

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉMERGENCE DE L'EAU SOUTERRAINE DANS LES PORTIONS AMONT DES COURS
D'EAU – EXEMPLE DE QUATRE BASSINS VERSANTS DES LAURENTIDES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR

FRÉDÉRIQUE DUBOIS

SEPTEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice de recherche Marie Larocque pour ses conseils judicieux, son partage de connaissances et ses encouragements tout au long de cette maîtrise. Son support ainsi que sa confiance continue en mes capacités m'ont permis de dépasser mes limites et apprécier le sens de la rigueur.

Merci également à tous mes collègues ainsi qu'aux agents de recherche pour les rires, les belles discussions ainsi que pour l'aide que vous m'avez parfois apportée sur le terrain. Une mention spéciale s'impose pour mes grands amis et collègues Samuel Bolduc et Fanny Pithon pour leur incroyable soutien ainsi que leurs encouragements.

J'aimerais également remercier mes amis ainsi que mes nouveaux collègues pour leurs nombreux encouragements, leur compréhension ainsi que leur écoute.

Finalement, j'aimerais dédier ce mémoire de recherche à mes parents, un modèle exceptionnel de persévérance qui m'ont bien appris qu'il ne faut jamais abandonner et qu'il faut travailler dur pour atteindre ses objectifs. Merci pour votre support, vos encouragements et votre confiance sans limites.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	17
1.1 Problématique.....	17
1.2 État des connaissances.....	18
1.2.1 Interactions eau de surface – eau souterraine.....	18
1.2.2 Traceurs naturels et artificiels.....	20
1.2.3 Indicateurs de connectivité surface-souterrain.....	24
1.3 Objectifs du mémoire.....	25
CHAPITRE 2 ZONE D'ÉTUDE	27
2.1 Région d'étude et bassins versants étudiés.....	27
2.2 Topographie, occupation du territoire et géologie.....	30
2.2.1 Conditions générales.....	30
2.2.2 Ruisseau des Vases.....	30
2.2.3 Rivière à Simon.....	32
2.2.4 Rivière Saguay.....	34
2.2.5 Ruisseau Lanthier.....	36
2.3 Hydrogéologie.....	38
2.3.1 Piézométrie et niveau de confinement.....	38
2.3.2 Traceurs naturels de l'eau souterraine.....	39
2.4 Hydrologie.....	43
2.4.1 Conditions générales.....	43
2.4.2 Ruisseau des Vases.....	44
2.4.3 Rivière à Simon.....	45
2.4.4 Rivière Saguay.....	46
2.4.5 Ruisseau Lanthier.....	47
2.5 Conditions météorologiques.....	48
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	50
3.1 Campagnes d'échantillonnage.....	50
3.2 Mesures de débits.....	56
3.3 Mesures de conductivités électriques.....	57
3.4 Échantillonnage et analyse des isotopes stables de l'eau.....	57
3.5 Échantillonnage et analyse de l'activité ²²² Rn.....	59

3.6 Bilan de masse avec Radin14	60
3.7 Choix des taux de dégazage du ^{222}Rn	62
3.8 Indice de connectivité.....	64
3.9 Analyses statistiques.....	65
CHAPITRE 4 RÉSULTATS	66
4.1 Introduction.....	66
4.2 Évolution amont aval des débits.....	66
4.3 Évolution amont aval des traceurs d'eau souterraine	70
4.3.1 ^{222}Rn	70
4.3.2 Conductivité électrique	73
4.3.3 Isotopes stables de l'eau.....	77
4.4 Quantification de l'émergence d'eau souterraine	81
4.4.1 Ruisseau des Vases	81
4.4.2 Rivière à Simon.....	84
4.4.3 Rivière Saguay	87
4.4.4 Ruisseau Lanthier.....	89
4.4.5 Calibration des bilans de masse Radin14.....	92
4.5 Indice de connectivité.....	92
4.5.1 Comparaison de l'indice avec les traceurs naturels de l'eau souterraine et les variations de débit	92
4.5.2 Ruisseau des Vases	99
4.5.3 Rivière à Simon.....	100
4.5.4 Rivière Saguay	101
4.5.5 Ruisseau Lanthier.....	102
4.5.6 Bassin versant de la rivière du Nord	103
CHAPITRE 5 DISCUSSION	104
5.1 Introduction.....	104
5.2 Débit et traceurs naturels de l'eau souterraine.....	104
5.2.1 Débits	104
5.2.2 ^{222}Rn	107
5.2.3 Conductivité électrique	110
5.2.4 Isotopes stables de l'eau.....	112
5.2.5 Pertinence des traceurs d'eau souterraine testés	116
5.3 Émergence d'eau souterraine par bilan de masse avec le calculateur Radin14.....	117
5.3.1 Émergences amont aval simulées et observées dans les rivières étudiées et validité des bilans	117
5.3.2 Validité et limitations de la méthode.....	120
5.4 Indice de connectivité.....	123

5.4.1	Indice de connectivité et émergence d'eau souterraine calculée.....	123
5.4.2	Indice de connectivité, ²²² Rn et paramètres géomorphologiques.....	125
5.4.3	Limitations de l'indice	130
CHAPITRE 6 CONCLUSION.....		133
RÉFÉRENCES		136
ANNEXE A CARTES RÉGIONALES		142
ANNEXE B GÉOLOGIE LOCALE.....		154
ANNEXE C DIMENSIONS DES SECTIONS AUX STATIONS DES TRONÇONS PRINCIPAUX.....		158

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des bassins versants étudiés.	29
Figure 2 : Topographie du bassin versant du ruisseau des Vases (MRNF, 2021b).....	31
Figure 3 : Dépôts quaternaires du bassin versant du ruisseau des Vases (MRNF, 2021a).	32
Figure 4 : Topographie du bassin versant de la rivière à Simon (MRNF, 2021b).	33
Figure 5 : Dépôts quaternaires du bassin versant de la rivière à Simon (MRNF, 2021a).	34
Figure 6 : Dépôts quaternaires du bassin versant de la rivière Saguy (MRNF, 2021a).	35
Figure 7 : Topographie du bassin versant de la rivière Saguy (MRNF, 2021b).....	36
Figure 8 : Dépôts quaternaires du bassin versant du ruisseau Lanthier (MRNF, 2021a).....	37
Figure 9 : Topographie du bassin versant du ruisseau Lanthier (MRNF, 2021b).....	38
Figure 10 : Comparaison de l'activité ^{222}Rn mesurée dans l'eau souterraine des bassins versants Simon, Saguy et Lanthier.	40
Figure 11 : Comparaison des conductivités électriques mesurées dans l'eau souterraine des bassins versants Simon, Saguy et Lanthier.	40
Figure 12 : Comparaison des compositions isotopiques de l'eau souterraine sur les bassins versants Simon, Saguy et Lanthier a) $\delta^2\text{H}$, b) $\delta^{18}\text{O}$. A et B : Ensembles significativement différents.	41
Figure 13 : Composition isotopique $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations et de l'eau souterraine dans la zone d'étude (données de Gagné et al., 2022).....	42
Figure 14 : Localisation des puits d'échantillonnage pour l'analyse des traceurs naturels de l'eau souterraine (modifié de Gagné et al., 2022).....	43
Figure 15 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant du ruisseau des Vases.	44
Figure 16 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant de la rivière à Simon.....	46
Figure 17 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant de la rivière Saguy.	47
Figure 18 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant du ruisseau Lanthier.	48

