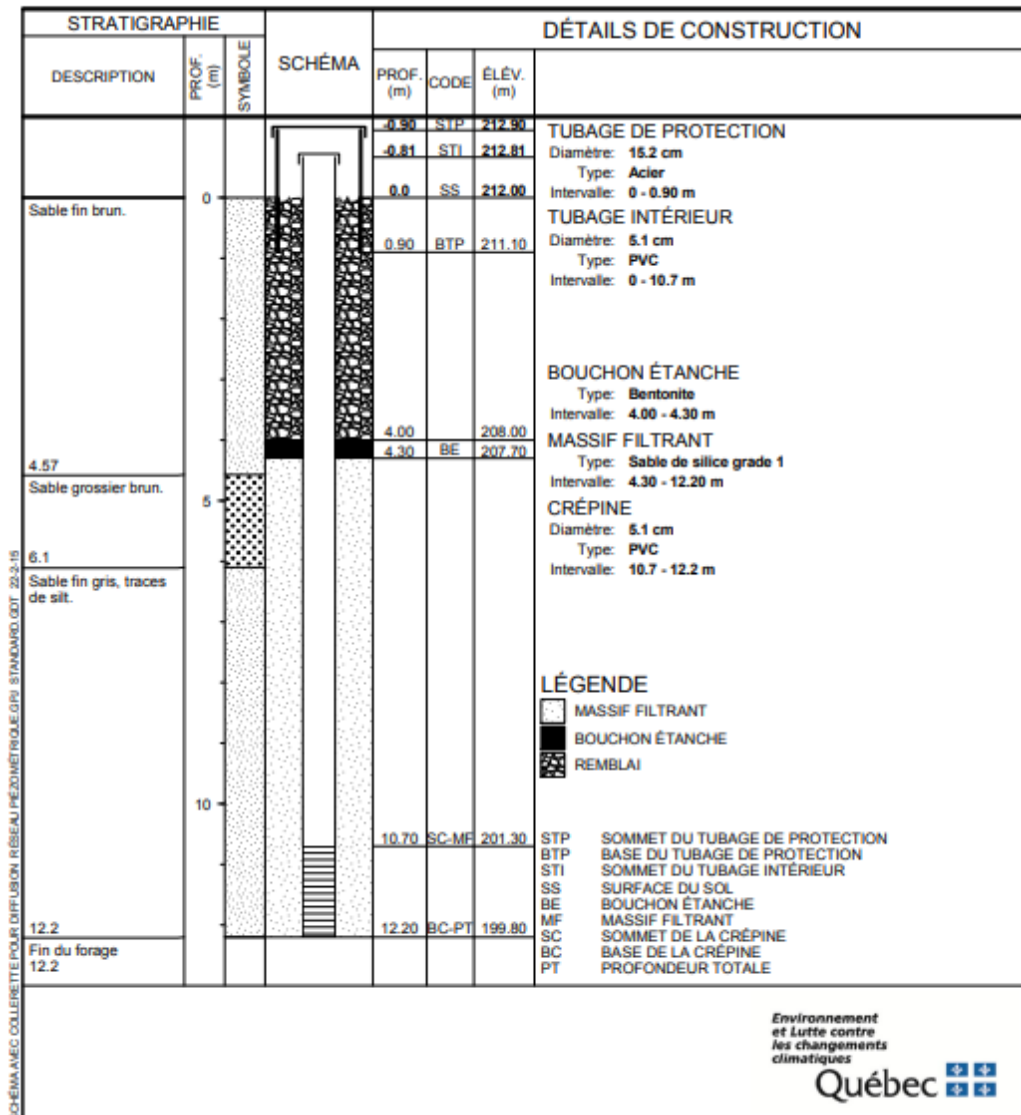
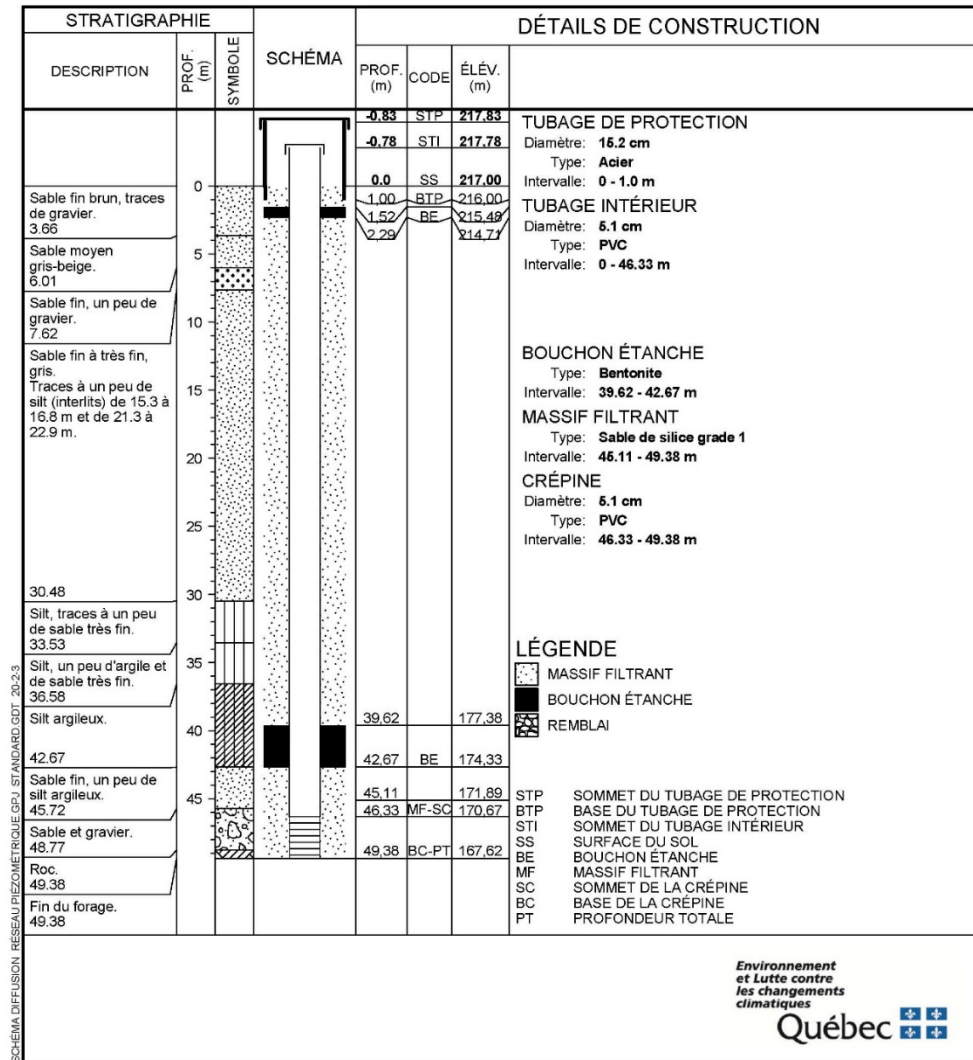
**Figure 79. Schéma du puits d'observation 4020004**

SCHÉMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04020005MUNICIPALITÉ: **La Conception**LONGITUDE: **-74.70409**LATITUDE: **46.19775**NAD: **83**ALTITUDE DU SOL (m): **212****Figure 80 : Schéma du puits d'observation 4020005**

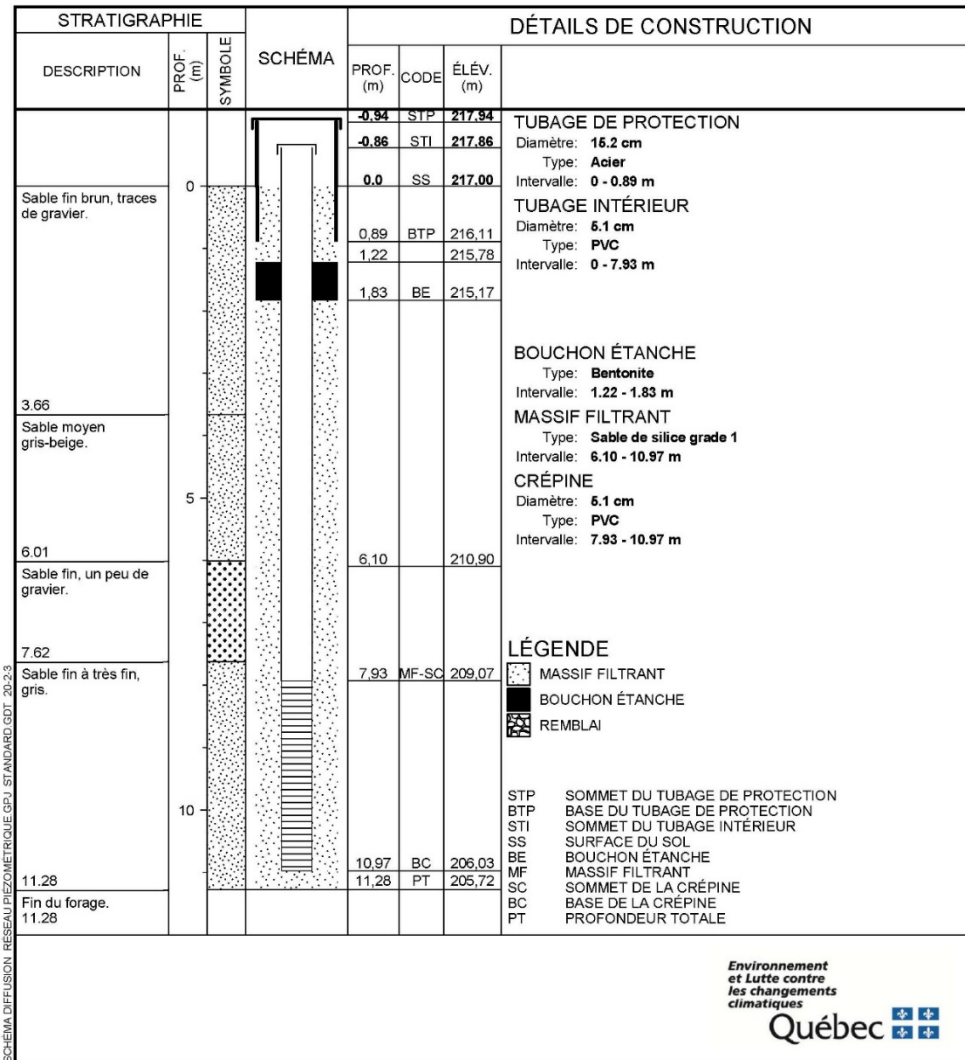
SCHEMA DU PUIS D'OBSERVATION No. 04060002

MUNICIPALITÉ: **Notre-Dame-du-Laus**
 LONGITUDE: **-75.57713**
 LATITUDE: **46.01643**
 NAD: **83**
 ALTITUDE DU SOL (m): **217**

**Figure 81. Schéma du puits d'observation 4060002**

SCHEMA DU PUIS D'OBSERVATION No. 04060003

MUNICIPALITÉ: **Notre-Dame-du-Laus**
 LONGITUDE: **-75.57703**
 LATITUDE: **46.0164**
 NAD: **83**
 ALTITUDE DU SOL (m): **217**

**Figure 82. Schéma du puits d'observation 04060003**

SCHEMA DU PUIT D'OBSERVATION No. 04060004

MUNICIPALITÉ: Ferme-Neuve
 LONGITUDE: -75.42411
 LATITUDE: 46.71348
 NAD: 83
 ALTITUDE DU SOL (m): 218

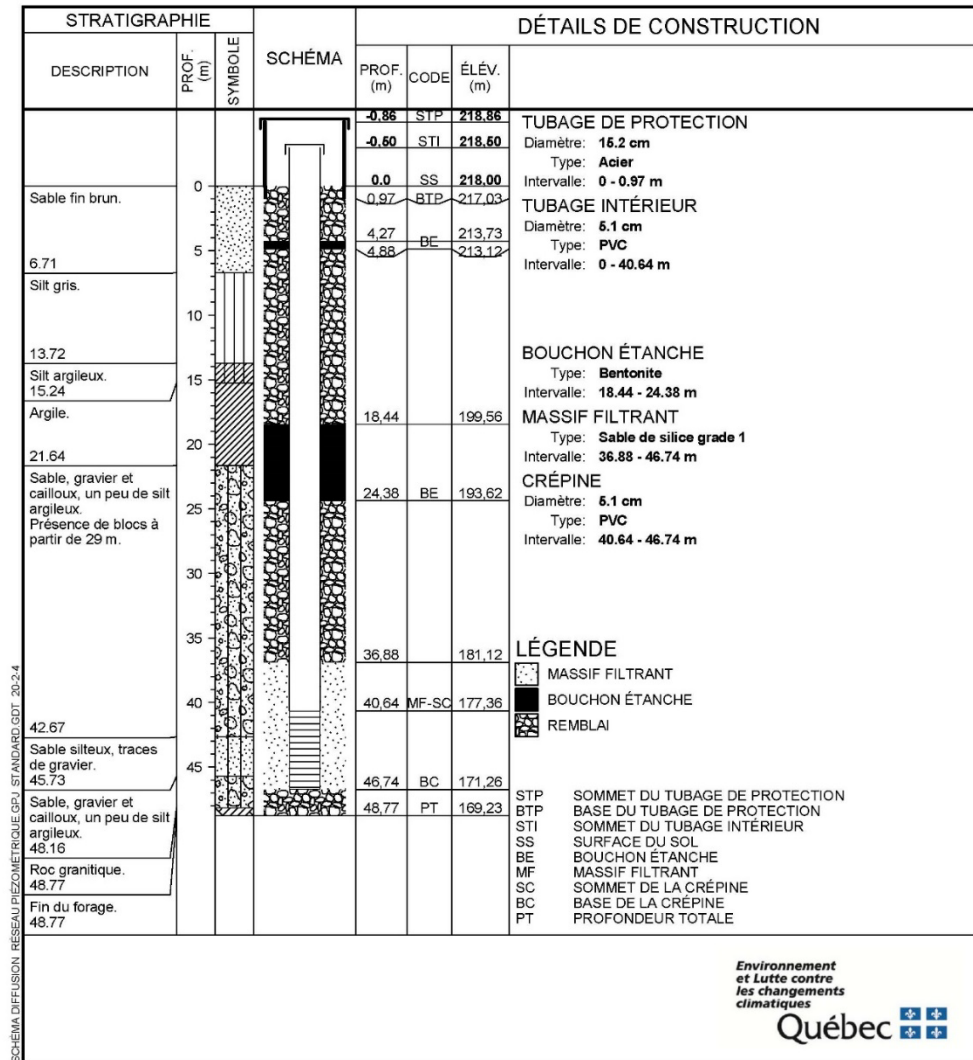
**Figure 83. Schéma du puits d'observation 04060004**

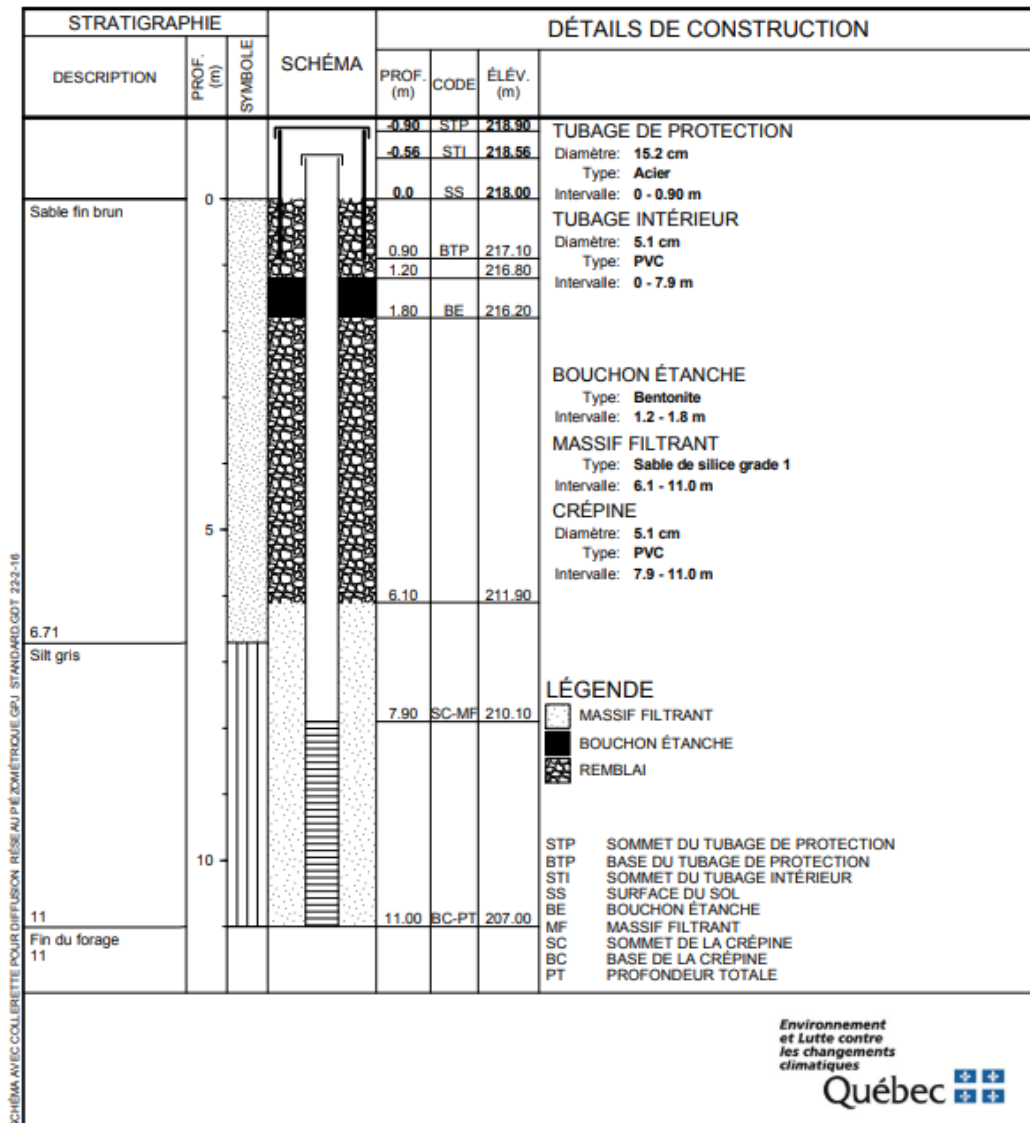
SCHÉMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04060005MUNICIPALITÉ: **Ferme-Neuve**LONGITUDE: **-75.42412**LATITUDE: **46.71344**NAD: **83**ALTITUDE DU SOL (m): **218****Figure 84 : Schéma du puits d'observation 04060005**