Figure 19 : Stations de mesures du débit et de la CE, d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique, ainsi que des deux puits résidentiels échantillonnés au cours de l'été 2021 sur le bassin versant du ruisseau des Vases.	51
Figure 20 : Stations de mesures du débit et de la CE, ainsi que d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique sur le bassin versant de la rivière à Simon.....	52
Figure 21 : Stations de mesures du débit et de la CE, ainsi que d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique sur le bassin versant de la rivière Saguary.	53
Figure 22 : Stations de mesures du débit et de la CE, ainsi que d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique sur le bassin versant du ruisseau Lanthier.	54
Figure 23 : Vélocimètre Doppler intégrateur installé sur un flotteur.....	56
Figure 24 : Spectromètre infrarouge à ratios isotopiques à double laser OA-ICOS.	58
Figure 25 : Comparaison des débits mesurés sur les quatre bassins versants a) tronçons principaux et b) tributaires. A et B, C et D : Ensembles statistiquement différents ($p < 0,05$).....	67
Figure 26 : Débits mesurés dans les bassins versants étudiés a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguary, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires (voir figures 15, 16, 17 et 18 pour la position des tributaires dans l'ensemble du réseau hydrographique). Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à l'appareil de mesure. L'ordre de grandeur des débits des panneaux a) et d) différent de ceux retrouvés aux panneaux b) et c).....	69
Figure 27 : Comparaison des activités ^{222}Rn dans l'eau des rivières par bassin versant. A : ^{222}Rn significativement plus élevé ($p < 0,05$).....	70
Figure 28 : Activités ^{222}Rn mesurées dans les bassins versants étudiés a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguary, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à la méthode analytique. Les activités ^{222}Rn des panneaux a) et b) sont du même ordre de grandeur. Cet ordre de grandeur diffère de ceux retrouvés aux panneaux c) et d).....	73
Figure 29 : Comparaison de la conductivité électrique mesurée par bassin versant. A : CE significativement plus petite ($p < 0,05$).....	74
Figure 30 : Conductivité électrique mesurée dans les bassins versants étudiés a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguary, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à l'appareil de mesure.	76

Figure 31 : Comparaison des compositions isotopiques des bassins versants étudiés a) $\delta^2\text{H}$ b) $\delta^{18}\text{O}$. A : Ensembles significativement différents ($p < 0,05$). B et C : Ensembles significativement différents ($p < 0,05$).....	77
Figure 32 : $\delta^2\text{H}$ dans l'eau de surface sur a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées à la méthode analytique.....	80
Figure 33 : $\delta^{18}\text{O}$ dans l'eau de surface sur a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées à la méthode analytique.	81
Figure 34 : Calcul pour le ruisseau des Vases a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn).....	83
Figure 35 : Calcul pour la rivière à Simon a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn). La valeur encerclée en bleu représente une valeur aberrante.....	86
Figure 36 : Calcul pour la rivière Saguay a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn). La valeur encerclée en bleu représente une valeur aberrante.....	88
Figure 37 : Calcul pour le ruisseau Lanthier a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn).....	91
Figure 38 : Indices de connectivité comparés en fonction des variations de débit entre deux stations a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.....	94
Figure 39 : Indices de connectivité comparés avec l'activité ^{222}Rn a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.....	95
Figure 40 : Indices de connectivité comparés avec le $\delta^2\text{H}$ a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.....	96
Figure 41 : Indices de connectivité comparés avec le $\delta^{18}\text{O}$ a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.....	97
Figure 42 : Indices de connectivité comparés avec la conductivité électrique a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.....	98
Figure 43 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur le ruisseau des Vases.....	99

Figure 44 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur la rivière à Simon.....	100
Figure 45 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur la rivière Saguy.....	101
Figure 46 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur le ruisseau Lanthier.....	102
Figure 47 : Indice de connectivité sur le bassin versant de la rivière du Nord.....	103
Figure 48 : Compositions isotopiques des eaux de surface des quatre bassins versants étudiés comparées aux droites météoriques locales et à l'eau souterraine de la région.	114
Figure 49 : Comparaison des indices de connectivités et de l'émergence d'eau souterraine simulée à l'aide de Radin14 sur les bassins versants a) Vases, b) Simon, c) Saguy et d) Lanthier.	124
Figure 50 : Coupe géologique du tronçon principal du ruisseau des Vases comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.	126
Figure 51 : Coupe géologique du tronçon principal de la rivière à Simon comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.....	127
Figure 52 : Coupe géologique du tronçon principal de la rivière Saguy comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.....	128
Figure 53 : Coupe géologique du tronçon principal du ruisseau Lanthier comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.....	129
Figure 54 : Topographie de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	142
Figure 55 : Topographie du socle rocheux de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	143
Figure 56 : Géologie de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	144
Figure 57 : Dépôts quaternaires de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	145
Figure 58 : Épaisseur des dépôts meubles de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	146
Figure 59 : Indice de confinement de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	147
Figure 60 : Piézométrie de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	148
Figure 61 : Drainage des sols de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	149
Figure 62 : Pente des sols de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	150
Figure 63 : Occupation du territoire de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	151
Figure 64 : Précipitations moyennes annuelles de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).....	152
Figure 65 : Température annuelle moyenne de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).	153

Figure 66 : Géologie du bassin versant du ruisseau des Vases.	154
Figure 67 : Géologie du bassin versant de la rivière à Simon.	155
Figure 68 : Géologie du bassin versant de la rivière Saguay.	156
Figure 69 : Géologie du bassin versant du ruisseau Lanthier.	157
Figure 70 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations du ruisseau des Vases a) largeur et b) profondeur.	158
Figure 71 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations de la rivière à Simon a) largeur et b) profondeur.	158
Figure 72 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations de la rivière Saguay a) largeur et b) profondeur.	158
Figure 73 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations du ruisseau Lanthier a) largeur et b) profondeur.	159

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Hydrologie des bassins versants étudiés (GRHQ, 2021).....	27
Tableau 2 : Géologie et hydrogéologie des bassins versants étudiés.....	28
Tableau 3 : Morphologie des rivières étudiées.....	28
Tableau 4 : Répartition des sites d'échantillonnage par bassin versant.....	50
Tableau 5 : Taux de dégazage du ^{222}Rn vers l'atmosphère rapportés dans la littérature (modifié de Moreira, 2016).....	63
Tableau 6 : Débits mesurés sur les bassins versants à l'étude.....	66
Tableau 7 : Activités ^{222}Rn mesurées sur les bassins versants à l'étude.....	70
Tableau 8 : Conductivités électriques mesurées sur les bassins versants à l'étude.....	74
Tableau 9 : $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurés sur les bassins versants à l'étude.....	78
Tableau 10 : Paramètres de base de la modélisation du ruisseau des Vases.....	82
Tableau 11 : Paramètres de base de la modélisation de la rivière à Simon.....	84
Tableau 12 : Paramètres de base de la modélisation de la rivière Saguay.....	87
Tableau 13 : Paramètres de base de la modélisation du ruisseau Lanthier.....	90
Tableau 14 : Résultats d'analyses statistiques de la calibration des bilans de masse Radin14 des quatre bassins versants étudiés.....	92
Tableau 15 : Poids et cotes des paramètres de l'indice de connectivité.....	93

RÉSUMÉ

Les zones amont des bassins versants jouent un rôle important dans le soutien des étiages des cours d'eau, mais sont peu étudiées et peu protégées. Cet apport est crucial pour la faune et la flore riveraine afin de préserver les conditions nécessaires à leur survie, telle qu'une température faible et stable, la présence d'eau à des périodes critiques de leur développement et l'apport en nutriments, mais également pour maintenir les débits en aval sur les cours d'eau qui servent parfois pour l'alimentation en eau potable. Le but de ce projet de maîtrise est de mieux comprendre l'émergence de l'eau souterraine dans les portions amont des cours d'eau. Les objectifs spécifiques sont 1) d'identifier *in situ* les zones d'émergence sur quatre sous-bassins amont, 2) de quantifier par bilan de masse l'apport d'eau souterraine en étiage à ces cours d'eau et 3) de lier l'émergence d'eau souterraine à des facteurs géomorphologiques. Quatre sous-bassins versants ont été étudiés, soit ceux de la rivière à Simon, du ruisseau des Vases, de la rivière Sagouay et du ruisseau Lanthier, tous situés dans la région des Laurentides. Des mesures de débits et de traceurs d'eau souterraine, soit l'activité ^{222}Rn , la conductivité électrique ainsi que la composition isotopique de l'eau, ont été réalisées sur les bassins étudiés. Les évolutions amont-aval des débits et des traceurs d'eau souterraine ont été comparées et des bilans de masse de l'activité ^{222}Rn retrouvée sur les cours d'eau et leurs tributaires ont permis de calculer les apports d'eau souterraine aux quatre bassins versants. La calibration de tous les bilans de masse a été jugée satisfaisante. Un indicateur simple reliant l'émergence de l'eau souterraine en cours d'eau et des paramètres géomorphologiques facilement disponibles a été développé.

Ce projet a permis d'identifier des zones d'émergence d'eau souterraine à l'amont du ruisseau des Vases et sur plusieurs segments de la rivière Sagouay. Sur ces deux bassins versants, les zones d'émergence identifiées à l'aide des résultats de mesures de débits et des traceurs de l'eau souterraine coïncident avec les zones d'émergence simulées par les bilans de masse, ainsi qu'avec les zones d'émergences identifiées à l'aide de l'indice de connectivité. Sur le ruisseau des Vases et la rivière Sagouay, les contributions d'eau souterraine estimées à l'aide des bilans de masse représentent 3,5 et 11,5 % des débits retrouvés aux exutoires respectifs. Des zones d'émergences d'eau souterraine ont été identifiées à l'amont du ruisseau Lanthier et cette contribution d'eau souterraine représente 28 % du débit retrouvé à l'exutoire. Des zones d'émergence de l'eau

souterraine ont été identifiées sur la rivière à Simon, et la contribution d'eau souterraine estimée à l'aide du bilan représente 28,4 % du débit à l'exutoire.

Les traceurs naturels utilisés se sont avérés utiles pour quantifier les apports d'eau souterraine aux quatre cours d'eau étudiés. Pris individuellement, les traceurs ont chacun des limites et des avantages, il est donc pertinent d'en combiner plusieurs afin d'avoir une vision d'ensemble sur les différents paramètres qui entrent en jeu dans l'évaluation des zones d'émergence de l'eau souterraine sur les cours d'eau. Un indicateur simple reliant l'émergence de l'eau souterraine en cours d'eau et les paramètres géomorphologiques facilement disponibles a été développé. Cet indice tient compte de l'ordre de Strahler, de la pente et du type de dépôts associés aux segments de cours d'eau. Il s'agit d'un indice simple d'utilisation qui permet d'identifier aisément les zones d'émergence de l'eau souterraine sur les cours d'eau. L'indice n'est pas parfait et certaines valeurs aberrantes ont été mises en évidence lors de la comparaison avec les mesures *in situ*. Malgré quelques limitations associées au petit nombre de caractéristiques des tronçons prises en compte ou à la méthodologie de calibration des paramètres de l'indice, les résultats montrent que l'indice permet d'identifier relativement bien les zones d'émergence de l'eau souterraine à des échelles locales. Il peut facilement être déployé sur d'autres bassins versants ou à des échelles plus grandes.

Mots clés : Émergence d'eau souterraine, bassins versants amont, traceurs d'eau souterraine, bilan de masse, Laurentides (Québec)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'émergence d'eau souterraine dans les cours d'eau joue un rôle majeur en période d'étiage (Waseem et al., 2020). Cet apport est crucial pour la faune et la flore riveraine afin de préserver les conditions nécessaires à leur survie, telles qu'une température faible et stable, la présence d'eau à des périodes critiques de leur développement et l'apport en nutriments, mais également pour maintenir les débits en aval sur les cours d'eau qui servent parfois pour l'alimentation en eau potable (Perkin et al., 2017).

Partout dans le monde, la demande en eau augmente proportionnellement avec la population, ce qui entraîne une augmentation de la pression exercée sur l'eau souterraine et sur les milieux naturels qui en dépendent (Boretti et Rosa, 2019). Au cours de la décennie de 2010, l'eau souterraine pompée à travers le monde représentait un volume de 800 km³/an et il a été démontré que d'ici 2050, ce volume devrait atteindre 1100 km³/an (Wada et al., 2016). À ceci s'ajoutent les modifications au régime hydrologique induites par les changements climatiques, ceux-ci ayant un impact direct sur les débits de rivières partout dans le monde (Gudmundsson et al., 2021). Des travaux récents ont montré qu'entre 15 à 60 % de tous les cours d'eau du globe seraient déjà intermittents (Messenger et al., 2021). L'abaissement des niveaux de nappes phréatiques causé par l'augmentation des pompages anthropiques ainsi que les impacts des changements climatiques présents et futurs risquent d'intensifier les périodes d'intermittence de ces cours d'eau.

Au Canada, une importante quantité d'eau est prélevée annuellement des rivières, des lacs et des sources d'eau souterraine, que ce soit pour l'alimentation en eau potable, pour l'agriculture ou pour les différentes industries. En 2013, 9 % du volume total d'eau prélevée sur le territoire canadien a été consommé et n'a donc pas été retourné à sa source (ECCC, 2017). Dans la région des Laurentides au Québec, 33 stations d'alimentation en eau potable prenaient leur source dans les eaux de surface en 2007. Les régions de la Montérégie et les Laurentides sont les deux régions administratives qui comptent le plus de stations municipales alimentées en eau de surface (MELCCFP, 2017). Malgré le nombre de stations d'alimentations aménagées dans les eaux de

surface dans la région des Laurentides, près de 90 % des municipalités du Québec s'appuient sur l'eau souterraine pour leur alimentation en eau potable (RPEP, 2018).