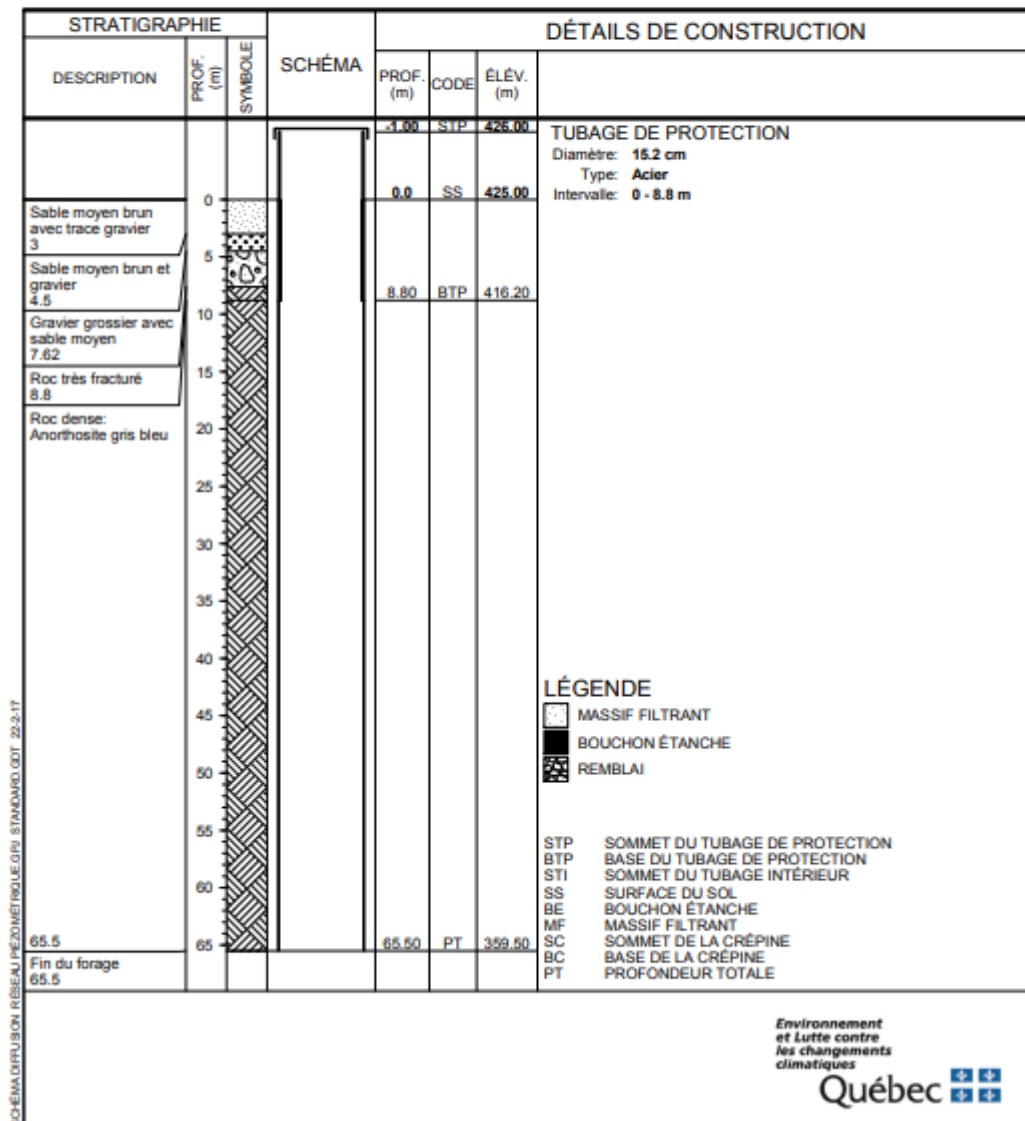
SCHÉMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04010005MUNICIPALITÉ: **Sainte-Agathe-des-Monts**LONGITUDE: **-74.29398**LATITUDE: **46.08634**NAD: **83**ALTITUDE DU SOL (m): **425****Figure 85 : Schéma du puits d'observation 04010005**

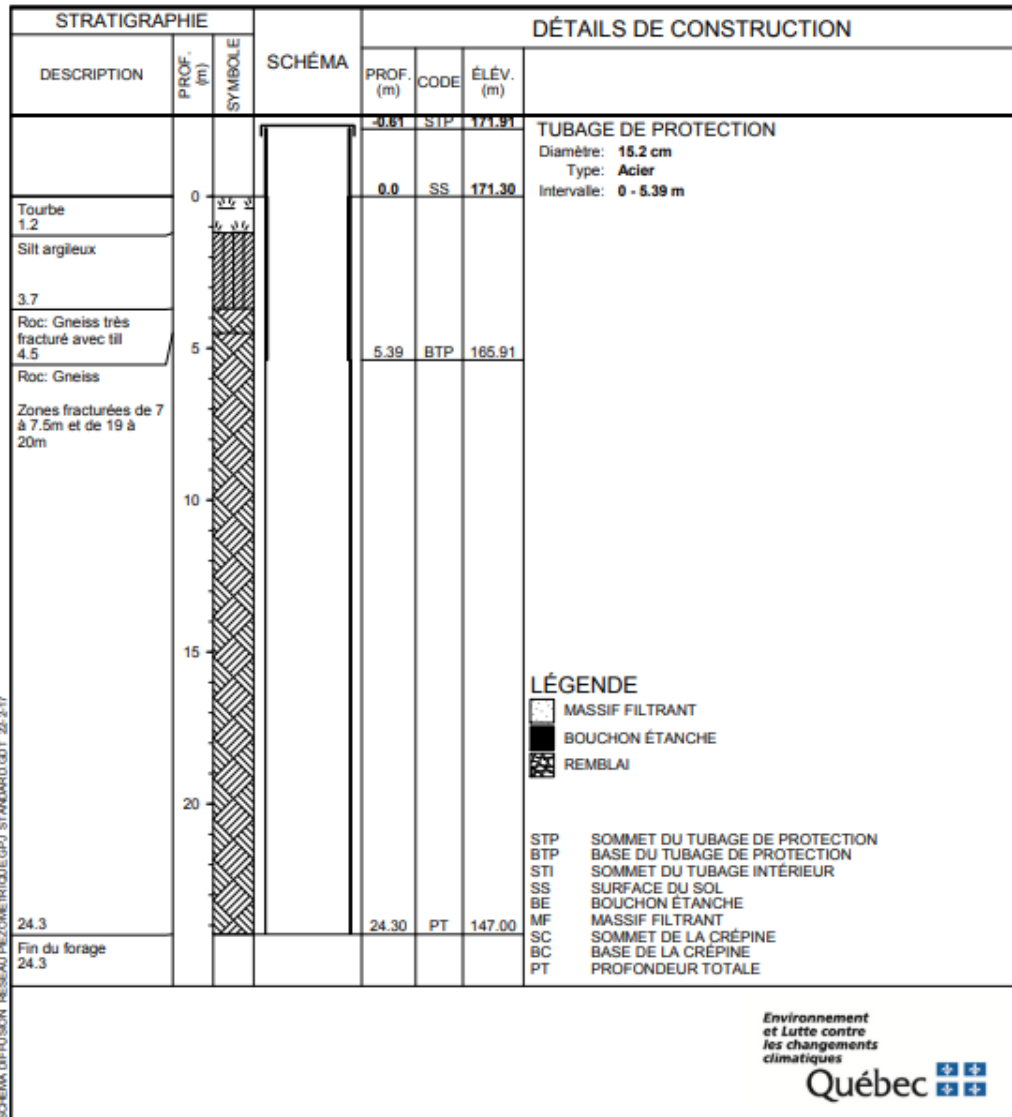
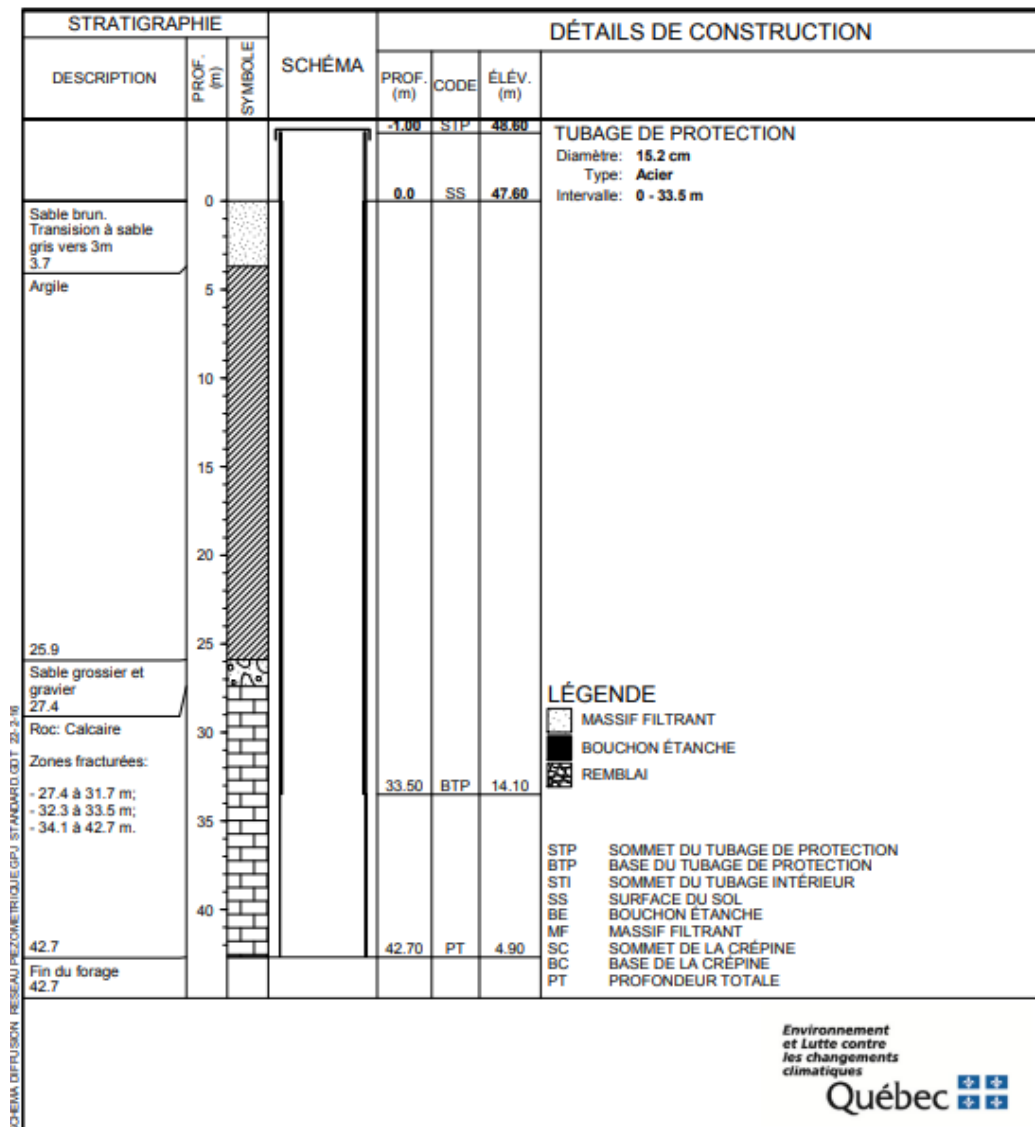
SCHÉMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04010004MUNICIPALITÉ: **Saint-Colomban**LONGITUDE: **-74.14211**LATITUDE: **45.74436**NAD: **83**ALTITUDE DU SOL (m): **171.3****Figure 86 : Schéma du puits d'observation 04010004**

SCHÉMA DU Puits D'OBSERVATION No. 04646001MUNICIPALITÉ: **Mascouche**LONGITUDE: **-73.59656**LATITUDE: **45.78992**NAD: **83**ALTITUDE DU SOL (m): **47.6****Figure 87 : Schéma du puits d'observation 04640001**

10 ANNEXE C – PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DE L'EAU SOUTERRAINE

10.7 Purge

- Brancher le tuyau au robinet à échantillonner (bien vérifier qu'il n'y ait pas d'aérateur)
- Fermer toutes les valves et ouvrir seulement la valve de purge
- Laisser à purger pendant 10 à 15 min. au maximum à grand débit et vérifier les paramètres (pH, T, conductivité, ORP et OD)
- Ouvrir lentement la valve pour le circuit « cellule » tout en laissant la purge ouverte.
- Lorsque le pH est stable, passer à la partie filtrage/échantillonnage.

10.2 Stabilité des paramètres

- pH : écart de $\pm 0,2$ entre deux prises de mesures espacées de 5 minutes
- Conductivité : écart de $\pm 50\mu\text{S}/\text{cm}$ entre deux prises de mesures espacées de 5 minutes.
- ORP : écart de $\pm 20\text{ mV}$ entre deux prises de mesure espacées de 5 minutes
- OD : écart de $\pm 3\%$ entre deux prises de mesure espacées de 5 minutes
- Température : écart de $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre deux prises de mesures espacées de 5 minutes
- Mettre des gants

10.3 Filtration

- Rincer trois fois la seringue avec l'eau du tuyau d'échantillonnage
- Viser un filtre au bout de la seringue de 60 ml
- Remplir délicatement le réservoir
- Faire écouler 30 ml à travers le filtre
- Re-remplir la seringue
- Prendre votre échantillon

10.4 Échantillons filtrés

Métaux dissous (MAXXAM)

- (ATTENTION AUX AGENTS DE CONSERVATION)
- Ne pas rincer et ne pas faire déborder l'eau
- Filtrer et remplir une bouteille Maxxam de 125 ml bouchon jaune
- Stocker dans la glacière à 4°C



Nox et isotopes nitrate

- Rincer 3 fois les 2 bouteilles (A et B) avec 10 ml d'eau filtrés
- Filtrer et remplir 30 ml des bouteilles
- Stocker dans la glacière à 4°C
- Congeler le soir au chalet et à l'UQAM stocker dans un congélateur -20°C



Alcalinité totale, anions et fluorures

- Rincer la bouteille 3 fois
- Remplir les 2 bouteilles carrées aux bouchons blancs
- Stocker dans la glacière à 4°C



Isotopes stables de l'eau

- Rincer le tube 3 fois
- Remplir le tube de 13 ml (NE PAS LAISSER DE BULLE D'AIR)
- Mettre un morceau de parafilm autour du bouchon



Pesticides et produits pharmaceutiques

- Rincer la bouteille 3 fois
- Remplir une bouteille Nalgène brune de 1L opaque
- Stocker en glacière à 4°C
- Congeler le soir et à l'UQAM stocker dans un congélateur.



10.5 Échantillons non filtrés avec conservateur

(**Attention** : Ne pas rincer et ne pas faire déborder)

Sulfure

- Remplir la bouteille Nalgène (bouchon rose) jusqu'à la ligne sur la bouteille
- Stocker en glacière à 4°C



Nutriments

- Remplir la bouteille Nalgène carrée (bouchon jaune) jusqu'à la ligne sur la bouteille
- Stocker en glacière à 4°C



Azote ammoniacal

- Remplir le tube en verre jusqu'au col
- Stocker en glacière à 4°C



10.6 Échantillons gazeux

Radon

- Rincer la bouteille trois fois
- Remplir la bouteille de 125 ml avec le moins de turbulence possible
- Remplir la bouteille sans bulle d'air



10.7 Échantillons non filtrés sans conservateur

Bactériologie

- Enlevez tout accessoire dont est muni le robinet
- Désinfecter le bec du robinet intérieur et extérieur à l'aide de la pissette d'éthanol 70%
- Remplir une bouteille 250 ml directement au robinet extérieur jusqu'à la limite
- Stocker en glacière à 4°C et à livrer dans les 48 h au laboratoire

11 ANNEXE D – CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES ET DES CONTEXTES HYDROSTRATIGRAPHIQUES

11.1 Épaisseur des dépôts meubles

L'épaisseur des dépôts meubles représente la couche de sédiments présents entre la surface topographique et la surface du socle rocheux. À l'échelle régionale, cette donnée est obtenue par interpolation des données de forage disponibles. Dans le présent projet, la cartographie de l'épaisseur des dépôts meubles a été réalisée selon les étapes suivantes :

1. Extraction des données de forage ayant une information stratigraphique concernant le contact entre les sédiments et le roc ;
2. Traitement statistique spatial afin d'identifier les points de mesures non valides ;
3. Sélection des points situés dans les vallées ;
4. Interpolation des données selon la méthode de l'inverse de la distance ;
5. Correction des résultats d'interpolation avec la carte des dépôts quaternaires.

Pour l'étape 1, une extraction des données compilées depuis le début du projet a été faite sur la base de données du projet afin d'obtenir tous les points avec des valeurs de profondeur du roc. Pour l'étape 2, l'outil « Cluster and Outlier Analysis » (Anselin Local Morans I) d'ArcGIS a été utilisé afin d'identifier, dans l'espace, les points non valides (points avec des valeurs de profondeur du roc trop hautes ou trop basses selon la moyenne locale). L'analyse a été réalisée avec un rayon maximal de 2 km pour le calcul des statistiques spatiales. Le résultat a ensuite été validé manuellement sur certaines zones afin de s'assurer que la méthode fonctionnait bien. Les points non valides ont ensuite été retirés de l'analyse. L'étape 3 consiste à sélectionner seulement les points qui sont dans les secteurs de vallée. La zone étudiée étant constituée d'une alternance de vallées et de sommets, la grande majorité des dépôts meubles est située dans les vallées, tandis que sur les sommets, on retrouve principalement des dépôts glaciaires de faible épaisseur (till) et du roc affleurant. L'approche présentée ici se base sur l'hypothèse que les dépôts sont principalement situés dans les vallées. L'interpolation de l'épaisseur des sédiments a donc été réalisée seulement pour ces zones. Pour l'étape 4, les valeurs d'épaisseur sélectionnées à l'étape 3 ont été interpolées selon la méthode de l'inverse de la distance. Un rayon de calcul maximal de 2 km a été utilisé. Finalement, pour l'étape 5, la carte des dépôts quaternaires (**Figure 26** Erreur ! Source du renvoi introuvable.) a été utilisée pour corriger le résultat de l'étape 4. Le **Tableau 37** montre les contraintes et les critères utilisés pour la correction. Ces derniers sont basés sur les

descriptions des unités géologiques des rapports du MRN liés aux cartes quaternaires (Randour et al., 2018 ; 2019).