Il est impératif d'assurer un suivi de la qualité et de la quantité de ressources en eau disponibles, autant pour l'eau de surface que pour l'eau souterraine. Les zones amont des bassins versants jouent un rôle important dans le soutien des étiages des cours d'eau (Kaule et Gilfedder, 2021), mais sont peu étudiées et peu protégées (Kelleher et al., 2015). Il est donc très important de mieux comprendre et de mieux cartographier les principales zones d'échange nappe-rivière afin de permettre une meilleure gestion de la ressource.

1.2 État des connaissances

1.2.1 Interactions eau de surface – eau souterraine

Bien que plusieurs données sur les interactions entre l'eau de surface et l'eau souterraine soient disponibles, les échanges entre l'eau de surface et l'eau souterraine sont encore méconnus (Döll et Fielder, 2008). Pour qu'il y ait un transfert d'eau entre les réservoirs souterrains et de surface, le substrat géologique à l'interface doit être perméable. Si c'est le cas, l'émergence d'eau souterraine dans une rivière se produit lorsque la charge piézométrique dans l'aquifère est supérieure au niveau de l'eau de surface. Dans le cas inverse, c'est la rivière qui alimente l'aquifère.

Les zones amont des grands bassins versants sont les portions de territoires situées sur des hauts topographiques et où les cours d'eau prennent leurs sources (en anglais *headwater basins*). Les hauts topographiques reçoivent généralement plus de précipitations dues aux effets orographiques des masses d'air et l'absence généralisée de dépôts imperméables en fait des zones propices à la recharge de l'eau souterraine (Tucker, 2005). Les portions amont des bassins versants sont caractérisées par des cours d'eau aux petits ordres de Strahler (1, 2 ou 3), qui alimentent les rivières aux ordres de Strahler plus élevés (4 et plus). Ces petits cours d'eau drainent le ruissellement sur le territoire amont et drainent aussi la nappe lorsqu'elle est près de la surface. En période d'étiage, il arrive que les cours d'eau des zones amont s'assèchent en raison de l'abaissement de la nappe, ils entrent alors dans la catégorie des cours d'eau intermittents. Le réseau hydrographique issu du LiDAR fait d'ailleurs la distinction entre les cours d'eau permanents et les cours d'eau intermittents (MRNF, 2021b). Ces régions sont donc plus vulnérables aux changements climatiques qui ont une

influence particulièrement importante sur les précipitations et les variations de niveaux de nappe dans les zones amont (Gudmundsson et al., 2021). Un abaissement de la nappe causé par une diminution de la recharge ou par l'augmentation de la pression exercée par les pompages pourrait causer plus d'intermittence des cours d'eau des zones amont (Messenger et al., 2021). Les cours d'eau des bassins versants amont contribuent au débit des rivières dans les régions situées en aval. Une perte de contribution de ces cours d'eau d'amont pourrait réduire le débit de base des rivières en aval où se trouve la majorité de la population.

Plusieurs auteurs (p.ex. : Neupane et al., 2015; Miller et al., 2016; Waseem et al., 2020) ont étudié l'hydrologie des zones amont de différents bassins versants et ont montré qu'il s'agit de régions importantes pour les échanges entre l'eau souterraine et l'eau de surface. Waseem et al. (2020) ont étudié la rivière Tollense en Allemagne. Le segment de rivière étudié est d'une longueur de 30 km et son bassin versant a une superficie d'environ 400 km². La topographie locale aux abords de la rivière est relativement plane et recouverte de dépôts glaciaires perméables. Les auteurs ont combiné les modèles SWAT et MIKE-SHE afin de simuler les interactions entre les réservoirs superficiels et souterrains sur ce bassin versant entre 2010 et 2018. Les résultats indiquent que l'eau souterraine représente entre 30 et 35 % du débit de base de la rivière Tollense durant la saison humide, et entre 35 et 45 % du débit de base durant la saison sèche (période d'étiage).

Miller et al. (2016) ont étudié le bassin versant amont de la rivière Colorado aux États-Unis (Utah, Wyoming et Colorado) à l'aide d'un bilan de masse de la conductivité spécifique comme traceur naturel de l'eau. L'élévation moyenne de ce bassin versant, d'une superficie de 280 000 km², est de 2087 m et son plus haut sommet atteint 3720 m. L'amont de ce grand bassin versant, situé en milieu alpin, comporte de hauts sommets et de grands dénivelés, reçoit beaucoup de précipitations annuelles et est caractérisé par des épaisseurs variables de dépôts meubles et un roc igné fracturé. L'aval du bassin versant est composé de roches sédimentaires de grès et de shales, et le climat est chaud et sec. Les auteurs ont adapté et modifié le modèle d'évaluation de la qualité de l'eau SPARROW afin d'évaluer la proportion du débit de la rivière qui est alimentée par l'eau souterraine, la distribution spatiale de la contribution de l'eau souterraine au débit total et les processus ayant un impact sur le volume d'eau souterraine perdu le long du cours d'eau. L'étude montre que les précipitations sont le principal facteur de contribution de l'eau souterraine aux cours d'eau du bassin versant de la rivière Colorado par le biais de la recharge. En moyenne, 56 % de

l'eau des rivières de ce bassin versant proviennent de l'émergence d'eau souterraine qui vient principalement des secteurs amont. L'étude souligne qu'une large proportion des apports d'eau souterraine provenant des zones amont est perdue d'amont en aval sur le cours d'eau dû à l'évaporation et aux pompages du cours d'eau pour l'irrigation ou la consommation humaine.

Neupane et al. (2015) ont étudié le bassin versant du ruisseau McDonald situé dans le Parc National des Glaciers aux États-Unis et dont la superficie est de 441 km². La portion amont du bassin versant présente des pentes abruptes, très peu de dépôts meubles et un roc composé de shale, de grès et de dolomies. L'aval du bassin versant est constitué d'une vallée glaciaire relativement plane sur laquelle des épaisseurs variables de tills sont déposées. Des pentes de plus de 45° sont retrouvées sur 37 % de la superficie du bassin versant. Les auteurs ont utilisé les débits, l'activité ²²²Rn, le $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^2\text{H}$ ainsi que des traceurs géochimiques d'ions majeurs (Ca, Na, Mg, SO₄, Cl, et NO₃) comme traceurs naturels de l'eau souterraine dans le cours d'eau. La rivière, ses tributaires et l'eau souterraine du bassin versant ont été échantillonnés durant la période d'étiage de 2013. Cette étude montre que, parmi tous les traceurs testés, seule l'activité ²²²Rn fournit assez d'information pour estimer la contribution de l'eau souterraine à la rivière. Les auteurs mentionnent qu'il est possible de retrouver des activités ²²²Rn ponctuelles très élevées et indicatrices d'une émergence locale d'eau souterraine, mais que les cascades et la présence de remous peuvent également résulter en une sous-estimation de l'activité ²²²Rn en raison au dégazage.