Tableau 37 : Critères de correction pour l'épaisseur des dépôts meubles selon les types de dépôts meubles

Type de dépôts meubles	Condition ou contrainte	Valeur appliquée
Till mince (Tm) ou roc	Si > 1m	1 m
Till continu (Tc) ou till remanié (Tr)	Si > 5 m	5 m
Dépôts pro et juxtaglaciaires (Gx, Gts, Go et Gs)	Si < 10 m	10 m
Dépôts glaciolacustres (LGa et LGb)	Si < 10 m	10 m
Dépôts deltaïques marins	Si < 5 m	5 m
Dépôts glaciomarins (MGa et MGb)	Si < 5 m	5 m
Dépôts éoliens (Ed) ou alluvionnaires (A)	Si < 3 m	3 m

Les contextes hydrostratigraphiques de la zone d'étude ont été construits en trois étapes principales. Premièrement, l'épaisseur des sédiments perméables situés en surface (au-dessus du roc ou au-dessus de l'argile) a été estimée. Ensuite, l'épaisseur d'argile a été estimée et finalement, les contextes hydrostratigraphiques ont été déterminés en utilisant l'épaisseur de dépôts perméable en surface, l'épaisseur d'argile et l'épaisseur totale des dépôts meubles. Les sections suivantes décrivent en détail chacune de ces étapes.

11.2 Épaisseur des sédiments perméables superficiels et de l'argile

L'estimation de l'épaisseur des sédiments perméables superficiels et de l'argile a été réalisée selon les étapes suivantes.

1. Extraction des données de forage ayant une information stratigraphique concernant le l'épaisseur de dépôts perméables ou d'argile ;
2. Traitement statistique spatial afin d'identifier les points de mesures non valides ;
3. Sélection des points situés dans les vallées ;
4. Interpolation des données selon la méthode de l'inverse de la distance ;
5. Correction des résultats d'interpolation avec la carte des dépôts quaternaires.

Pour l'estimation de l'épaisseur des sédiments perméables et des sédiments argileux superficiels, les conditions suivantes ont été utilisées afin de sélectionner les données de forages adéquates (les parenthèses indiquent les critères pour l'estimation des épaisseurs d'argile).

- 1- Présence de sable ou de gravier (d'argile ou de silt) à moins de 3m de profondeur ;
- 2- Si plusieurs unités perméables (impermeables) sont présentes, la somme de l'épaisseur des unités est calculée à condition qu'aucune couche imperméable (perméables) de plus de 3 m d'épaisseur ne soit présente entre les unités ;
- 3- La somme des épaisseurs est arrêtée à la première couche imperméable (perméable) de plus de 3 m ou au roc.

Les données ainsi sélectionnées ont ensuite été interpolées à l'aide de la méthode de l'inverse de la distance (IDW). Un rayon de 2000 m et un facteur de 1,3 ont été utilisés dans l'algorithme d'interpolation. Le résultat de l'interpolation est ensuite corrigé avec la carte des dépôts quaternaires afin de s'assurer qu'il y a une correspondance entre cette dernière et la carte des contextes stratigraphiques. Le **Tableau 38** et le **Tableau 39** donnent les détails des conditions appliqués selon le type de dépôts quaternaires.

Tableau 38 : Critères de correction pour l'épaisseur des dépôts perméables superficiels selon les types de dépôts quaternaires

Type de dépôt quaternaire	Condition ou contrainte	Valeur appliquée
Till mince (Tm) ou roc	Si > 1m	1 m
Till continu (Tc) ou till remanié (Tr)	Si > 3 m	3 m
Dépôts pro et juxtaglaciaires (Gx, Gts, Go et Gs)	Si < 10 m	10 m
Dépôts fins (MGa et LGa)	Si > 0 m	0 m
Dépôts deltaïques marins (MGd)	Si < 5 m	5 m
dépôts littoraux (LGb et MGb)	Si < 5 m	5 m
Dépôts éoliens (Ed) ou alluvionnaires (A)	Si < 3 m	3 m
Dépôts organiques	Si > 0 m	0 m

Tableau 39 : Critères de correction pour l'épaisseur des dépôts imperméables selon les types de dépôts quaternaires

Type de dépôt quaternaire	Condition ou contrainte	Valeur appliquée
Till mince (Tm) ou roc	Si > 0 m	0 m
Till continu (Tc) ou till remanié (Tr)	Si < 3 m ou > 3 m	3 m
Dépôts pro et juxtaglaciaires (Gx, Gts, Go et Gs)	Si > 0 m	0 m
Dépôts fins (MGa et LGa)	Si < 5 m	5 m
Dépôts deltaïques marins (MGd)	Si < 5 m	5 m
Dépôts littoraux (LGb et MGb)	Si < 3 m	3 m
Dépôts éoliens (Ed) ou alluvionnaires (A)	Si > 0 m	0 m
Dépôts organiques	Si > 0 m	0 m

Cette première interpolation a ensuite été validée en utilisant les informations stratigraphiques fiables, telles que les données de consultants, les puits municipaux et les données de l'UQAM. Un processus d'essai-erreur a ensuite été réalisé jusqu'à ce que la validation soit satisfaisante.

11.3 Contextes hydrostratigraphiques

Les étapes présentées à la section précédente résultent en deux matrices, une de l'épaisseur des dépôts perméable en surface et l'autre de l'épaisseur d'argile. Ces deux matrices sont ensuite combinées à la matrice de l'épaisseur des dépôts meubles afin de déterminer les contextes hydrostratigraphiques (**Tableau 40**).

Tableau 40 : Critères pour la détermination des contextes hydrostratigraphiques

Critère	Contexte
Si < 3	Till, sable-gravier sur roc
Si sable > 3 m et argile > 3 m et (sable + argile) > 5	Sable-argile-sable-till
Si sable > 3 m et argile > 3 m	Sable -argile-till
Si argile > 3 m <u>et</u> > (sable + argile)	Argile-sable-till
Si argile > 3 m	Argile-till
Autres	Sable-till

12 ANNEXE E – METHODOLOGIE UTILISEE POUR LE CALCUL DE L'UTILISATION DE L'EAU

12.1 Données résidentielles, municipales et industrielles

Les données sur l'utilisation résidentielle ont été calculées en recoupant deux sources d'information, soit le nombre d'individus desservis par les réseaux municipaux de distribution d'eau potable (MELCC, 2021) et la population totale par municipalité (MAMH, 2020). Une consommation d'eau équivalente à 216 L/pers/j a été utilisée issue d'une moyenne provinciale établie à partir de la base de données du MAMH sur l'usage de l'eau potable en 2015 au Québec.

Pour les municipalités sans aqueduc, le volume utilisé a été calculé comme suit :

Volumes résidentiels ($\text{m}^3/\text{année}$) = [(population totale) x 216 L/pers/j x 365 j/an] / 1000 L/ m^3 (éq.2)

Pour les municipalités avec aqueduc, le volume utilisé a été calculé comme suit :

Volumes résidentiels estimés hors réseau ($\text{m}^3/\text{année}$)

$$= (\text{population totale} - \text{population desservie}) \times 216 \text{ L/pers/j} \times 365 \text{ j/an} / 1000 \text{ L/m}^3 \quad (\text{éq. 3})$$

Volumes résidentiels estimés dans le réseau ($\text{m}^3/\text{année}$)

$$= (\text{population desservie}) \times 216 \text{ L/pers/j} \times 365 \text{ j/an} / 1000 \text{ L/m}^3 \quad (\text{éq. 4})$$

12.2 Données agricoles

Les données agricoles combinent les informations sur les cultures et l'élevage. Les données utilisées proviennent d'une extraction de données effectuée sur la base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (MAPAQ, 2020). Les données du MAPAQ fournissent une évaluation du nombre de têtes (par municipalité) pour la production animale. En utilisant les chartes de consommation végétale et animale (**Tableau 41** et **Tableau 42**) des volumes d'eau utilisés pour la production agricole ont été calculés par MRC.

12.3 Données pour les usages industriels, commerciaux et institutionnels (ICI) et pertes en eau

Les données pour les utilisations industrielles proviennent de la base de données des grands préleveurs fournie par le MELCC pour l'année 2020. Ces informations regroupent tous les utilisateurs d'eau souterraine qui puisent plus de 75 m³/jour. Les utilisations industrielles utilisées par les systèmes d'approvisionnement municipaux sont estimées en soustrayant les volumes destinés à la population desservie. Les pertes potentielles en eau sont estimées à 27 % sur l'ensemble du réseau (MAPAQ, 2016).

Tableau 41 : Charte de la consommation d'eau pour les productions animales (MAPAQ, 2020)

Intitulé fiche Flora	m ³ /tête/an	Source
Agneaux	2,92	PACES Montérégie
Agnelles_de_remplacement	1,22	PACES Montérégie
Autres_cervidés_femelles	9,006	PACES Montérégie
Autres_espèces_animales		
Autres_volailles	0,0365	BPR 2003
Autruches	0,146	PACES Montérégie
Béliers	2,92	PACES Montérégie
Bisons	16,425	PACES Montérégie
Bovins_de_finition	5,631	PACES Montérégie
Bovins_de_semi_finition	4,073	PACES Montérégie
Brebis_de_boucherie	2,92	PACES Montérégie
Brebis_laitières	2,92	PACES Montérégie
Caillies	0,002	PACES Montérégie
Canards	0,007	PACES Montérégie
Cerfs_rouges	9,006	PACES Montérégie
Chevaux_de_course_femelles	16,425	PACES Montérégie
Chevaux_de_course_mâles	16,425	PACES Montérégie
Chevaux_de_selles_femelles	16,425	PACES Montérégie
Chevaux_de_selles_mâles	16,425	PACES Montérégie
Chevaux_de_trait_femelles	16,425	PACES Montérégie
Chevaux_de_trait_mâles	16,425	PACES Montérégie
Chevreaux_laitiers_a_engraissement	5,792	PACES Montérégie
Chèvres_de_boucherie	5,792	PACES Montérégie
Chèvres_laitières	5,792	PACES Montérégie
Cochettes	6,205	PACES Nicolet
Dindons_a_griller	0,029	PACES Montérégie
Dindons_de_reproduction	0,1825	PACES Montérégie
Dindons_lourds	0,056	PACES Montérégie
Émeus	0,183	PACES Montérégie
Faisans	0,146	PACES Montérégie
Génisses_de_boucherie	8,296	PACES Montérégie
Génisses_laitières	8,505	PACES Montérégie
Gros_poulets	0,014	PACES Montérégie
Hongres	16,425	PACES Montérégie
Lapines_de_reproduction	0,172	PACES Montérégie
Lapins_pour_chair	0,172	PACES Montérégie
Oies	0,146	Absent de toutes les chartes :
Petits_veaux_laitiers_abattage	1,175	Idem que Veaux de Lait
Pintades	0,146	PACES Montérégie
Porcelets_non_sevrés	0,912	BPR 2003
Porcelets_sevrés	0,912	PACES Montérégie
Porcs_à_engraissement	2,555	PACES Montérégie
Poulains_et_pouliches	16,425	PACES Montérégie
Poules_pour_oeufs_de_consommation	0,073	PACES Montérégie
Poules_pour_oeufs_incubation	0,073	PACES Montérégie
Poulets_a_griller	0,073	PACES Montérégie

Poulettes_pour_oeufs_de_consommation	0,073	PACES Montérégie
Poulettes_pour_oeufs_incubation	0,073	PACES Montérégie
Sangliers	2,555	PACES Montérégie
Taureaux_de_boucherie	14,993	PACES Montérégie
Taureaux_laitiers	14,993	PACES Montérégie
Taures_de_boucheries	14,483	PACES Montérégie
Taures_laitières	11,615	PACES Montérégie
Truies	6,205	PACES Montérégie
Vaches_de_boucherie	17,838	PACES Montérégie
Vaches_laitières	39,63	PACES Montérégie
Veaux_de_grain_finition	3,318	PACES Montérégie
Veaux_de_grain_pouponnière	1,175	PACES Montérégie
Veaux_de_lait	1,175	PACES Montérégie
Verrats	5,475	PACES Montérégie
Visons	0,172	PACES Montérégie
Wapitis	9,006	PACES Montérégie

Tableau 42 : Charte de consommation végétale issue du rapport RADEAU II

Catégorie	Part des superficies irriguées (%)	Nombre moyen d'apports	Dose moyenne par apport (mm)	Somme (mm)
Légumes caissette jardin				226
Légume caissette champ				510
Fleur annuelle caissette et jardinière				293
Plantes vivaces				444
Roses et fleurs coupées				855
Potées vertes				631
Plantes vertes				760
Comcombre, piment, tomate				844
Comcombre, piment, tomate longue				942
laitue				879
Bleuets de corymbes	0,5	20	3	30
Canneberges				0
Fraises d'automne	1	70	2	140
Fraises				0
Agriculture maraîchère de proximité biologique				0
Agriculture maraîchère de proximité conventionnelle				0
Asclépiade				0
Asperges				0
Avoine				0
Betteraves				0
Blé automne d'alimentation animale				0
Blé automne d'alimentation humaine				0
Blé automne humain				0
Blé de printemps animal				0
Blé de printemps humain				0
Blé de semence d'alimentation humaine				0
Brocolis pour la transformation				0
Carotte biologique de terre minérale				0
Carottes de terre minérale	0,5	3	25	37,5
Choux-fleurs frais	1	2	25	50
Choux d'été	0,5	2	25	25
Choux d'hiver				0
Choux fleurs de transformation				0
Citrouilles	0,25	40	2	20
Concombres	1	40	2	80
Courges d'hiver	0,25	40	2	20
Engrais vert				0
Foin				0
Foin de céréales				0
Foin option besoin alimentaire				0
Foin option superficie				0
Fraise implantation				0
Fraise production 1 année				0
Fraise production 2e année				0
Fraises à jours neutres				0
Fraisières en rangs nattés - production	0,66	2	20	26,4
Fraisières en plasticulture 1re année production				0

Framboise	0,2	20	2	8
Haricot sec	0,5	3	20	30
Lég. maraîchers				0
Mais-grain				0
Mais fourrager				0
Mais fourrager option superficie				0
Mais grain nain				0
Mais sucré de marché frais sur pail lis				0
Mais sucré frais	0,25	15	5	18,75
Mais sucré grain ou crème	0,25	15	5	18,75
Melons				0
Millet japonais				0
Navets				0
Oignons espagnols t.minérale	1	1	25	25
Orge				0
Orge brassicole				0
Panais				0
Piments type "Bell-boy"				0
Pois réguliers-gros				0
Pois sec				0
Pommes				0
Pommes de terre de table				0
Rhubarbe				0
Rutabagas				0
Sarrasin				0
Seigle				0
Sorgho				0
Soya				0
Soya de semence				0
Soya fourrager				0
Soya IP (identité préservée)				0
Tomates de marché frais	0,75	60	2	90
Tomates de marché frais sur pail lis	0,75	60	2	90
Tomates italiennes sur pail lis	0,75	60	2	90
Triticale de printemps d'alimentation animale				0

13 ANNEXE F – PESTICIDES ET PRODUITS PHARMACEUTIQUES (PPP)**Tableau 43 : Pesticides détectés dans l'eau souterraine**

Paramètres	Statistiques (ng/L)				Critère (ug/L)	Nb détections
	Min	Max	Moyenne	Écart-Type		
1-Naphthol	0	0	0	0	-	0
Acetamiprid	0	0	0	0	-	0
Aldicarb	0	0	0	0	-	0
Aldicarb-sulfone	0	0	0	0	-	0
Aldicarb-sulfoxide	0	0	0	0	-	0
Atrazine	0	0	0	0	-	0
Azinphos-Methyl	0	0	0	0	-	0
Bendiocarb	0	0	0	0	-	0
Bentazon	0	0	0	0	-	0
Boscalide	0	0	0	0	-	0
Carbaryl	0	0	0	0	14	0
Carbendazim	0	0	0	0	-	0
Carbofuran	0	0	0	0	70	0
Chlofenvinphos	0	0	0	0	-	0
Chlorotoluron	0	0	0	0	-	0
Chlorpyros	0	40,0	0,1	2,0	70	1
Chlotianidine	0	0	0	0	-	0
Coumaphos	0	0	0	0	-	0
Cyanazin	0	0	0	0	-	0
Diazinon	0	40,0	0,2	2,5	14	2
Dimethoate	0	0	0	0	-	0
Dinotefuran	0	100,0	0,3	5,1	-	1
Diuron	0	0	0	0	110	0
Fludioxonil	0	0	0	0	-	0
Hexazinon	0	0	0	0	-	0
Imaztapyr	0	0	0	0	-	0
Imidaclopride	0	0	0	0	-	0
Iprodione	0	0	0	0	-	0
Isoproturon	0	0	0	0	-	0
Kresoxim Methyl	0	0	0	0	-	0
Linuron	0	0	0	0	-	0
Métobromuron	0	0	0	0	-	0
Malathion	0	60,0	0,2	3,1	-	2
Metalochlor	0	0	0	0	35	0
Methoxuron	0	0	0	0	-	0

Paramètres	Statistiques (ng/L)				Critère (ug/L)	Nb Détection
	Min	Max	Moyenne	Écart-Type		
Methylbenzuron	0	0	0	0	-	0
Monolinuron	0	0	0	0	-	0
Nitenpyram	0	0	0	0	-	0
O-Methoate	0	0	0	0	-	0
Parathion	0	60,0	0,2	3,4	-	2
Pendilethaline	0	30,0	0,1	1,8	-	2
Permethrine	0	0	0	0	-	0
Phosmet	0	350,0	1,7	20,1	-	4
Piperonyl butoxide	0	0	0	0	-	0
Pyraclostrobine	0	0	0	0	-	0
Pyrimethanil	0	0	0	0	-	0
Sebutylazin	0	0	0	0	-	0
Simazine	0	0	0	0	9	0
Spinosad A	0	0	0	0	-	0
Terbutylazin	0	0	0	0	-	0
Thiabendazole	0	0	0	0	-	0
Thiachlopride	0	0	0	0	-	0
Thiametoxam	0	0	0	0	-	0
Trifloxistrobine	0	0	0	0	-	0

Tableau 44 : Produits pharmaceutiques détectés dans l'eau souterraine

Paramètres	Statistiques (ng/L)				Nb Détection
	Min	Max	Moyenne	Écart-Type	
Acétaminophène	0	1520,0	49,3	177,7	44
Acide Méfénamique	0	0	0	0	0
Aténolol	0	0	0,0	0	0
Benzafibrate	0	0	0,0	0	0
Caféine	0	430,0	92,9	83,0	266
Carbamazépine	0	15,9	0,1	0,9	4
Ciprofloxacine	0	0,8	0,002	0,041	1
Cyclophosphamide	0	0	0	0	0
Fénofibrate	0	0	0	0	0
Ibuprofène	0	0	0	0	0
Indometacine	0	0	0	0	0
Ketoprofène	0	0	0	0	0
Naproxène	0	0	0	0	0
Ofloxacine	0	0	0	0	0
Trimetoprim	0	0	0	0	0

14 **ANNEXE G – METHODOLOGIE DU CALCUL DE L'INDICE DRASTIC**

13.1 **Profondeur de la nappe (cote D)**

Les données du livrable de la piézométrie ont été utilisées comme données de base pour déterminer la cote « D » (profondeur de la nappe). Les valeurs ont ensuite été corrigées selon l'indice de confinement (livrable) et l'épaisseur potentielle de dépôts perméables. Dans la zone captive, ayant des épaisseurs de dépôts perméables sus-jacents de moins de 5 m, une cote de 3 (profondeur de la nappe entre 15,2 et 22,9 m) a été attribuée. Ceci permettait de prendre en compte la présence d'aquifère en nappe captive. Le **Tableau 45** donne les détails des cotes utilisées.

Tableau 45 : Cote et valeurs associées pour la cote « D » de l'indice DRASTIC

Profondeur du niveau d'eau(m)	Cote
0 à 1,5	10
1,5 à 4,6	9
4,6 à 9,1	7
9,1 à 15,2	5
15,2 à 22,9	3
22,9 à 30,5	2
30,5 et plus	1

13.2 **Recharge (cote R)**

Les données de recharge présentées ont été utilisées pour calculer la cote « R » (recharge). La recharge présentée dans ce livrable représente la recharge potentielle. Elle ne tient pas compte de la présence ou non d'un aquifère. Dans le cas des zones captives, une condition a été appliquée aux valeurs de recharge afin de tenir compte de ce facteur dans le calcul de la cote. Si l'épaisseur de dépôts perméables au-dessus de l'argile était inférieure à 5m, une cote de 1 (moins de 50 mm/an) était attribuée. Le Erreur ! Source du renvoi introuvable. donne les détails des valeurs de recharge annuelle et des cotes DRASTIC associées.

Tableau 46 : Cote et valeurs associées pour la cote « R » de l'indice DRASTIC

Recharge (mm/an)	Cote
0 à 50	1
50 à 102	3
102 à 178	6
178 à 254	8
254 et plus	9

13.3 Type d'aquifère (cote A)

Les données de la carte de la géologie du socle rocheux et des dépôts quaternaires ont été utilisées pour le calcul de la cote « A » (type d'aquifère). Les données de la géologie du roc ont été divisées en quatre classes et les dépôts meubles ont été divisés en sept classes (**Tableau 47** et **Tableau 48**). La cote « A » a premièrement été établie selon l'épaisseur des dépôts meuble. Si l'épaisseur des dépôts meubles était supérieure à 5 m, la cote « A » associée aux dépôts meubles était utilisée, sinon la cote « A » associée au socle rocheux était utilisée. Ensuite, afin de préciser la cote « A » dans les zones d'argile, une condition a été appliquée selon l'épaisseur de dépôts perméables au-dessus de l'argile. Si les sédiments perméables étaient supérieurs à 5m, la cote « A » des dépôts meubles était appliquée, sinon celle du socle rocheux était utilisée.

Tableau 47 : Cote et valeurs associées pour la cote « A » de l'indice DRASTIC (socle rocheux)

Description géologique	Cote
Roches intrusives alcalines intermédiaires à ultramafiques	9
Shale noir calcaireux et calcaire	6
Calcaire	6
Dolomie	6
Grès dolomitique	6
Grès quartzitique	6
Syénite	3
Granite	3
Syénite	3
Granitoïdes à orthopyroxène : charnockite	3
Migmatite	4
Orthogneiss granitoïde	4
Gneiss charnockitique et gneiss mixte	4
Gneiss tonalitique et trondhjémitique	4
Anorthosite	3
Gabbro	3
Marbre	6
Paragneiss	4
Basalte	9

Tableau 48 : Cote et valeurs associées pour la cote « A » de l'indice DRASTIC (dépôts meubles)

Description géologique	Cote
Mga, LGa, O	1
Cg	3
Ed, Ap, Gs, At, Ax, Lb, LGb, MGb, Tm, Gx, Ld, LGd, MGd	8

13.4 Type de sol (cote S)

Les données du livrable de la pédologie ont été utilisées pour calculer la cote « S » (type de sol). Les cotes ont été calculées à partir du type de drainage ou du type de sol (**Tableau 49**).

Tableau 49 : Classe de drainage, type de sol et cotes « S » associées de l'indice DRASTIC

Classe de drainage ou type de sol	Cote
Très rapidement drainé	10
Bien drainé	9
Modérément bien drain.	5
Imparfaitement drainé	4
Mal drainé	2
Très mal drainé	1
Terrains rocheux	10
Alluvions non différenciées à surface argileuse	1
Alluvions non différenciées à surface limoneuse	4
Alluvions non différenciées à surface limoneuse à loameuse	5
Alluvions non différenciées à surface sableuse	9
Alluvions non différenciées à surface sableuse à graveleuse	9
Île	5
Terrains rocheux non différenciés	10
Loam sableux	5
Éboulis berges et ravins à surface argileuse	4

13.5 Topographie (cote T)

Les données du livrable de la pente ont été utilisées pour calculer la cote « T » (topographie). Les valeurs de pentes du livrable ont cependant été converties en % avant d'être associées à une cote (**Tableau 50**).

Tableau 50 : Classes de pentes et valeurs associées pour la cote « T » de l'indice DRASTIC

Classes de pentes	Cote
Moins de 3 %	10
De 3 à 7 %	9
De 7 à 13 %	5
De 13 à 19 %	3
Plus de 19 %	1

13.6 Impact de la zone vadose (cote I)

Les données de la géologie du roc et des dépôts meubles ont été utilisées pour calculer la cote « I » (impact de la zone vadose). Le choix entre les deux sources a été déterminé selon l'épaisseur des dépôts meubles. Si ceux-ci ont plus de 3 m d'épaisseur, les cotes « I » calculées à partir du type de dépôts meubles ont été utilisées sinon celles du socle rocheux ont été utilisées (**Tableau 51**).

Tableau 51 : Type de géologie et valeurs associées pour la cote « I » de l'indice DRASTIC

Type de géologie	Cote
Roches intrusives d'Oka	3
Roches sédimentaires	6
Roches métamorphiques (marbre)	6
Roches métamorphiques/ignées	3
Dépôts fins marins/lacustres	1
Dépôts de versant	3
Dépôts éoliens et alluvions récents	8
Dépôts de terrasse	7
Dépôts littoraux	6
Till	5
Dépôts fluvio-glaciaires et deltaïques	9

13.7 Conductivité hydraulique (cote C)

Les données de la géologie du socle et des dépôts meubles ont été utilisées pour calculer la cote « C » (conductivité hydraulique). Les cotes ont été calculées selon que les dépôts meubles sont plus ou moins épais que 5 m. Si l'épaisseur des dépôts meubles est < 5 m, la cote C du roc a été utilisée. Si l'épaisseur des dépôts meubles est > 5 m, que les dépôts perméables en surface sont > 5 m, la cote C des dépôts meubles a été utilisée. Finalement, dans le cas où les dépôts meubles sont > 5 m et que l'aquifère est en condition de nappe captive, la cote C du roc a été utilisée (**Tableau 52**).

Tableau 52 : Type de géologie et valeurs associées pour la cote «C» de l'indice DRASTIC

Type de géologie	Cote
Roches intrusives d'Oka	1
Roches sédimentaires	6
Roches métamorphiques (marbre)	4
Roches métamorphiques/ignées	1
Dépôts fins marins/lacustres	1
Dépôts deltaïques	6
Dépôts fluvio-glaciaires et morainiques	10
Autres dépôts meubles	4

15 ANNEXE H - CALCUL DE L'INDICE DU RISQUE ANTHROPIQUE

Auteurs

UQAT

Francesca Audet-Gagnon

Magalie Roy

INRS

Jean-Marc Ballard

Marc-André Carrier

15.1 Introduction

Le présent protocole propose une méthodologie pour le calcul de la densité du risque anthropique. Ce livrable vise à évaluer l'impact potentiel des activités anthropiques, en termes de risques appréhendés sur la qualité des ressources en eau souterraine. Le livrable doit inclure la liste des activités anthropiques jugées pertinentes ainsi qu'une carte représentant la densité de ces activités pondérée par un facteur de risque sur l'eau souterraine. Il vise principalement à faire ressortir les tendances régionales en termes de pression des activités anthropiques sur les ressources en eau souterraine.

Ce document a été élaboré après consultation avec le MDDEFP et les membres du Groupe de recherche interuniversitaire sur les eaux souterraines (GRIES) maintenant devenu le RQES. Une représentation de la densité d'activités pondérée a été préférée à une représentation des activités individuelles, notamment afin de respecter les contraintes de confidentialité sur les données ponctuelles.

15.2 Sources de données

Les données numériques de base proposées pour la réalisation de ce livrable proviennent de la base de données du MAMROT 2010, plus précisément du système de classification des codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF). Les données du MAMH ont été choisies pour élaborer le livrable parce qu'elles sont disponibles pour tous les projets via le MELCC. Le système de classification des activités associées aux CUBF se prête facilement au traitement et au tri des données permettant ainsi de leur attribuer un niveau de risque. Il est important de rappeler que les informations tirées des CUBF, qui sont transmises et utilisées dans le cadre des projets

PACES, sont des données nominales confidentielles qui ne peuvent être divulguées publiquement. Dans le but de faciliter l'utilisation des données, les activités ont aussi été définies selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN).

Pour les projets ayant accès à des informations plus complètes et/ou plus à jour que celles du MAMH (p.ex.: les rôles d'évaluation municipaux), il est recommandé de les utiliser pour compléter, vérifier ou remplacer les données du MAMH. Parmi les autres sources d'information pouvant fournir des données d'intérêt pour ce livrable, on trouve notamment : les répertoires de sites de gestion des matières résiduelles issues des directions régionales du MELCC, la base de données sur les sites d'exploitation minière et de substances minérales de surface issue du Ministère des Ressources naturelles (MRN), les répertoires des sites contaminés et des dépôts de sols et de résidus industriels issus du MELCC ainsi que les données provenant des municipalités locales, des municipalités régionales de comté (MRC), des organismes de bassin versant (OBV), des compilations gouvernementales (e.g. système d'information écoforestière) et d'autres sources locales.

15.3 Sélection et validation des données

Une fois les données compilées et intégrées, il est suggéré d'effectuer une vérification des données afin d'éliminer les doublons potentiels pouvant être issus de l'intégration de multiples sources de données. Cette vérification sommaire des doublons peut être faite à partir des coordonnées géographiques des centroïdes des activités avec les outils disponibles dans ArcGIS. Cette vérification n'est toutefois pas exhaustive et une vérification finale devrait être faite au niveau local, notamment par les aménagistes et les utilisateurs du livrable. Pour les activités présentant des impacts potentiels plus importants, il est aussi possible d'en vérifier l'état auprès des municipalités, des MRC ou des OBV. En complément, la localisation de certaines activités peut également être vérifiée à partir de photos aériennes.

La liste résultante constituerait la liste complète des centroïdes des activités sélectionnées. Les activités incluses dans cette liste devraient correspondre au ou à un sous-ensemble de ce dernier selon des activités présentes sur le territoire considéré. Les activités agricoles et les activités en lien avec les résidences ou les bâtiments habités possédant potentiellement des installations septiques sont exclues du calcul (voir **Tableau 53** pour activités exclues). Les activités agricoles ont été exclues en raison, car leur impact potentiel diffus sur l'eau souterraine est difficile à évaluer faute de détails sur les types de productions agricoles et les façons de faire précises de chaque producteur. Bien que les informations disponibles via le MAMH ne donnent pas ces détails et ne

permettent pas leur utilisation pour le livrable cartographique, elles pourraient éventuellement servir à la préparation d'une carte indépendante de la densité des activités agricole pour un territoire donné. Les résidences potentiellement desservies par des installations septiques ont été exclues, car la contamination potentielle de l'eau souterraine provenant des installations septiques est considérée locale et de faible intensité. Toutefois, puisque les risques réels de contamination augmentent avec la densité des installations, il peut être pertinent d'évaluer et de mettre en lien la densité des installations septiques présentes avec la qualité de l'eau souterraine.

Tableau 53 : Activités exclues pour la préparation du livrable cartographique

CUBF	Classe	Activité
1000 à 1990	Regroupement	'Inst_septique'
8120 à 8429	Regroupement	'Agriculture, exploitation forestière, et services connexes'
4510	Activité	'Autoroute'

15.4 Traitement des données

La méthode d'évaluation de l'impact ou du risque potentiel des activités anthropiques sur la qualité de l'eau souterraine a été adaptée de méthodologies développées et utilisées dans le cadre de projets similaires aux États-Unis et ailleurs dans le monde (Foster et Hirata, 1988 ; SESAT, 2010; Office of Water, 1991). Pour chacune des activités, quatre paramètres sont évalués de manière qualitative, soient la toxicité du ou des produits présents, la quantité de produits manipulés, la superficie exploitée par l'activité et la récurrence des rejets possibles vers l'environnement, c'est-à-dire accidentels (p.ex. : déversement accidentel) ou fréquents (p.ex. : rejet industriel contrôlé ou application d'engrais ou de pesticides). Ces paramètres ont été sélectionnés en se référant à divers rapports concernant la détermination de l'impact potentiel des activités sur l'eau souterraine. La pondération de chaque paramètre est calculée en combinant les quatre paramètres comme suit :

$$\text{Impact potentiel} = (\text{Toxicité des contaminants} + \text{Quantité de contaminants} + \text{Zone d'impact de l'activité}) * \text{Récurrence de rejets de contaminants} \quad (\text{éq. 5})$$

Le présente pour chaque activité la classification de l'impact potentiel regroupée en quatre classes : faible, modéré, élevé et très élevé. Il est important de mentionner que l'évaluation globale de

l'impact ou du risque lié à chaque activité demeure qualitative. Cette évaluation vise à attribuer à chaque activité un poids relatif afin de permettre la préparation d'un portrait régional de la pression des activités anthropiques, en termes de risque appréhendé, sur la qualité des ressources en eau souterraine. Cet outil est destiné à une analyse régionale et ne peut remplacer la nécessité d'évaluer ponctuellement l'impact de chaque activité dans le cas de problématiques plus locales. De plus, il est important de mentionner que le niveau de risque calculé dans le cadre de ce livrable ne prend pas en compte la vulnérabilité du milieu. Une étape complémentaire pourrait prendre en compte la vulnérabilité du milieu, par exemple en additionnant le risque final quantifié avec l'indice DRASTIC pour estimer un risque de contamination de l'aquifère considéré par la méthode DRASTIC.

Le **Tableau 54** présente la pondération de la toxicité des contaminants associés à l'activité. Les contaminants associés à chaque activité ont été identifiés à partir d'une étude du Gouvernement d'Oregon (Oregon Government, 1996). La pondération est fonction de la classification de toxicité des produits purs du Système d'Information sur les Matières dangereuses utilisées au Travail (SIMDUT) (Commission de la santé et de la sécurité du travail, 2007). Pour les contaminants comprenant des produits commerciaux ou de mélanges, les fiches signalétiques des produits ont été employées pour déterminer les principaux produits purs afin de déterminer la toxicité du contaminant.

Tableau 54 : Pondération de la toxicité des contaminants associés à l'activité

Poids	Toxicité du 1 ^{er} produit*			Toxicité du 2 ^e produit			Toxicité du 3 ^e produit		
	Non toxique	Toxique	Très toxique	Non toxique	Toxique	Très toxique	Non toxique	Toxique	Très toxique
1	X			X				X	
2	X				X		X		
3		X		X				X	
4		X			X		X		
5		X		X	X			X	
6			X	X			X		
7			X		X			X	
8			X			X			X

*Les produits sont classés en rang (1^{er}, 2^e, 3^e) en fonction de la quantité de contaminants.

Le **Tableau 55** désigne la pondération de la quantité de contaminants associés à l'activité. Cette quantification, basée sur la quantité et la concentration des contaminants, est une modification de la quantification proposée de l'état de la situation de la SESAT (SESAT, 2010). Les classes des paramètres considérés sont qualitatives.

Tableau 55 : Pondération de la quantité de contaminants associés à l'activité

Poids	Quantité du produit			Concentration		
	Petite	Grande	Très élevée	Faible	Moyenne	Élevée
1	X			X		
2	X				X	
3	X					X
4		X		X		
5		X			X	
6		X				X
7			X	X	X	
8			X			X

Le **Tableau 56** présente la zone d'impact qui fait référence à l'étendue potentielle de l'activité. Les seuils de quantification sont quantitatifs, référant à trois échelles spatiales : ponctuel, local et régional.

Tableau 56 : Pondération de la zone d'impact de l'activité

Poids	Zone d'impact de l'activité
2	Ponctuel (10 m ²)
4	Local (100 m ²)
8	Régional (1 km ²)

Si les rejets sont systématiques, liés à la nature même des activités, ils sont considérés comme récurrents, sinon, ils sont définis comme accidentels (**Tableau 57**).

Tableau 57 : Pondération des rejets de contaminants vers l'eau souterraine

Poids	Fréquence des rejets
1	Accidentel
2	Récurrent

Le **Tableau 58** combine la classification des tableaux précédents et représente le risque que représente chaque activité. Les limites de chaque classe ont été définies de façon relative et logique afin de différencier des niveaux de risque différents pour des types d'activités de différentes familles. Les résultats obtenus pour chaque activité ont été comparés entre eux ainsi qu'avec la classification définie par l'UNESCO (2002) afin qu'il y ait le maximum de cohérence entre les résultats.