1.2.2 Traceurs naturels et artificiels

Les traceurs artificiels et naturels sont parmi les méthodes les plus courantes pour identifier l'apport d'eau souterraine aux cours d'eau. Afin de choisir un traceur naturel efficace, il est impératif de prendre en compte le contexte géologique de la zone d'étude ciblée, de pouvoir mesurer sa présence dans l'eau, et de connaître les processus qui pourraient exercer une influence sur sa concentration ou son activité (Moreira, 2016). Les traceurs artificiels sont surtout utilisés afin de caractériser les systèmes hydrogéologiques (p. ex. : circulation de l'eau souterraine, porosité, dispersivité du milieu) et identifier les transferts de polluants entre les aquifères et l'eau de surface (Leibundgut et Seibert, 2011). Les traceurs fluorescents sont les plus utilisés, mais les traceurs salins sont aussi utilisés comme des traceurs complémentaires pour des études multitraçages, même si leur présence naturelle dans les eaux peut les rendre moins efficaces (CETRAHE et BRGM, 2019). De récentes

études impliquent l'injection dans l'eau souterraine de gaz inertes, comme l'argon (Moreira, 2016) ou le SF₆ (Cook et al. 2003, 2006; Gleeson et al., 2018). L'utilisation d'un seul traceur est suffisante pour estimer l'émergence d'eau souterraine, cependant la combinaison de plusieurs traceurs peut permettre d'en augmenter la précision, d'identifier des sources multiples d'eau souterraine, ou encore d'évaluer un facteur extérieur tel que le dégazage vers l'atmosphère qui affecterait le premier traceur (Cook, 2012).

Radon-222

Le radon est un gaz rare (inerte) possédant trois isotopes naturels radioactifs : ²¹⁹Rn, ²²⁰Rn et ²²²Rn. Le ²²²Rn a le temps de demi-vie le plus long de 3,82 jours et est produit par la désintégration radioactive du ²²⁶Ra dans la chaîne de désintégration radioactive de l'uranium 238. L'uranium est un élément présent naturellement dans tous les types de roches, mais sa teneur est plus élevée dans les roches granitiques et métamorphiques (Tanner, 1980). Le radon est retrouvé dans des ordres de grandeur 2 à 3 fois plus élevés dans l'eau souterraine que dans l'eau de surface et est considéré à l'équilibre séculaire avec le ²²⁶Ra, après un temps de séjour dans l'aquifère de 25 jours (Pinti et al., 2014). Pour cette raison, le ²²²Rn est utilisé pour tracer l'émergence de l'eau souterraine dans les eaux de surface (Cook et al., 2006; Stellato et al., 2008). Une fois dans l'eau de surface, le ²²²Rn continue de se désintégrer par radioactivité et une part importante est perdue dans l'atmosphère par le dégazage engendré par la turbulence des eaux. La profondeur et la géométrie de la rivière ainsi que la présence d'obstacles dans le lit de la rivière ont un impact sur l'intensité des remous provoquant le dégazage du radon. La pente joue aussi un rôle important sur le taux de dégazage qui peut varier 1 à 10 m/j pour des gradients allant de < 1 ‰ à > 1 ‰ (Cook et al., 2003; 2006; 2012).

Cook et al. (2006; 2012) et Lefebvre (2015) ont utilisé l'activité en ²²²Rn, les mesures de débits et les mesures de conductivités électriques sur des échantillons provenant de portions de cours d'eau afin de quantifier les apports en eau souterraine dans différents contextes. Cette méthode a également été testée avec succès par Moreira (2016) sur la rivière à la Raquette (région de Vaudreuil-Soulanges) ainsi que sur des affluents de la rivière Nicolet (région du Centre-du-Québec). Afin de quantifier le taux de dégazage du radon dans les rivières étudiées, Moreira (2016) a testé un traçage à l'aide d'injections d'argon, mais le traçage n'a pas été concluant. Yang et al.

(2020) ont utilisé une méthode similaire pour évaluer la contribution de l'eau souterraine avec la rivière Kui et le lac Yunlong en Chine. D'autres auteurs ont couplé l'utilisation du ^{222}Rn comme traceur avec certains ions majeurs (Cl, Na et Ca) afin d'estimer la quantité d'eau souterraine contribuant au débit de base de la rivière Murray à Victoria en Australie (Cartwright et al., 2011). Des méthodes quantitatives ont été développées afin de déterminer la contribution de l'eau souterraine dans les rivières à l'aide du ^{222}Rn , par exemple le calculateur de bilan de masse radon Radin14 (Cook et al., 2003; 2006; 2012), les équations simples (Neupane et al., 2015) et le modèle numérique FINIFLUX (Frei et Gilfedder, 2015; Schubert et al., 2020).

Gleeson et al. (2018) ont effectué des mesures de ^{222}Rn , d'isotopes stables de l'eau, de chlorofluorocarbone, de conductivité électrique et de température de l'eau, en plus d'injecter le SF_6 comme traceur pour identifier le taux de dégazage du radon afin d'obtenir un modèle fiable du ruisseau Sagehen situé dans les montagnes du Sierra Nevada en Californie. Ce petit bassin versant amont d'une superficie de 27 km^2 est situé dans une ancienne vallée glaciaire où les dépôts perméables et le roc composé d'andésite et de basalte se côtoient. Les résultats obtenus ont été traités dans le calculateur Radin14 et ont permis d'estimer que l'apport d'eau souterraine au ruisseau est entre 2 et 22 % du débit à l'exutoire. Les résultats du bilan de masse réalisé en ne tenant compte que de l'activité ^{222}Rn ont été comparés avec les résultats du bilan de masse tenant compte de l'activité ^{222}Rn et des isotopes stables de l'eau et il a été conclu que les émergences d'eau souterraine calculées à l'aide des deux méthodes sont comparables. Les auteurs soulignent également que le débit est suffisant pour estimer un taux de dégazage étant donné la relation qui existe entre le débit et la turbulence. L'étude montre qu'il est possible d'utiliser les isotopes stables de l'eau comme traceur dans le bilan de masse Radin14 et que le taux de dégazage n'empêche pas d'utiliser le ^{222}Rn et les isotopes stables de l'eau sur des rivières aux pentes supérieures à 1 %.

L'utilisation du ^{222}Rn comme traceur de l'eau souterraine dans l'eau de surface est une méthode courante, mais limitée en raison des différents facteurs qui peuvent affecter les concentrations mesurées. Par exemple, l'hétérogénéité des concentrations en ^{222}Rn dans l'eau souterraine, les taux de dégazage difficiles à quantifier (Ntona et al., 2022), ainsi que la production de ^{222}Rn dans les sédiments (Rodellas et al., 2021; Peel et al., 2022) sont souvent difficiles à quantifier et introduisent des incertitudes non négligeables dans l'estimation des échanges eau souterraine – eau de surface.

Isotopes stables de l'eau

Depuis plusieurs décennies, les isotopes stables de l'eau sont utilisés afin de comprendre différents processus hydrologiques (Vreca et Kern, 2020). Les précipitations ont des signatures isotopiques différentes selon les saisons en raison des températures et du déplacement des masses d'air (Dansgaard, 1964). Au Québec, la composition en isotopes stables de l'eau de surface des cours d'eau suit d'assez près la courbe météorique, tandis que celle de l'eau souterraine, qui est principalement renouvelée à partir de la recharge printanière, est généralement appauvrie en $\delta^2\text{H}$ et en $\delta^{18}\text{O}$ comparativement à celle des précipitations estivales. Cette distinction permet d'identifier des segments de cours d'eau alimentés par l'eau souterraine à l'aide des compositions isotopiques de l'eau mesurée d'amont en aval sur un cours d'eau (Tetzlaff et Soulsby, 2008).