Tableau 58 : Classification et représentation du risque par activité

Risque de l'activité	Classe de risque de l'activité	Couleur associée à la classe de risque
4 – 14	Faible	Vert
15 – 17	Modéré	Jaune
18 – 29	Élevé	Orange
30 et plus	Très élevé	Rouge

LAURENTIDES / LES MOULINS
QUÉBEC
1/900 000
0 8 16 24 32 Km
Projection : Québec Lambert

UQAM
Université du Québec à Montréal
Environnement
et lutte contre
les changements
climatiques
Québec

Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux
souterraines de la région des Laurentides et de la
MRC Les Moulins

Abrinord
Association pour le développement
économique et culturel
de la région de la Rivière
du Loup

COBALI
Comité des bassins versants
des MRC de la
région de la Rivière
du Loup

COBAMIL
Comité des bassins versants
des MRC de la
région de la Rivière
du Loup

MRC des Laurentides
MRC de la Rivière
du Loup

MRC d'Antoine-Labelle
MRC de la Rivière
du Loup

MRC Les Moulins
MRC de la Rivière
du Loup

**MRC de la Rivière
du Loup**

Zone d'étude
• Municipalités
Hydrographie surfacique
Hydrographie linéaire

Type de dépassement et géologie
Aluminium, aquifère granulaire
Aluminium, aquifère roc

Université du Québec à Montréal

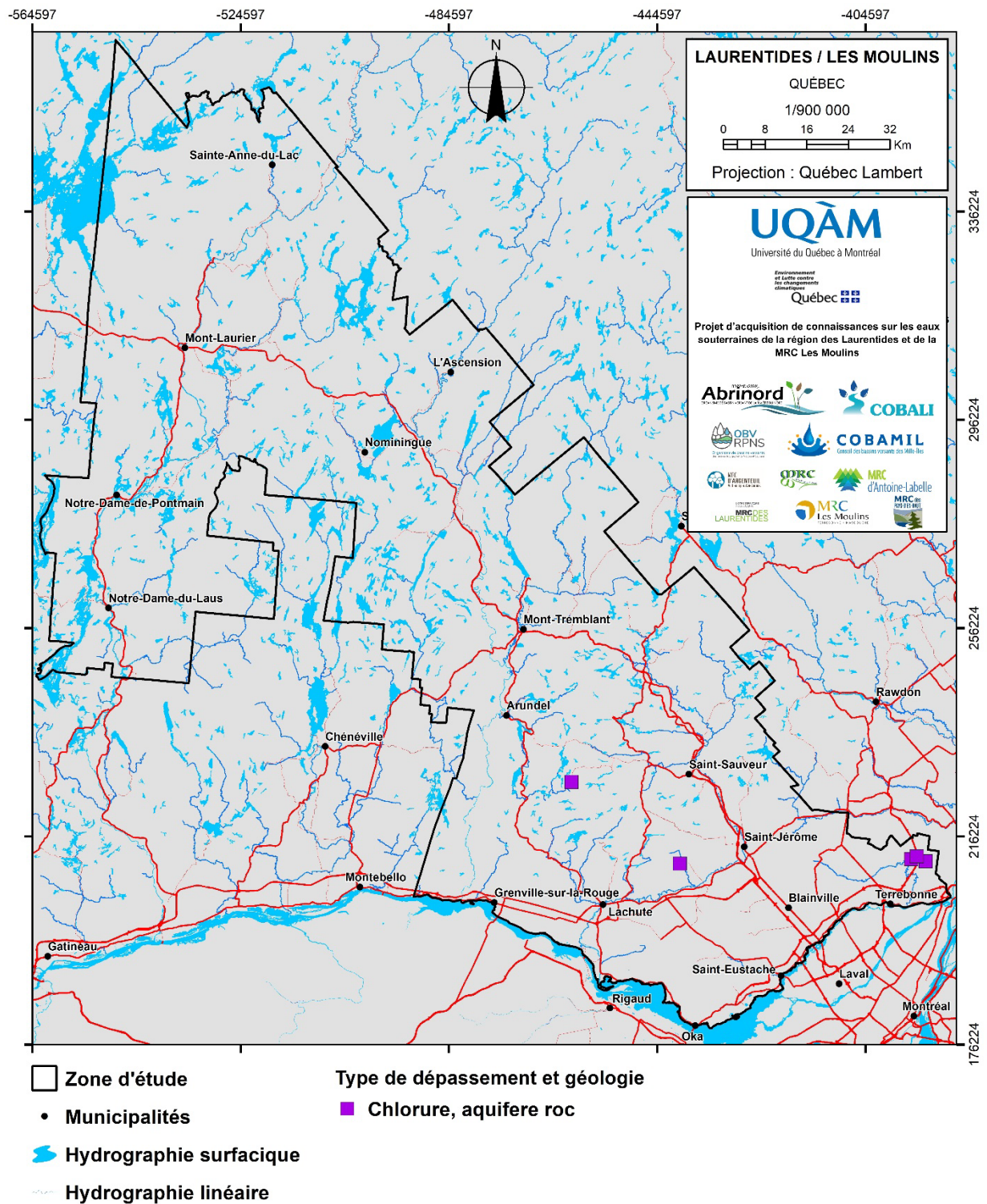


Figure 89 Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour des chlorures

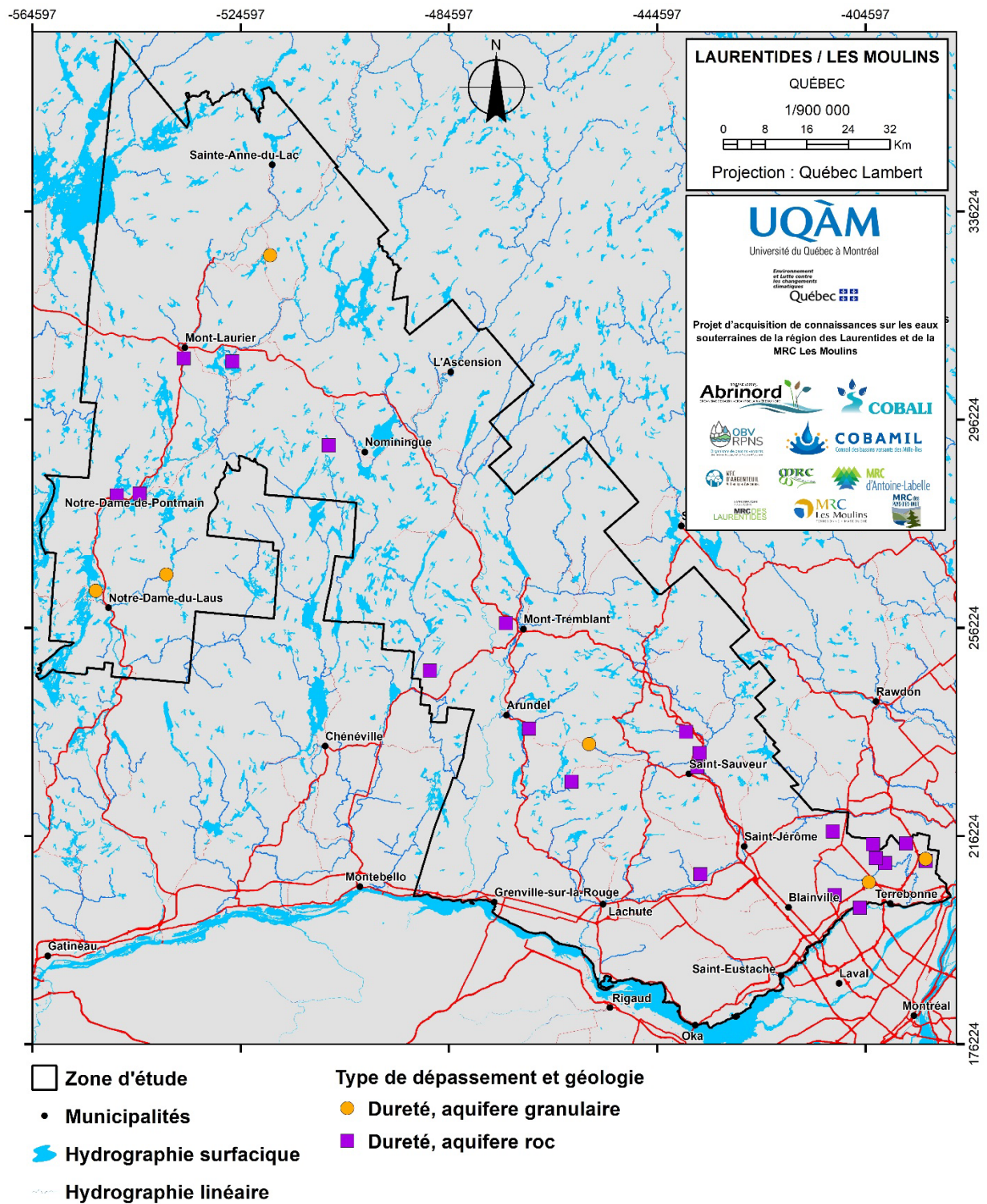


Figure 90 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour la dureté

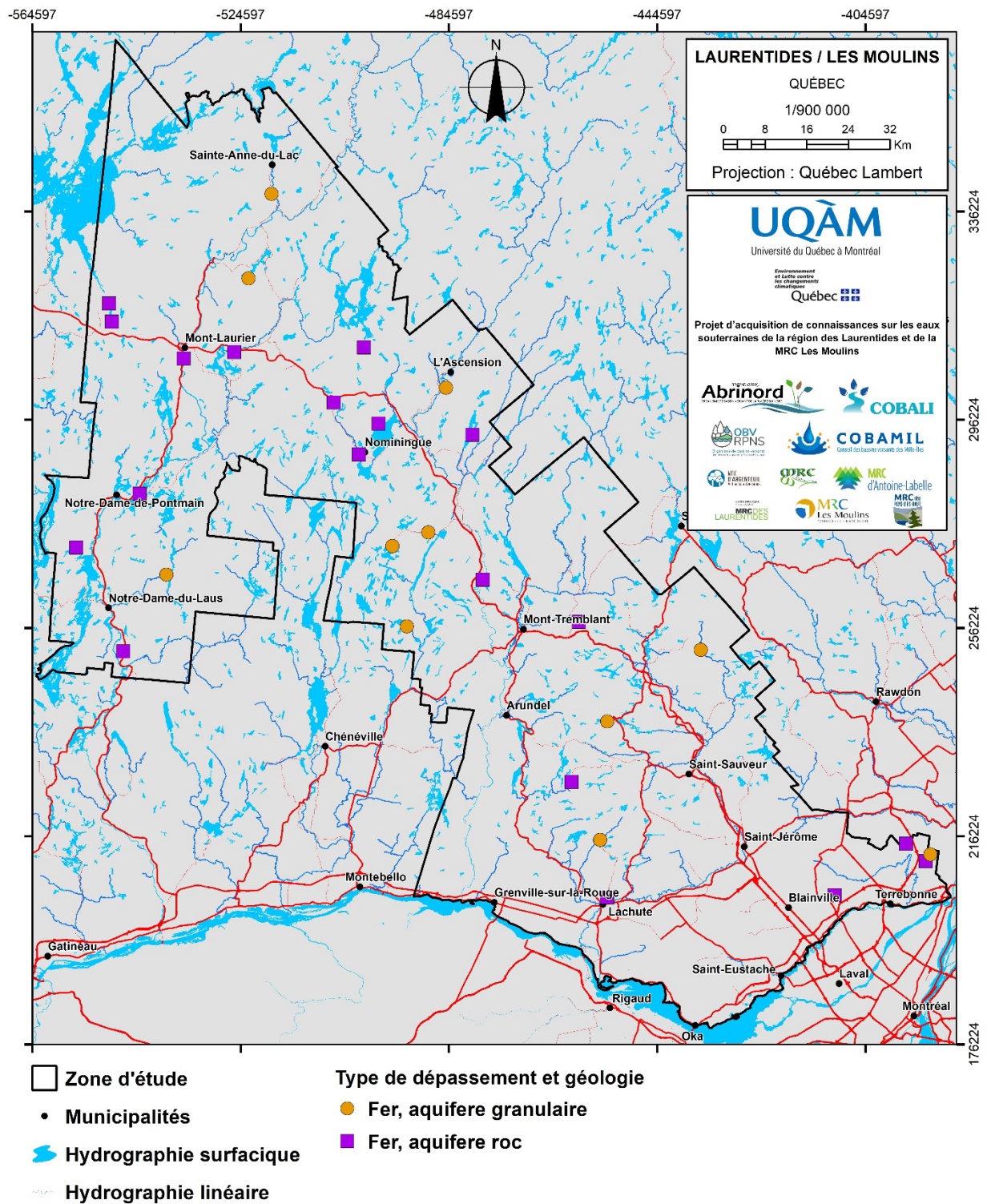


Figure 91 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le fer

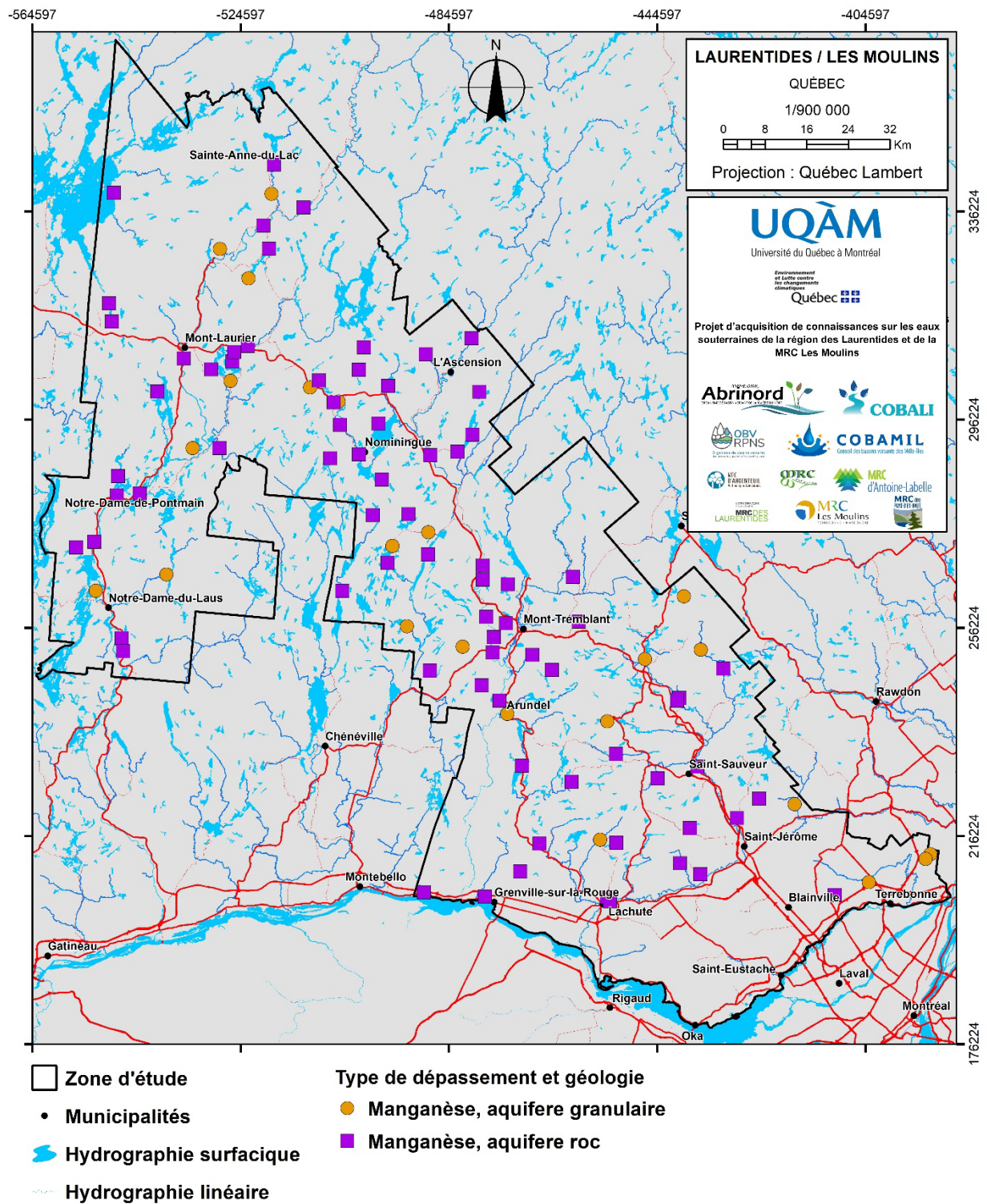
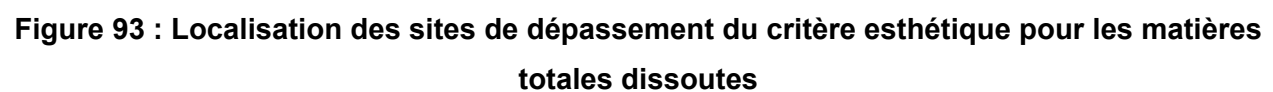


Figure 92 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le manganèse



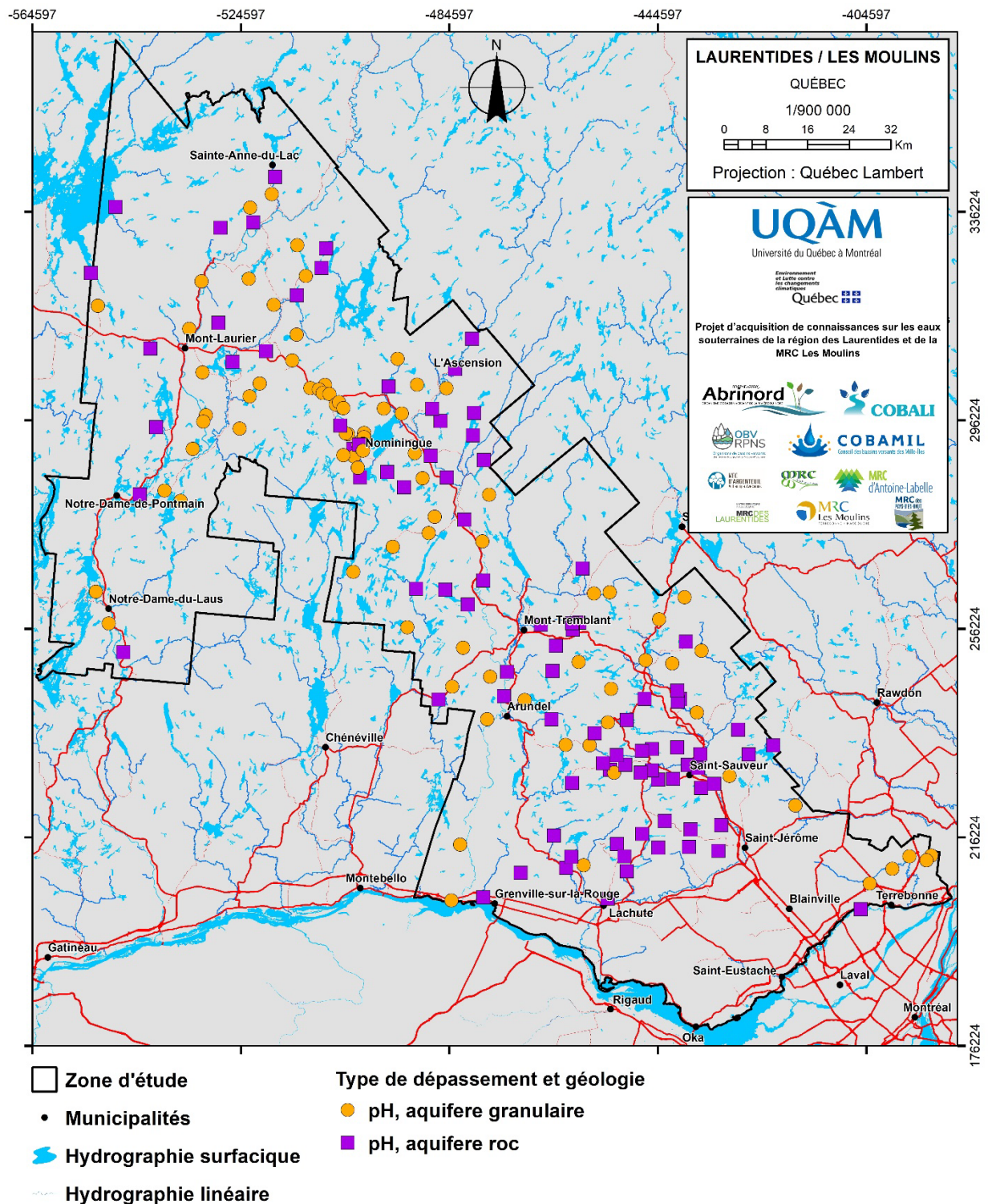


Figure 94 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le pH

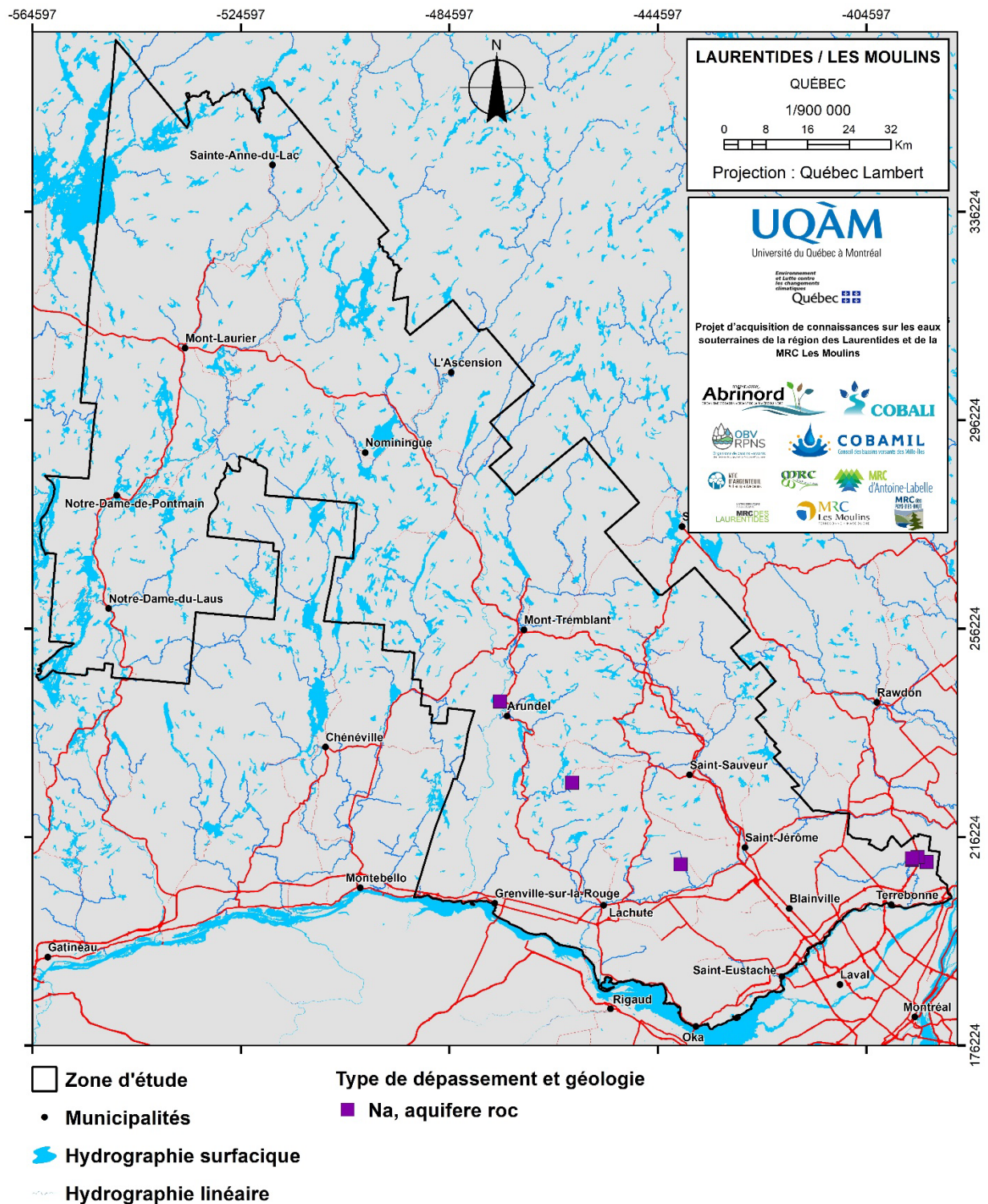


Figure 95 : Localisation des sites de dépassement du critère esthétique pour le sodium



17 ANNEXE J – DATATION ET TEMPS DE RESIDENCE DE L’EAU SOUTERRAINE **(MSC SAMUEL BOLDUC)**

17.1 Introduction

Le projet de maîtrise de Samuel Bolduc a été réalisé grâce au financement du PACES-LAURLM et à un financement conjoint de Mitacs et des MRC de la région d’étude. Il a débuté en mai 2020 et devrait se terminer à l’été 2022. Le but de ce projet de maîtrise est d’établir les temps de résidence de l’eau souterraine dans la région des Laurentides, en particulier de celle exploitée par les municipalités. Quelques résultats préliminaires sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

17.2 Méthodes utilisées

Au cours de l’été 2020, 30 puits utilisés par des municipalités de la région ont été échantillonnés pour y analyser la géochimie, les isotopes stables de l’eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$), le tritium (^3H), les isotopes de l’hélium (^3He et ^4He), le ^{14}C et le $\delta^{13}\text{C}$ -DIC, ainsi que les ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Les bassins versants visés étaient ceux de la rivière du Nord (10 échantillons), de la rivière Rouge (12), de la rivière du Lièvre (7) et de la rivière de l’Assomption (2).

Le prélèvement et les analyses pour la géochimie et les isotopes stables de l’eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$) ont été décrits à la section 3.2.4. Il n’a été possible de mesurer les isotopes de l’uranium que sur un sous-groupe de 12 échantillons, car les quantités d’uranium dissous étaient généralement faibles. Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles de Nalgene de 1 L, filtrés avec des filtres Millipore de 0.7 mm et acidifiés à un pH de 2. Un volume de 500 ml a été prélevé pour la mesure des isotopes ^{234}U et ^{238}U par un spectromètre à source plasma MC-ICP-MS Nu Plasma II au Laboratoire des isotopes stables non traditionnels et radiogéniques du Geotop à l’UQAM. Un volume supplémentaire de 100 ml a été utilisé pour la mesure des quantités d’uranium dissous dans l’eau, toujours par MC-ICP-MS. Les activités du ^3H et le ^{14}C ont été mesurés au Laboratoire AMS André E. Lalonde de l’Université d’Ottawa. Les concentrations en carbone inorganique dissous (CID) et le rapport isotopique $\delta^{13}\text{C}$ -DIC pour la correction et l’application des modèles d’âge ^{14}C ont été mesurés au Laboratoire d’isotopes stables Ján Veizer de l’Université d’Ottawa. Les matériaux recommandés et les protocoles d’échantillonnage proposés par le Laboratoire AMS André E. Lalonde ont été rigoureusement appliqués afin d’éviter toute source de pollution qui puisse entraîner des erreurs sur la mesure de l’activité du radiocarbone (https://www.ams.uottawa.ca/wp-content/uploads/2020/03/Lalonde-AMS_14C-Water-Sampling-

[Protocol.pdf](#)). La concentration du CID et son rapport isotopique en $\delta^{13}\text{C}$ ont été mesurés par spectromètre de masse à ratios isotopiques (IR-MS) (<https://isotope.uottawa.ca/fr/services-waters>). Les échantillons d'eau pour la mesure du ^3He ont été prélevés dans des bouteilles de 1 L en polyéthylène haute densité (HDPE). L'activité du tritium a été mesurée au Laboratoire des gaz rares de l'Université d'Ottawa par la méthode d'enrichissement par électrolyse et mesure par scintillation (Taylor, 1977).

Les échantillons pour la mesure des gaz rares ont été prélevés en utilisant des tubes en cuivre connecté à la sortie du puits municipal avec des connexions hydrauliques de type NPT et des tuyaux en PVC armé. Les précautions ont été prises pour éviter toute contamination avec l'atmosphère. En bref, un tuyau de cuivre (qualité K frigorifique) de 3/8 po de diamètre muni de deux mâchoires métalliques aux extrémités a été connecté via des tubes en PVC et connecteurs NPT à l'une des vannes de service en tête de puits. L'eau a circulé dans le tuyau pendant plusieurs minutes et ensuite les mâchoires sont fermées en isolant de l'atmosphère 14 cm³ d'eau. Une fois au laboratoire, le tuyau est ouvert dans un système sous vide et le gaz dissous est récupéré par dégazage, purifié de tous gaz réactifs et ensuite piégé dans une chambre cryogénique à 9 K. Les gaz rares sont relâchés ensuite un par un en réchauffant le piège et leur composition isotopique est mesurée avec un spectromètre de masse à haute résolution, multi-collecteur, pour gaz rares Thermo Helix-MC Plus, au Laboratoire des gaz rares du Geotop, à l'UQAM (Tardani et al., 2021). Seuls les isotopes de l'hélium (^3He et ^4He) ont été mesurés afin de calculer les temps de résidence de l'eau par la méthode $^3\text{H}/^3\text{He}$ (Tolstikhin et Kamensky, 1969) et par la méthode $(\text{U-Th})/^4\text{He}$ (Marine, 1979). L'isotope ^{22}Ne , d'origine atmosphérique dans l'eau souterraine, a été mesuré pour détecter éventuellement des contaminations atmosphériques et apporter ainsi une correction sur les concentrations des isotopes de l'hélium.

17.3 Résultats

Les résultats concernant la géochimie et les isotopes stables de l'eau sont présentés à la section 5.6 tandis que les résultats de la datation $^3\text{H}/^3\text{He}$ et de la datation ^{14}C ont été présentés à la section 5.5.5. Les paragraphes qui suivent présentent quelques résultats complémentaires et les résultats complets pourront être consultés dans le mémoire de Samuel Bolduc lorsque le mémoire de maîtrise sera terminé.

17.3.1 Datation U-TH/4He

L'U et le Th contenu dans les roches décroissent en produisant de particules α . Cet hélium dit radiogénique s'accumule dans la roche et est ensuite transféré dans l'eau en contact avec la surface minérale. Il devrait donc être possible d'estimer un temps de résidence du fluide, grâce à l'équation de Kulongoski et Hilton (2011) :

$$t = \frac{{}^4\text{He}_{\text{rad}}}{P {}^4\text{He} \times \Lambda_{\text{He}} \left(\frac{1-\phi}{\phi} \right) \times \rho_{\text{roche}}} \quad (\text{éq. 6})$$

où ${}^4\text{He}_{\text{rad}}$ est la concentration de l'hélium radiogénique dans l'eau, $P {}^4\text{He}$ est le taux de production d'hélium dans la roche, ρ est la densité de la roche composante l'aquifère et $(1-\phi)/\phi$ est la porosité effective de l'aquifère.

Si les âges corrigés ${}^{14}\text{C}$ sont bons, la production locale de ${}^4\text{He}$ par les roches aquifères serait suffisante pour produire tout le ${}^4\text{He}$ radiogéniques dissous dans les eaux, à l'exception de l'eau d'un échantillon qui a un contenu en ${}^4\text{He}$ radiogéniques anormaux (10^{-5} ccSTP/g) par rapport à la moyenne des autres échantillons (10^{-9} à 10^{-7} ccSTP/g). Il est intéressant de noter que le contenu en ${}^4\text{He}$ radiogéniques de l'eau souterraine des Laurentides corrèle avec les âges ${}^3\text{H}/{}^3\text{He}$, même si ceux-ci sont 1 ou 2 ordres de grandeur plus petits que les âges estimés par le ${}^{14}\text{C}$, car le tritium permet de dater la fraction récente du mélange représentant l'eau souterraine (**Figure 97**). Cette relation a été observée aussi dans l'eau souterraine des eskers en Abitibi (Boucher, 2013). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'augmentation des âges ${}^3\text{H}/{}^3\text{He}$ indique les zones de moindre renouvellement des aquifères, où de l'eau ancienne serait préservée, accumulant ainsi du ${}^4\text{He}$ radiogénique.

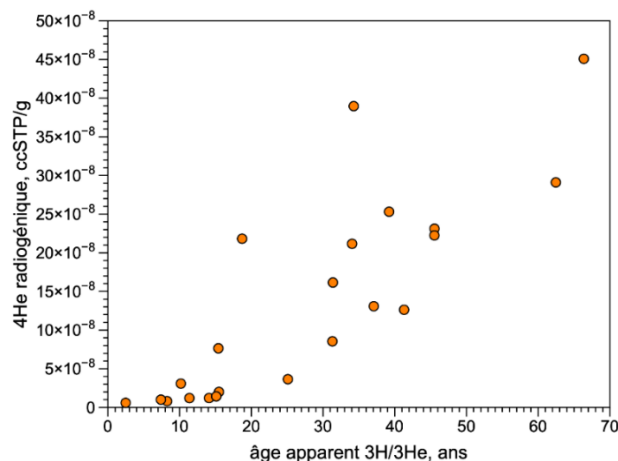


Figure 97. Âge ${}^3\text{H}/{}^3\text{He}$ versus la concentration en ${}^4\text{He}$ radiogénique

17.3.2 Rapports des activités $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$

Les rapports isotopiques de l'uranium (^{234}U et ^{238}U) ne permettent pas d'estimer directement des temps de résidence, car les paramètres à considérer sont nombreux et pas toujours facilement quantifiables (Fröhlich et Gallermann, 1987). Cependant leurs variations isotopiques dépendent de leur séjour dans l'eau souterraine et donnent donc des indications qualitatives sur les temps de résidence. En bref, pendant la décroissance de l' ^{238}U sur la surface des grains constituant l'aquifère, le ^{234}Th est produit et éjecté par le phénomène de recul dans l'eau en contact de la surface minérale. Le ^{234}Th ainsi produit est insoluble dans l'eau et il est rapidement réadsorbé sur la surface minérale ou il décroît en 24 jours en ^{234}U . Le ^{234}U , dans sa forme soluble est à son tour dissous dans l'eau porale. Au moment de la recharge, l'eau dissout des phases minérales qui sont d'âge Protérozoïque contenant l'uranium. Dans ces vieilles roches, le couple $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ a atteint l'équilibre séculaire, c.-à-d. que le système est suffisamment âgé pour que la quantité d'un radioisotope reste constante (et égal à 1) du fait que son taux de production est égal à son taux de désintégration. Plus l'eau reste en contact avec l'aquifère, plus l' ^{234}U est produit et dissous dans la phase liquide, créant un excès qui se reflète dans l'augmentation du rapport $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ au-delà de 1. Dans la **Figure 98** on a reporté l'évolution du rapport $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ avec les âges ^{14}C corrigés. Les résultats montrent que le rapport $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ est proche de 1 pour les eaux modernes et submodernes, mais augmente avec l'âge jusqu'à des valeurs de déséquilibre séculaire de 1.6 (**Figure 98**).

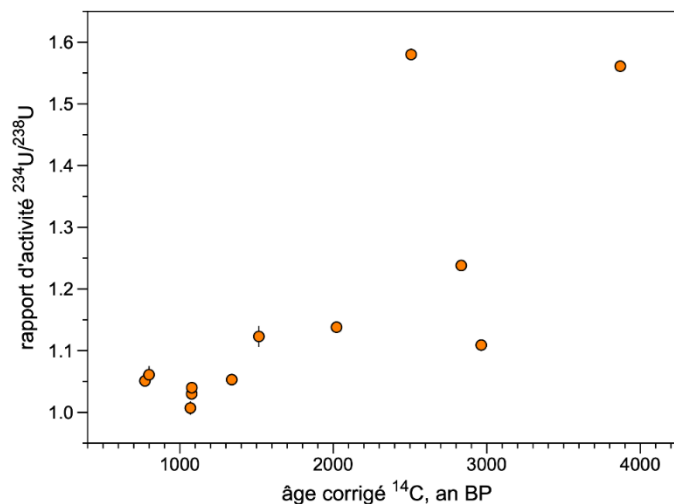


Figure 98. Rapports isotopiques $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ vs les âges corrigés ^{14}C

17.3.3 Couplage des traceurs d'âge

Une nouvelle méthode graphique a été développée pour représenter la coévolution des traceurs d'âge ($^3\text{H}/^3\text{He}$, $^4\text{He}_{\text{rad}}$ et ^{14}C) dans un diagramme ternaire (**Figure 99**). Le pôle de l'activité ^{14}C varie entre des valeurs de 0 et 1.2, la valeur 1.2 illustre une eau comportant une signature atmosphérique. Les deux autres pôles sont les pôles d'enrichissement d'hélium, soit le $^3\text{He}_{\text{trit}}$ et le $^4\text{He}_{\text{rad}}$. Les deux pôles sont exprimés en fonction de leur activité isotopique ($i\text{He}/(i\text{He}_{\text{tot}} - i\text{He}_{\text{ea}})$, avec $i=[3,4]$) et varient entre 0 (recharge) et 1 (eau très vieille). L'activité du ^{14}C décroît dans le temps avec la décroissance radioactive et les échanges isotopiques avec le matériel carbonaté et la méthanogénèse. Les activités d'hélium radiogénique et tritiogéniques augmentent dans le temps par les émissions α provenant des chaînes de désintégration radioactives de la série U-Th et provenant de la décroissance radioactive du tritium. En résumé, le graphique ternaire ($f^{14}\text{C}$, $^4\text{He}_{\text{rad}}$, $^3\text{He}_{\text{trit}}$) illustre une droite de mélange entre le pôle de recharge récente (1,0,0) et une recharge ancienne (0,1,1).