Peralta-Tapia et al. (2015) ont combiné les isotopes stables de l'eau avec des traceurs géochimiques (Ca, Mg, K et Na) afin d'étudier la contribution de l'eau souterraine au débit de base hivernal de la rivière Krycklan au nord de la Suisse (68 km²) et d'évaluer la variation de cette contribution en fonction de la taille du sous-bassin. Ce bassin versant est dominé par les forêts de conifères et les milieux humides (10 %) et est recouvert de dépôts de tills et de roc granitique affleurant. Les auteurs ont utilisé une équation de mélange à deux composantes afin de calculer les contributions d'eau souterraine sur les cours d'eau du bassin versant, tout en tenant compte de paramètres géomorphologiques tels que la superficie de drainage amont à un segment de cours d'eau, les pentes, ainsi que de la présence de milieux humides et de lacs. Les résultats montrent que la contribution de l'eau souterraine en rivière augmente de manière non linéaire avec la surface de drainage, avec un seuil de contribution de 70 à 80 % pour les bassins versants dont la superficie est supérieure à 10,6 km².

Tetzlaff et Soulsby (2008) ont utilisé les isotopes stables de l'eau ainsi que les ions et anions majeurs afin de tracer l'émergence de l'eau souterraine sur le bassin versant de la rivière Dee en Écosse (1849 km²). 60 % de l'ensemble de son territoire est caractérisé par des montagnes granitiques aux pentes importantes et des reliefs moins importants sont caractérisés par une géologie de nature sédimentaire métamorphisée. Des dépôts fluvio-glaciaires perméables d'épaisseur variables sont retrouvés dans les vallées et du till couvre les pentes moins abruptes à la jonction des vallées et des montagnes. Les résultats montrent que l'eau souterraine qui émerge à

l'amont du bassin versant joue un rôle important dans le maintien du débit retrouvé à l'exutoire du bassin versant et que l'eau souterraine provient majoritairement des pentes moins abruptes retrouvées à la jonction entre les régions montagneuses et les vallées. Les variations des résultats de traceurs d'eau souterraine sont moins importantes sur les bassins versants dont la superficie est supérieure à 250 km².

1.2.3 Indicateurs de connectivité surface-souterrain

Les méthodes par indices, comme celle de l'indice DRASTIC (Aller et al., 1987) pour estimer la vulnérabilité de l'eau souterraine à une pollution située à la surface, sont d'usage courant et très répandu en hydrogéologie. À titre d'exemple, DRASTIC tient compte de la profondeur de la nappe, de la recharge, des matériaux aquifères, du type de sol, de la pente, de la zone non saturée et de la conductivité hydraulique de l'aquifère pour estimer un indice dont la valeur varie de 23 à 226. L'indice est facile à calculer, car les données sont généralement disponibles et il peut être aisément cartographié pour un territoire donné. Les méthodes par indices sont simples à utiliser, mais ne sont pas très répandues dans d'autres domaines de l'hydrogéologie que celui de la vulnérabilité des nappes à la pollution.

Isokangas et al. (2019) ont comparé les rivières Siirasoja, Lohioja et Oulujoki situées à l'amont des bassins versants associés aux eskers Rokua et Viinivaara en Finlande afin d'identifier les zones d'émergence de l'eau souterraine. Le bassin versant de l'esker Rokua, d'une superficie de 92 km², est composé de sédiments postglaciaires de sables et graviers, bordé par des tourbières. La portion du territoire de l'esker est relativement plane et retrouvée à une élévation de 30 à 40 m plus élevée que la portion tourbeuse qui la longe. L'utilisation du territoire est majoritairement liée à l'exploitation forestière dans les tourbières, tandis qu'une faible portion du territoire est agricole. Le bassin versant de l'esker Viinivaara a une plus petite superficie (15 km²) et il est recouvert de sable et de tourbières. Les auteurs ont réalisé des mesures continues de débits sur les trois rivières et ont analysé les compositions isotopiques de l'eau, les paramètres physicochimiques de l'eau, ainsi que le chlore et la silice. Les auteurs proposent une méthode par indices nommée *Stream tracer index method*, basée sur la composition isotopique de l'eau, le débit, la température et la qualité de l'eau. La gamme de valeurs possibles a été discrétisée en trois catégories soit 1) dominé par l'eau souterraine ($S_i > 50\%$), 2) mélange égal entre l'eau souterraine et l'eau de surface ($S_i =$

50 %) et 3) dominé par l'eau de surface ($S_i < 50 \%$). Les auteurs montrent avec cet indice que 33 % à 94 % du débit de base des trois rivières proviennent de l'eau souterraine et qu'il pourrait être suffisant d'effectuer l'échantillonnage des sections de cours d'eau une seule fois, durant la période d'étiage, afin de représenter l'apport d'eau souterraine aux rivières durant l'année hydrologique. Cette méthode a été développée afin de représenter les émergences d'eau souterraine sur les bassins versants amont et sa simplicité est un grand avantage. L'indice peut être adapté en fonction des contextes étudiés lors du choix de traceurs géochimiques.

1.3 Objectifs du mémoire

Le but de ce projet de maîtrise est de mieux comprendre l'émergence de l'eau souterraine dans les portions amont des cours d'eau. Les objectifs spécifiques sont 1) d'identifier *in situ* les zones d'émergence sur les secteurs amont de quatre bassins versants, 2) de quantifier par bilan de masse l'apport d'eau souterraine en étiage à ces cours d'eau et 3) de lier l'émergence d'eau souterraine à des facteurs géomorphologiques.

Les hypothèses sous-jacentes à la démarche scientifique sont 1) que les cours d'eau aux petits ordres de Strahler situés en amont des bassins versants sont alimentés en eau souterraine, 2) que le ^{222}Rn est un bon traceur de l'apport d'eau souterraine dans les portions amont des bassins versants et 3) que la géologie et la pente du cours d'eau jouent un rôle important pour l'émergence de l'eau souterraine dans les portions amont des cours d'eau.

Ce mémoire présente d'abord les contextes hydrogéologiques et hydrométéorologiques ainsi que la géologie régionale des quatre bassins versants étudiés au Chapitre 2.3. La méthodologie utilisée est abordée au Chapitre 3 et tous les résultats sont présentés au Chapitre 4. La discussion et la conclusion sont présentées aux chapitres 5 et 6 respectivement.

Ce projet de maîtrise a été réalisé dans le cadre du Projet d'acquisition de connaissances des eaux souterraines dans la région des Laurentides et de la MRC les Moulins (PACES-LAULM) mené par l'équipe de la professeure Marie Larocque à l'UQAM (2018-2022), grâce à un financement du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Le projet de maîtrise a également été financé par le programme Mitacs Accélération, en partenariat avec les MRC d'Argenteuil, de la rivière du Nord, des Laurentides,

Les Moulins, des Pays-d'en-Haut et d'Antoine-Labelle, avec la participation des organismes de bassin versant Abrinord (rivière du Nord), RPNS (rivières Rouge, Petite Nation et au Saumon) et COBALI (rivière du Lièvre). Les résultats ont été présentés par affiches lors du congrès des étudiants du Geotop à l'hiver 2021 (Dubois et Larocque, 2021) ainsi qu'au congrès RHQ22 qui a eu lieu à Québec en mai 2022 (Dubois, Larocque et Gagné, 2022).