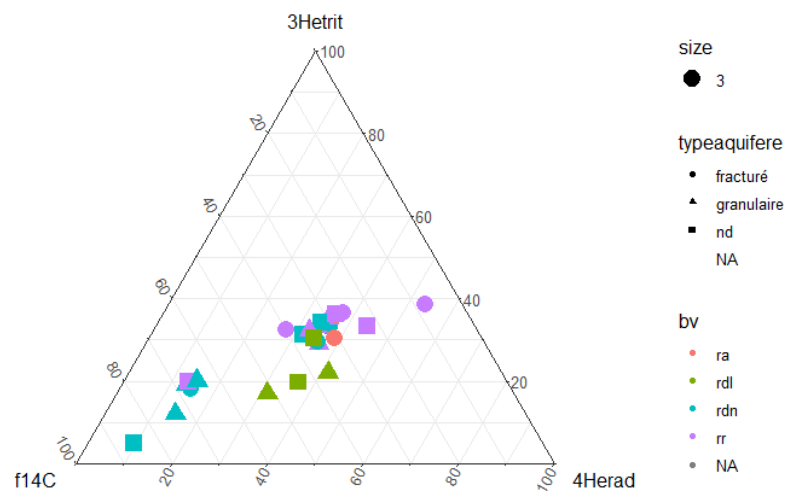


Figure 99 : Évolution de l'activité des géochronomètres

18 ANNEXE K – ÉMERGENCE DE L'EAU SOUTERRAINE DANS LES BASSINS VERSANTS AMONTS (MSC FREDERIQUE DUBOIS)

18.1 Introduction

Le projet de maîtrise de Frédérique Dubois a été réalisé grâce au financement du PACES-LAURLM et à un financement conjoint de Mitacs et des MRC de la région d'étude. Il a débuté en mai 2020 et devrait se terminer à l'été 2022. Quelques résultats préliminaires sont présentés dans les paragraphes qui suivent. Le but de ce projet est de localiser les principales zones d'émergence de l'eau souterraine dans les portions amont des bassins versants et leur rôle dans le soutien des débits d'étiage dans les parties plus en aval. Quelques résultats préliminaires sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

18.2 Méthodes utilisées et bassins versants étudiés visés

Quatre bassins versants ont été étudiés dans la région du PACES-LAURLM, c.-à-d. les bassins du ruisseau Lanthier, de la rivière Sagouay, de la rivière à Simon et du ruisseau des Vases. Ces bassins versants ont été sélectionnés en raison de leur accessibilité et des conditions contrastées de géologie, d'utilisation du territoire et des altitudes qu'ils représentent (**Figure 100** et **Figure 103**).

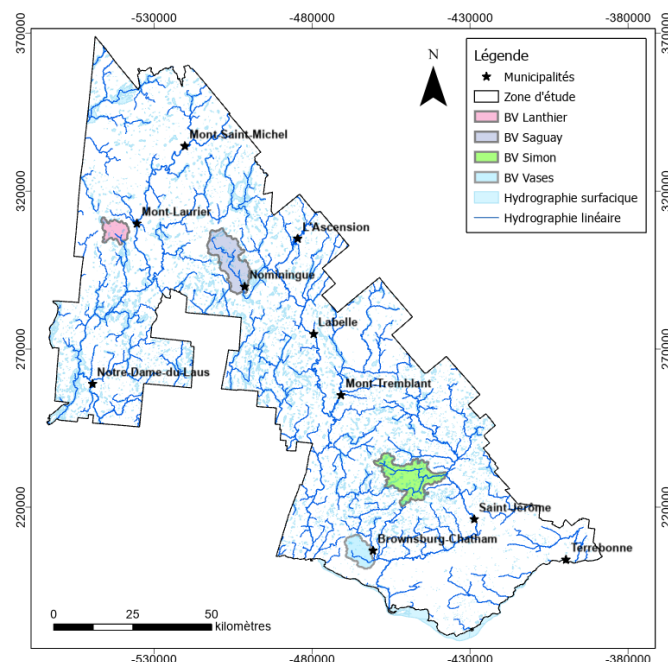


Figure 100 : Localisation des quatre bassins versants étudiés

Au cours des mois de juillet et août 2020 et 2021, c.-à-d. en période d'étiage, des échantillons d'eau de surface ont été prélevés à 98 stations dans des bouteilles étanches PETG de 250 ml pour le ^{222}Rn , et des bouteilles étanches de 80 ml pour les isotopes stables de l'eau. Les stations sont réparties sur les quatre bassins versants étudiés. Au même moment, et à chaque station d'échantillonnage de l'eau, les débits ont été mesurés à l'aide d'un vélocimètre électromagnétique portatif pour les sections de rivières de moins de 4 m de largeur et d'un vélocimètre Doppler intégrateur pour les sections plus larges. Deux échantillons d'eau ont été prélevés dans des puits du bassin versant du ruisseau des vases pour analyses de l'activité ^{222}Rn . L'activité ^{222}Rn de l'eau des cours d'eau et de l'eau souterraine a été mesurée au laboratoire d'hydrogéologie de l'UQAM à l'aide d'un compteur scintillation alpha liquide (modèle Hidex SL-300), en méthode d'extraction suivant le protocole de Lefebvre et al. (2013). La composition en isotopes stables de l'eau des cours d'eau a été analysée par un spectromètre de masse OA-ICOS également au laboratoire du Geotop.

18.3 Résultats préliminaires

18.3.1 Débits

Le débit moyen des tronçons principaux de la rivière Sagouay, du ruisseau Lanthier et du ruisseau des Vases est de 0,55 m³/s, 0,09 m³/s et 0,05 m³/s respectivement (**Figure 101**). Les débits les plus élevés ont été mesurés à l'exutoire de la rivière à Simon avec 1,18 m³/s à l'exutoire de la rivière (**Figure 102**).

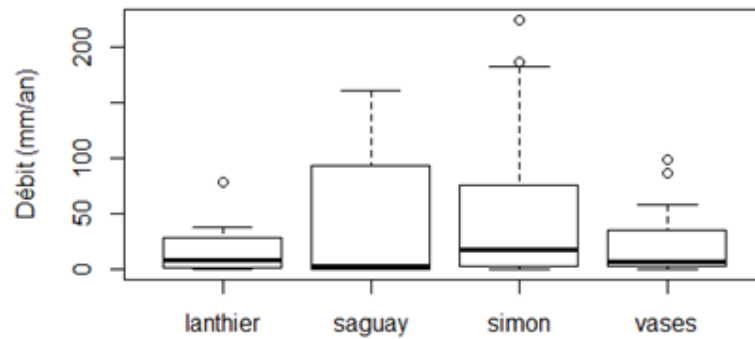


Figure 101. Comparaison des débits mesurés par bassin versant. Les débits ont été transformés en mm/an en utilisant la superficie de chaque bassin versant)

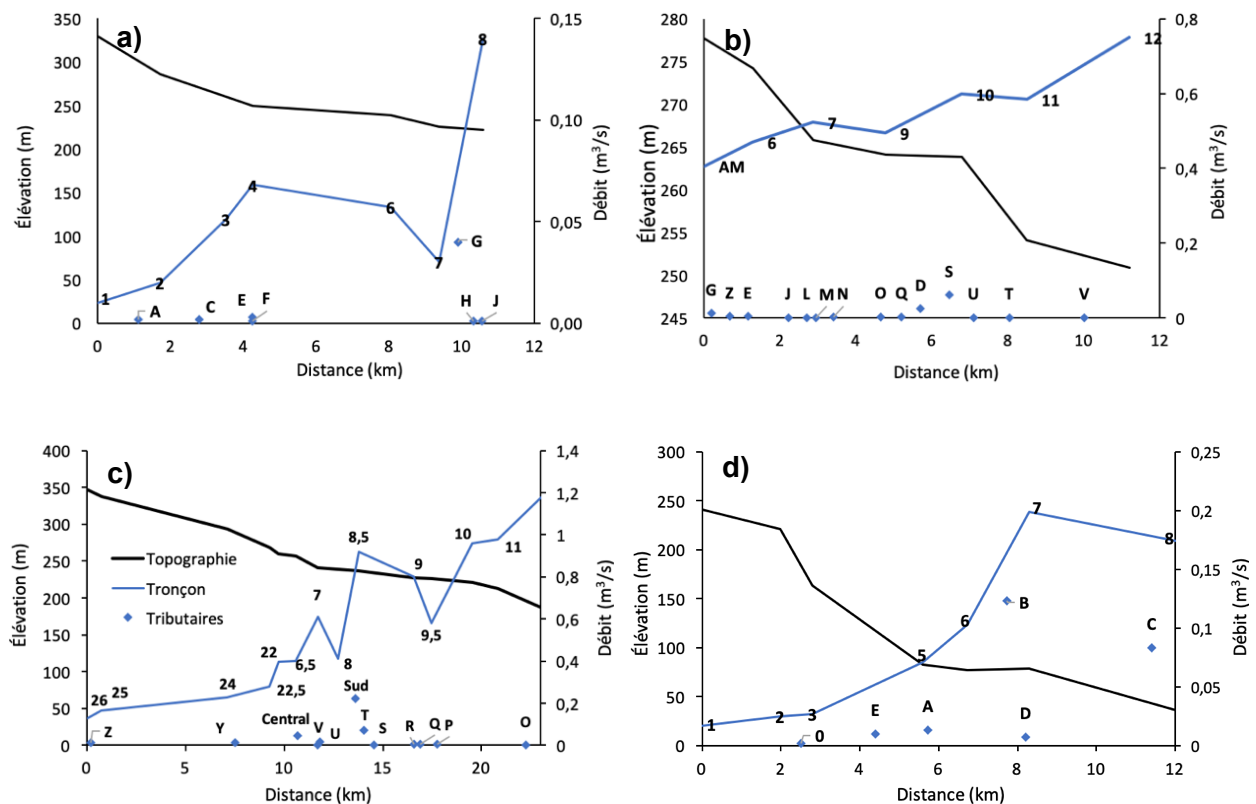


Figure 102. Débits mesurés dans les bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Saguay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases

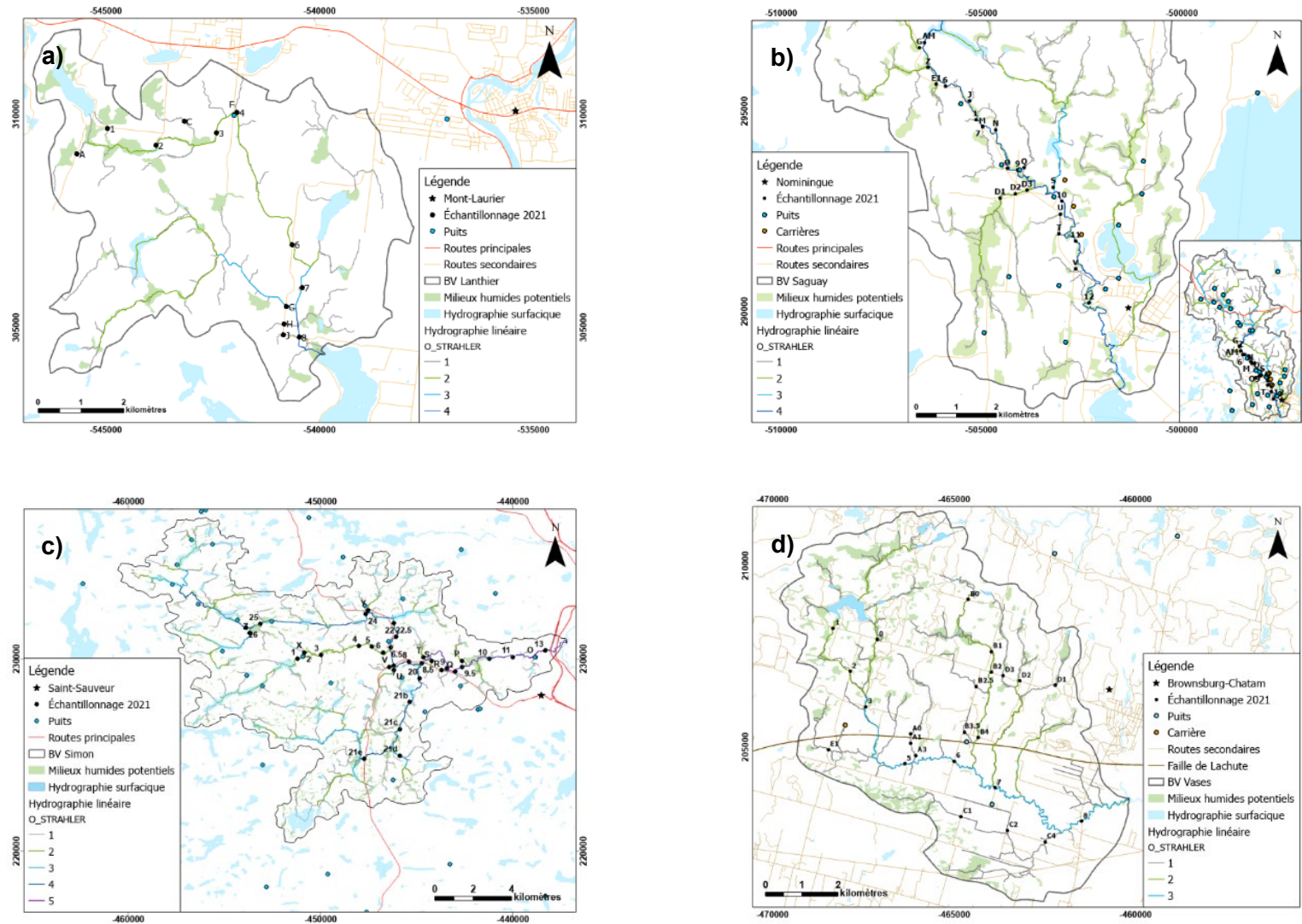


Figure 103. Bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Saguay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases

18.3.2 Activité ^{222}Rn

Les activités ^{222}Rn dans le tronçon principal de la rivière Sagouay et de ses tributaires sont statistiquement plus élevées ($p < 0,05$) que celles de la rivière à Simon, du ruisseau des Vases et du ruisseau Lanthier (**Figure 104**). Cette différence peut être expliquée par le contraste dans les activités en radon dans l'eau souterraine entre le bassin versant de la rivière du Lièvre où se trouve le ruisseau Lanthier (55,28 Bq/L) et ceux de la rivière Rouge où se trouve la rivière Sagouay (36,49 Bq/L) et de la rivière du nord où se trouvent la rivière à Simon et le ruisseau des Vases (12,39 Bq/L). L'activité ^{222}Rn la plus élevée est observée sur la rivière Sagouay, avec une valeur maximale d'environ 11 Bq/L observée au point d'échantillonnage 10, sur le tronçon principal, et dans le tributaire J (**Figure 105**). La moyenne d'activité ^{222}Rn sur la rivière à Simon est de 2,61 Bq/L et est inférieure à la moyenne de 2,70 Bq/L retrouvée dans ses tributaires. La moyenne d'activité ^{222}Rn est plus élevée dans les tronçons principaux des rivières Simon et Vases. Plusieurs pics sont observés sur les bassins versants Lanthier, Sagouay et Simon, tandis qu'un seul pic d'activité ^{222}Rn est observé sur la portion amont du tronçon du ruisseau des Vases. Ses tributaires B et C présentent une activité supérieure aux tributaires 0, E, A et D.

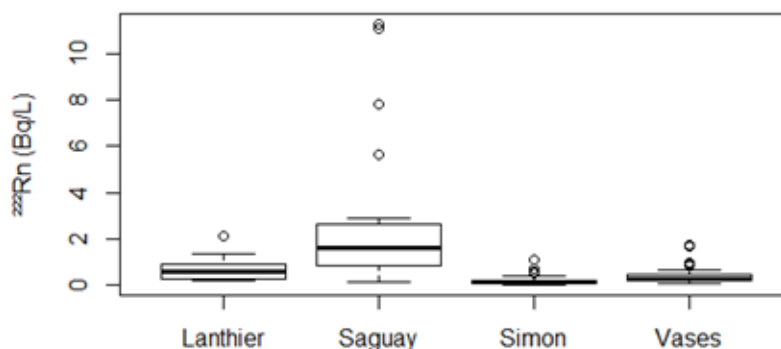


Figure 104. Comparaison des activités ^{222}Rn par bassin versant

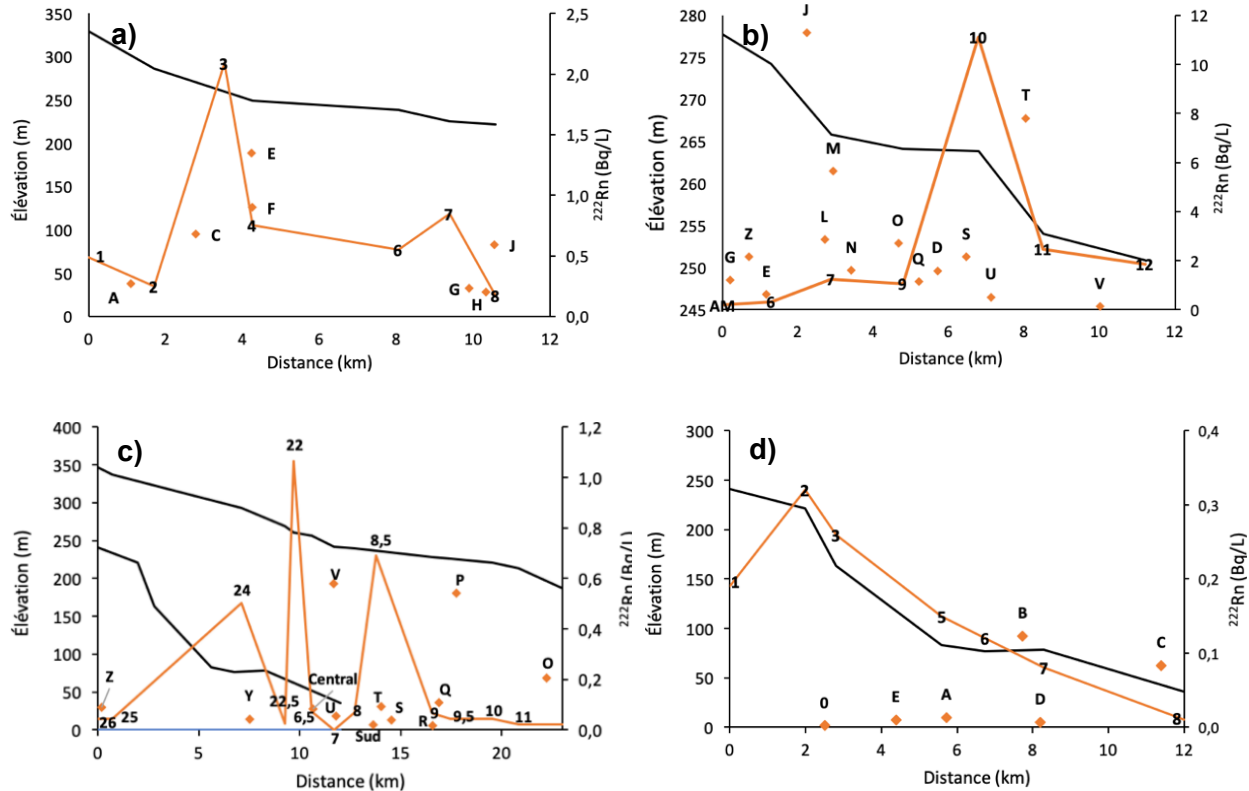


Figure 105. Activités ^{222}Rn mesurées dans les bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Sagouy, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases

18.3.3 Isotopes stables de l'eau

Les compositions en isotopes stables de l'eau sont statistiquement différentes ($p < 0,05$) entre tous les bassins versants étudiés, excepté entre la rivière Sagouy et le ruisseau Lanthier (au nord) pour le $\delta^2\text{H}$ et entre la rivière à Simon et le ruisseau des Vases (au sud) pour le $\delta^{18}\text{O}$ (résultats non présentés ici). L'effet de la latitude sur les températures et les précipitations explique les différences nord-sud dans les compositions isotopiques de l'eau de surface et les compositions en isotopes stables de l'eau souterraine suivent cette variabilité latitudinale.