CHAPITRE 2

ZONE D'ÉTUDE

Dans ce chapitre, la région d'étude et les bassins versants étudiés sont d'abord présentés. La topographie, l'occupation du territoire et la géologie sont décrites, suivies des conditions hydrologiques et hydrogéologiques et des conditions climatiques.

2.1 Région d'étude et bassins versants étudiés

Dans ce projet de maîtrise, quatre sous-bassins versants ont été étudiés (Figure 1), soit ceux de la rivière à Simon, du ruisseau des Vases, de la rivière Saguay et du ruisseau Lanthier. Le choix des bassins versants étudiés a été basé sur des critères précis. Les sous-bassins versants sélectionnés devaient être des bassins versants situés en amont d'un grand bassin versant de la région et avoir plusieurs tributaires de petits ordres de Strahler. Les quatre bassins étudiés ont été sélectionnés en tenant compte de leur hydrologie (Tableau 1) de manière à ce qu'ils aient une superficie, une longueur du tronçon principal, et des ordres de Strahler variables. La géologie et l'hydrogéologie des quatre bassins versants (Tableau 2) ont été comparées, ainsi que la morphologie des rivières étudiées (Tableau 3). La localisation géographique des bassins versants dans la région des Laurentides a également été prise en compte afin de pouvoir comparer deux bassins situés plus au sud (Vases et Simon), ainsi que deux bassins plus au nord (Saguay et Lanthier).

Tableau 1 : Hydrologie des bassins versants étudiés (GRHQ, 2021)

BV	Tributaire au BV	Forme du réseau hydrologique	Longueur du tronçon (km)	Nombre de tributaires	Ordres du tronçon	Ordres des tributaires
Vases	de l'Ouest	Rectangulaire	13	13	3	1 et 2
Simon	du Nord	Parallèle	30	21	4 et 5	1 à 3
Saguay	Rouge	Dendritique	9	19	3 et 4	1 à 3
Lanthier	du Lièvre	Radial	11	15	3 et 4	2

Tableau 2 : Géologie et hydrogéologie des bassins versants étudiés.

BV	Superficie (km²)¹	Gradient de pente (%)²	Type de nappe³	Géologie dominante⁴	Dépôts quaternaires dominants⁴	Occupation du territoire dominante³
Vases	63,5	0,23	Libre, semi-captive et captive	Amont : syénite, monzonite, monzodiorite, granite et carbonatites Aval : dolomie, grès, calcaire et shale	MGa, MGb, Tm, Tc, Gs, Cg, O	Agricole
Simon	165,7	0,91	Libre	Anorthosite, marbre, dolomie, schiste et quartzite	Tm, Tc, Gx, O, L	Villégiature
Saguay	147,3	0,68	Libre	Paragneiss, gneiss et marbre	Tm, Tc, Go, Gx, MGd, Ed, O	Foresterie et carrières
Lanthier	56	0,45	Libre, semi-captive et captive	Paragneiss, migmatite, marbre, dolomie, schiste et quartzite	LGa, LGb, Gx, Tm, Tc, O	Agricole

Tableau 3 : Morphologie des rivières étudiées.

BV	Altitude (m)²			Largeur du tronçon (m)⁵			Profondeur du tronçon (m)⁵			Gradient de pente (%)³		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
Vases	80	230	155	1,8	7,0	3,6	0,01	7,00	0,64	0,0	7,0	0,23
Simon	155	360	258	3,2	18,0	8,5	0,01	1,80	0,49	0,3	1,3	0,91
Saguay	255	265	260	6	10,0	7,9	0,01	1,1	0,76	0,0	1,0	0,68
Lanthier	210	375	293	1,5	5,5	3,1	0,01	0,5	0,25	0,0	2,5	0,45

¹ GRHQ (2021)

² MRNF (2021b)

³ Gagné et al. (2022)

⁴ MRNF (2021a)

⁵ Mesure manuelle sur le terrain en 2021

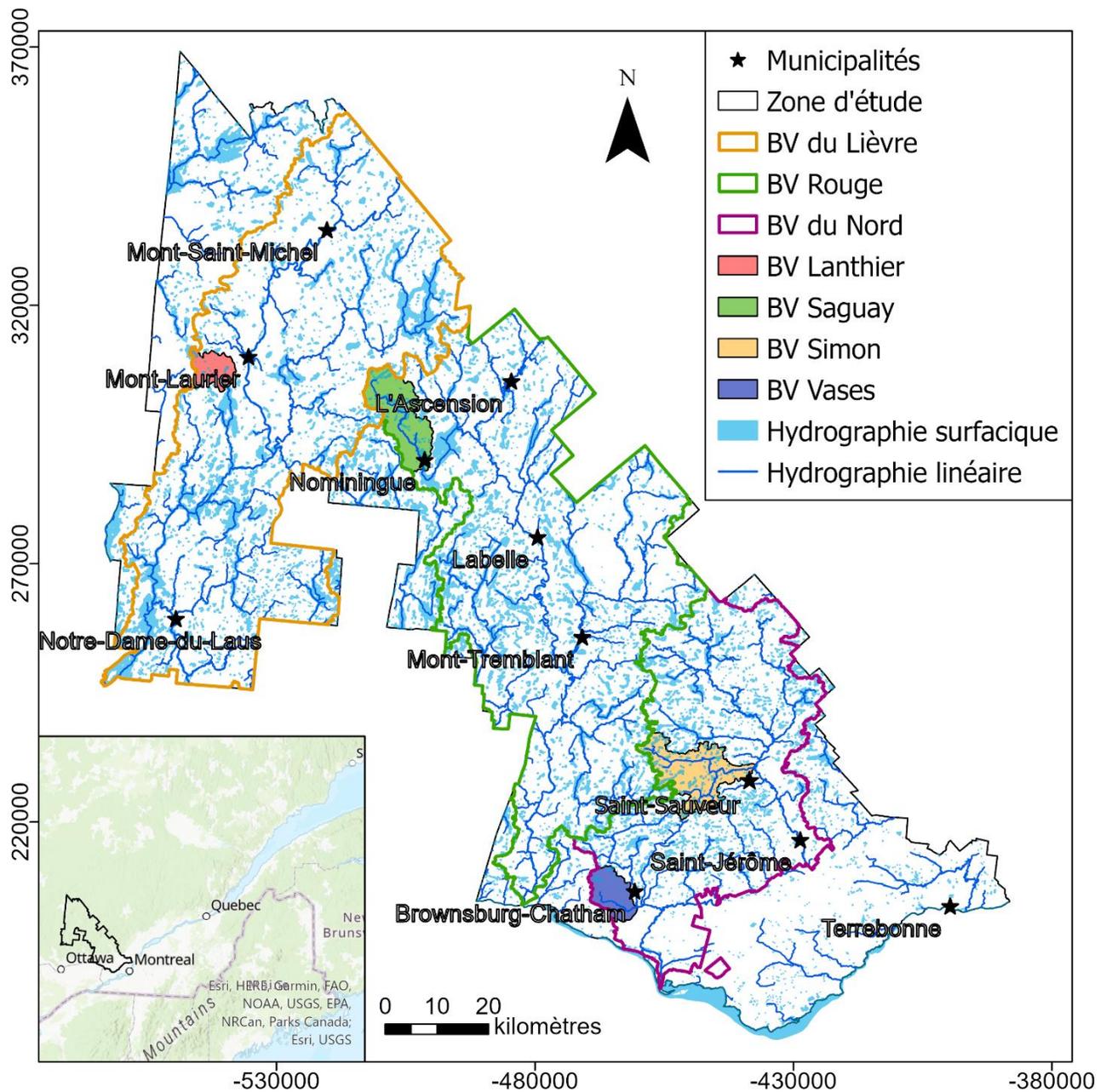


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des bassins versants étudiés.