Les compositions en $\delta^2\text{H}$ (**Figure 106**) et en $\delta^{18}\text{O}$ (**Figure 107**) varient de manières similaires tout au long des quatre rivières. Les compositions isotopiques du cours d'eau principal sont différentes de celles des affluents. Par exemple, la plupart des affluents du ruisseau Lanthier sont plus enrichis que le cours d'eau principal, tandis que l'inverse est observé sur le ruisseau des Vases.

Sur les rivières Sagouay et à Simon, les compositions isotopiques du cours d'eau principal et des affluents varient beaucoup plus dans l'espace.

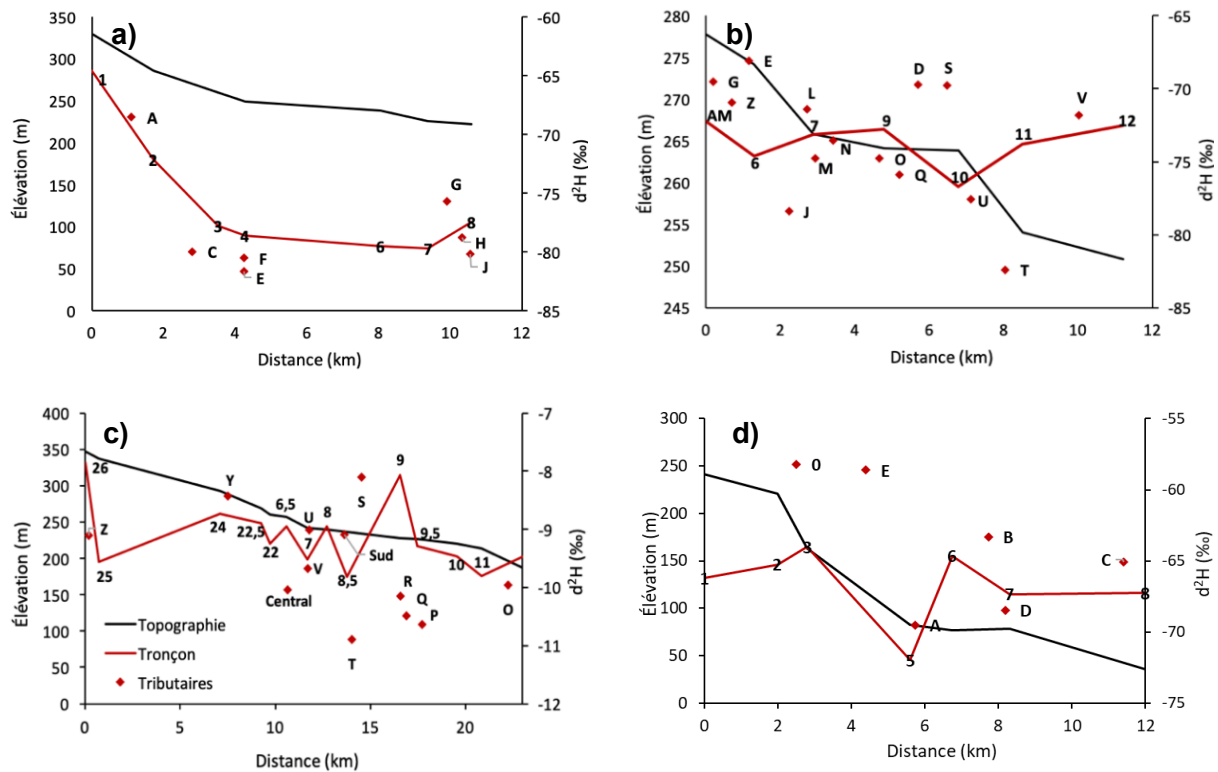


Figure 106. $\delta^2\text{H}$ dans l'eau de surface sur a) le ruisseau Lanthier, b) la rivière Sagouay, c) la rivière à Simon, d) le ruisseau des Vases

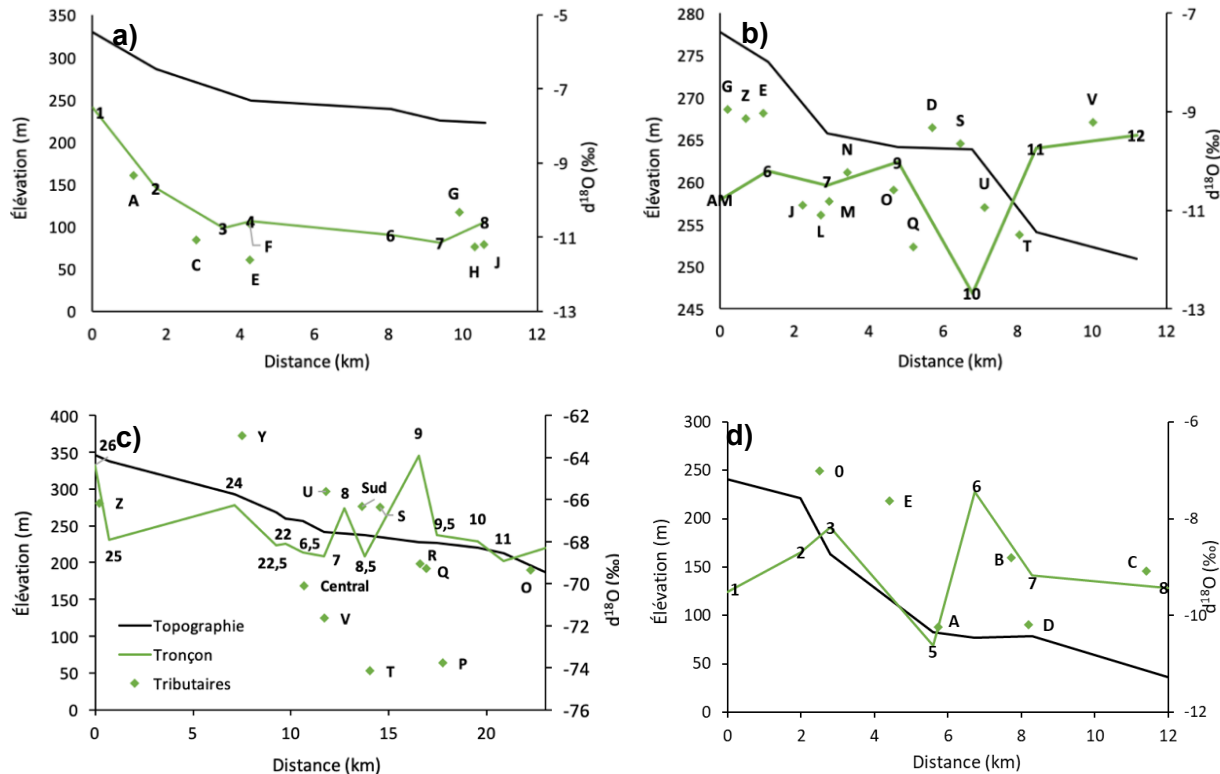


Figure 107 : $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux de surface des bassins versants étudiés a) ruisseau Lanthier, b) rivière Sagouay, c) rivière à Simon, d) ruisseau des Vases

18.3.4 Travaux en cours

L'analyse des résultats de ce projet de maîtrise est encore en cours. Les prochaines étapes permettront 1) de confirmer par bilan de masse de ^{222}Rn , de conductivité électrique et d'isotopes stables de l'eau les secteurs où l'eau souterraine contribue au débit des cours d'eau, 2) d'identifier les paramètres géologiques, topographiques, de taille de bassins, de profondeur de nappe qui contrôlent la connectivité aquifère-cours d'eau dans les portions amont des bassins versants et 3) de proposer une approche cartographique de la connectivité nappe-rivière dans les portions amont des bassins versants.

19 ANNEXE L – QUANTIFICATION DE LA RECHARGE DE L'EAU SOUTERRAINE

(MSC JONATHAN CHABOT-GREGOIRE)

Le mémoire de maîtrise en sciences de la Terre de Jonathan Chabot-Grégoire est disponible en ligne sur le site de la bibliothèque de l'UQAM. Le texte qui suit est le résumé de ce mémoire.

La recharge de l'eau souterraine représente l'eau qui s'infiltre à travers les dépôts de surface pour rejoindre la nappe. La recharge est un processus difficile à estimer, mais important à quantifier surtout en contexte où les pressions sur les ressources en eaux souterraines sont vouées à augmenter. Le défi principal dans l'estimation de la recharge repose sur la difficulté à la mesurer directement. Il est donc généralement acquis que plusieurs méthodes doivent être combinées pour obtenir une estimation robuste de la recharge. Le présent projet a pour objectif d'estimer la recharge dans la région des Laurentides et de la municipalité régionale de comté (MRC) les Moulins en 1) identifiant les principales zones de recharge et 2) quantifiant la recharge et ses variations spatio-temporelles. La zone d'étude couvre 12 550 km² et rejoint les municipalités de Mirabel à Mont-Laurier et inclut aussi la MRC les Moulins. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer la recharge et sa distribution dans le temps et l'espace : la séparation des débits de base, le bilan amont aval des débits, la méthode de fluctuation des niveaux de nappe ainsi qu'une modélisation du bilan hydrique de surface. Les résultats de la séparation des débits de base montrent une recharge entre 110 et 189 mm pour la période du 1er mai au 30 septembre 2019 sur les rivières instrumentées Calumet (CAL), Sagouay (SAG) et Simon (SIM). Sur les stations hydrométriques de la Direction de l'expertise hydrique (DEH) de la zone d'étude, les débits de base moyens annuels varient entre 198 et 352 mm/an. Le bilan amont aval des débits a permis de déceler des zones préférentielles d'émergence et de recharge de l'eau souterraine le long des rivières CAL, SAG et SIM. La méthode de fluctuation des niveaux de nappe a permis de calculer une large gamme de valeurs possible pour la recharge à certains puits du Réseau de suivi des eaux souterraines du Québec (RSESQ) allant d'environ 54 mm/an à plus de 690 mm/an. La modélisation par bilan hydrique de surface avec HydroBudget (HB) a finalement permis de calculer une recharge moyenne sur la zone d'étude de 198 mm/an entre 1961 et 2017. La modélisation de la recharge a également permis d'observer des zones préférentielles de recharge dans les vallées de la région, où le matériau granulaire parfois grossier est jumelé à des précipitations importantes et une pente relativement faible.

20 ANNEXE M – INDICATEURS DE VULNERABILITE DE L'EAU SOUTERRAINE ET INDICE D'IMPACTS ANTHROPIQUES (MSC FANNY PITHON)

Le mémoire de maîtrise en sciences de la Terre de Fanny Pithon est disponible en ligne sur le site de la bibliothèque de l'UQAM. Le texte qui suit est le résumé de ce mémoire.

L'eau souterraine constitue le plus gros réservoir d'eau douce accessible et représente 1/3 des prélèvements d'eau douce dans le monde. La contamination de l'eau souterraine est devenue un des problèmes globaux majeurs de la planète. En 2018, une équipe de l'UQAM a entrepris le projet d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines réalisées par une équipe de l'UQAM dans la région des Laurentides et de la MRC Les Moulins (11 500 km²) dans la province du Québec, au Canada. Dans la région d'étude, 44% de la population s'alimente en eau potable part des puits résidentiels. Très peu de données sont disponibles sur la qualité de l'eau souterraine, dans cette région qui connaît un développement important pouvant causer une pression sur la qualité ressource. Ce projet de maîtrise avait pour but de procéder à l'analyse géochimique, isotopique et bactériologique des eaux souterraines de la région des Laurentides et de la MRC les Moulins. Pour cela, quatre objectifs spécifiques ont été définis : 1) caractériser la géochimie de l'eau souterraine pour identifier les différents faciès hydrogéochimiques, 2) déterminer les activités humaines ont un impact sur la qualité de l'eau souterraine, 3) identifier les sources de contaminations décelées, 4) évaluer si une densification de l'échantillonnage apporte des informations utiles pour identifier les sources de contaminants.

Au cours des étés 2019 et 2020, 390 échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans différents types d'ouvrage de captage (résidentiel, municipaux, forage) et dans différents contextes hydrogéologiques. Près de 50 paramètres géochimiques (anions, nutriments, métaux et sulfures), trois isotopes stables (15N, 2H, 18O) 35 pesticides, 15 produits de soins personnels (PP) ainsi que cinq paramètres microbiologiques ont été analysés. L'échantillonnage a été réalisé à l'échelle régionale avec un échantillon tous les 25 km² et à l'échelle locale sur trois bassins versants expérimentaux, avec un échantillon tous les 5km².

L'analyse des éléments chimiques majeurs (Ca, Cl, Na, SO₄, K, HCO₃) a permis de dégager neuf faciès hydrogéochimiques, dont le type Ca-HCO₃ est le plus récurrent. Ce type d'eau se situe dans les zones de recharges et est lié à la dissolution des carbonates. Les contextes hydrogéologiques, incluant le degré de confinement (libre, semi-captif, captif) et les aquifères dans le roc et les dépôts meubles semblent influencer la qualité de l'eau. Les aquifères à nappe libre renferment majoritairement des eaux moins minéralisées et moins évoluées que les aquifères captifs ou semi-captifs et les aquifères dans le roc renferment des eaux plus minéralisées.

Des concentrations en nitrates et en pesticides respectant les normes de potabilité ont été mesurées. Des dépassements de normes ont été mesurés pour les fluorures, le baryum et l'uranium. Des produits pharmaceutiques ont également été détectés. Plusieurs dépassements de critères esthétiques de qualité de l'eau ont été observés, notamment pour le manganèse, fer, le sodium et les chlorures, les matières dissoutes totales, le pH, les sulfures. Les dépassements de normes sont attribués à la nature des formations géologiques en place, aux conditions physicochimiques dans l'aquifère et, à des contaminations possibles par les sels de route, les effluents de fosses septiques, les activités agricoles, ainsi qu'à l'invasion du territoire par l'ancienne mer de Champlain dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'analyse des isotopes stables de l'eau montre que la composition isotopique de l'eau souterraine est proche de celle de l'eau de pluie, ce qui indique une eau souterraine plutôt jeune qui n'a subi d'évaporation. L'analyse des 71 échantillons pour les isotopes stables des nitrates montre que échantillons subissent un mélange d'au moins trois sources de nitrates, soit des fertilisants organiques ou effluents de fosses septiques, des fertilisants minéraux, et l'azote du sol. Plusieurs contaminations bactériologiques dépassant les normes de potabilité ont été observées, plus particulièrement dans les puits se trouvant en condition de nappe libre dans l'aquifère granulaire. La densification de l'échantillonnage dans les trois bassins versants expérimentaux n'a pas permis d'identifier avec certitude les sources de contaminants quand ceux-ci ont été détectés dans l'eau souterraine comme cela aurait pu être attendu.

Pour caractériser la vulnérabilité de l'eau souterraine sur le territoire, un indice de vulnérabilité hydrogéochimique a été utilisé, il démontre la vulnérabilité élevée de la zone d'étude, et plus particulièrement pour les aquifères du Bouclier canadien. La vulnérabilité semble diminuer avec l'augmentation du confinement des aquifères. Un nouvel indice a été développé pour caractériser l'impact anthropique sur l'eau souterraine, considérant cinq catégories d'impacts : la salinité, les nitrates, la bactériologie, les produits pharmaceutiques et les pesticides. L'indice montre que malgré la vulnérabilité élevée de la zone, les puits sont modérément impactés par les activités en surface.

21 ANNEXE N – CONNECTIVITE HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES MILIEUX HUMIDES (MSC RACHEL LAPLANTE)

Le mémoire de maîtrise en sciences de la Terre de Rachel Laplante est disponible en ligne sur le site de la bibliothèque de l'UQAM. Le texte qui suit est le résumé de ce mémoire.

Les milieux humides sont définis comme des écosystèmes saturés en eau pendant une période de l'année, ayant une végétation hygrophyte et un sol hydromorphe. Ils subissent des pressions grandissantes en raison des changements climatiques et des activités humaines, ce qui a un impact sur leurs fonctions hydrologiques. Il est difficile d'estimer cet impact et donc de cibler les milieux humides à protéger prioritairement. Peu de méthodes permettent d'identifier la connexion entre les milieux humides et les aquifères, mais elles sont nécessaires pour assurer la protection des milieux humides et la gestion durable de la ressource en eau. L'objectif de cette recherche était d'évaluer différentes méthodes pour déterminer la connectivité entre les milieux humides et l'eau souterraine afin d'identifier les milieux humides à protéger prioritairement à l'échelle régionale. La zone d'étude correspond à la région des Laurentides (12 550 km², Québec, Canada). Elle est principalement couverte par le Bouclier canadien, mais d'importants aquifères granulaires se trouvent dans de nombreuses vallées. Les milieux humides couvrent 8% de la région. La première méthode est une méthode de terrain qui permet d'évaluer la connectivité entre l'eau souterraine et les tourbières à partir des solides totaux dissous et d'indicateurs biologiques. Les solides totaux dissous ont été mesurés et les indicateurs biologiques ont été échantillonnés dans 46 tourbières durant les étés 2019 et 2020. Les résultats suggèrent qu'il existe une connexion potentielle avec l'eau souterraine dans la majorité des tourbières étudiées. Toutefois, la méthode ne permet pas d'identifier les connexions pour les tourbières individuelles. La deuxième méthode qui est utilisée est une approche d'analyse spatiale (SIG) permettant d'évaluer l'*hydrodiversité* des milieux humides, soit la diversité dans le réseau hydrographique et de leur connectivité avec les sédiments avoisinants. La plupart des milieux humides dans les Laurentides sont connectés aux dépôts de till ainsi qu'au roc. Aussi, ils sont connectés au réseau hydrographique par des rivières. Le principal inconvénient de cette méthode est que la qualité des couches utilisées pour l'analyse spatiale affecte directement la qualité des résultats. Finalement, les résultats des deux méthodes suggèrent l'importance d'assurer la protection des milieux humides dans la région des Laurentides puisque leur connectivité à l'eau souterraine et l'eau de surface les rend vulnérables aux pressions qui s'exercent sur le cycle de l'eau.