2.2 Topographie, occupation du territoire et géologie

2.2.1 Conditions générales

La zone d'étude peut être séparée en deux zones distinctes, qui sont respectivement représentées par les Basses-Terres du Saint-Laurent à la géologie d'origine sédimentaire au sud et par le Bouclier canadien granitique plus au nord (Figure 56 en annexe). Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont marquées par une topographie plane, jusqu'à environ 25 km dans les terres au nord de l'île de Montréal (Gagné et al., 2022). À cet endroit commence le Bouclier canadien caractérisé par une alternance de sommets et de vallées (Figure 54 et 55 en annexe). Le Mont-Tremblant en est le sommet le plus élevé, avec une altitude de 930 m. L'occupation du territoire de la région étudiée (Figure 63 en annexe) est composée à 70 % de zones forestières. 9 % du territoire est occupé par les zones aquatiques, alors que les zones anthropiques et agricoles occupent respectivement 8 % et 7 % du territoire. Les milieux humides représentent 5 % de la zone d'étude. Le pourcentage restant est occupé par les milieux en coupes et régénération ainsi qu'en sols nus et landes (Gagné et al., 2022).

2.2.2 Ruisseau des Vases

La portion amont du ruisseau des Vases ainsi que la plupart de ses tributaires s'écoulent sur le roc grenvillien, alors que sa portion aval s'écoule sur des sédiments silteux à argileux (MGa et MGb) déposés sur la formation des Basses-Terres du Saint-Laurent (Figure 66). La topographie du territoire (Figure 2) a joué un rôle important lorsque le territoire fut envahi par la mer de Champlain à la suite de la dernière grande déglaciation il y a environ 13,1-13,3 ka (Ochietti et Richard, 2003.). L'amont du bassin versant atteint les 230 m d'altitude, tandis que la plaine de sédiments fins se retrouve à 80 m d'altitude.

Les épaisseurs de dépôts MGa atteignent jusqu'à 70 m d'épaisseur à l'exutoire du bassin versant (Gagné et al., 2022). Ces dépôts (Figure 3) sont propices à l'agriculture, la région est connue pour sa production laitière et ses cultures de soja, entre autres. L'occupation de ce territoire est majoritairement agricole, avec quelques zones résidentielles. En 2018, une déstabilisation de ces argiles sensibles a engendré un glissement de terrain de plus de 1 km de longueur le long du ruisseau (Bergeron, 2018). Cette zone est bien représentée par les dépôts de glissement de terrain

(Cg). La portion amont du bassin versant est plutôt caractérisée par de petites épaisseurs de till mince et continu, ainsi que de dépôts glaciomarins littoraux (MGb) et deltaïques (MGd).

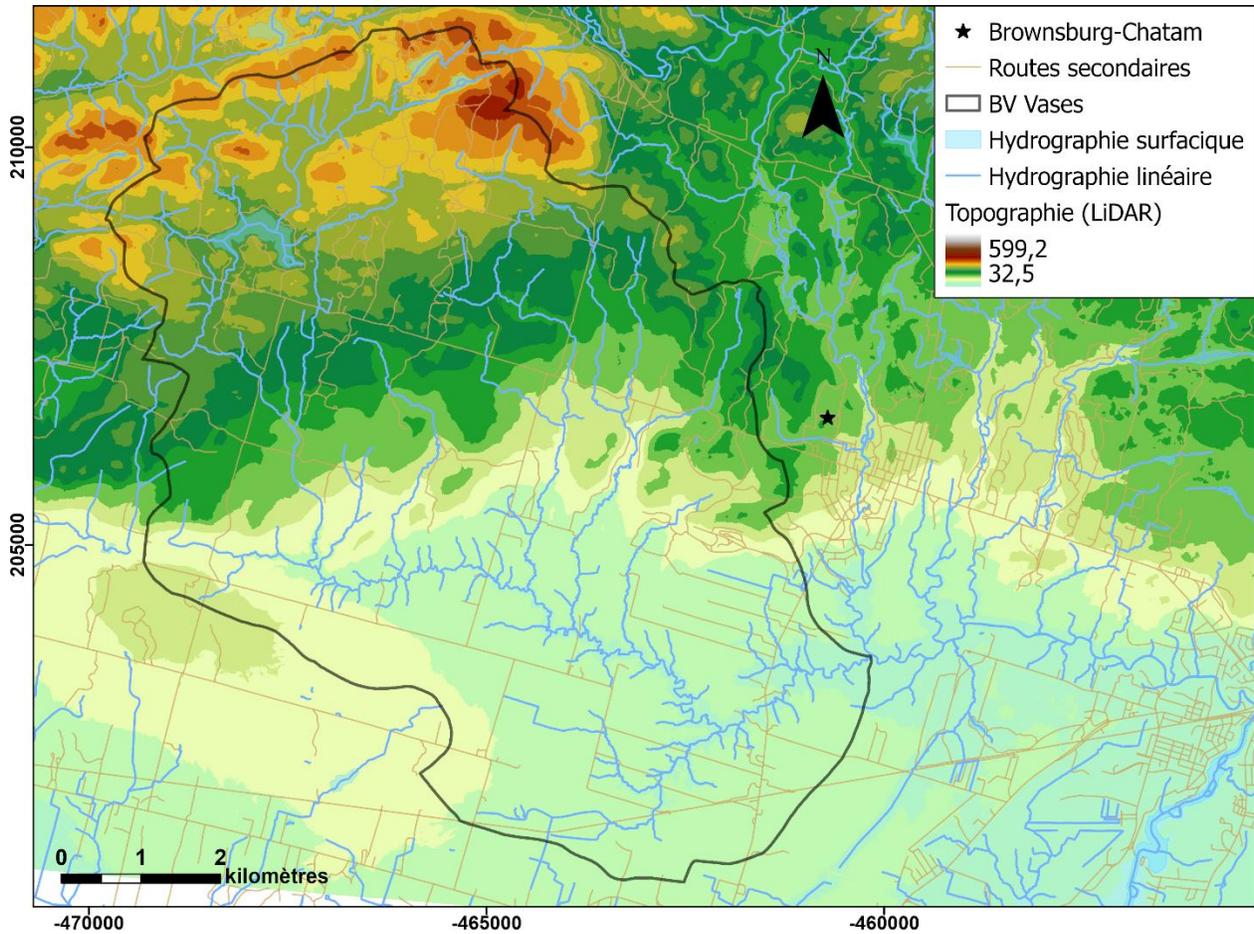


Figure 2 : Topographie du bassin versant du ruisseau des Vases (MRNF, 2021b).

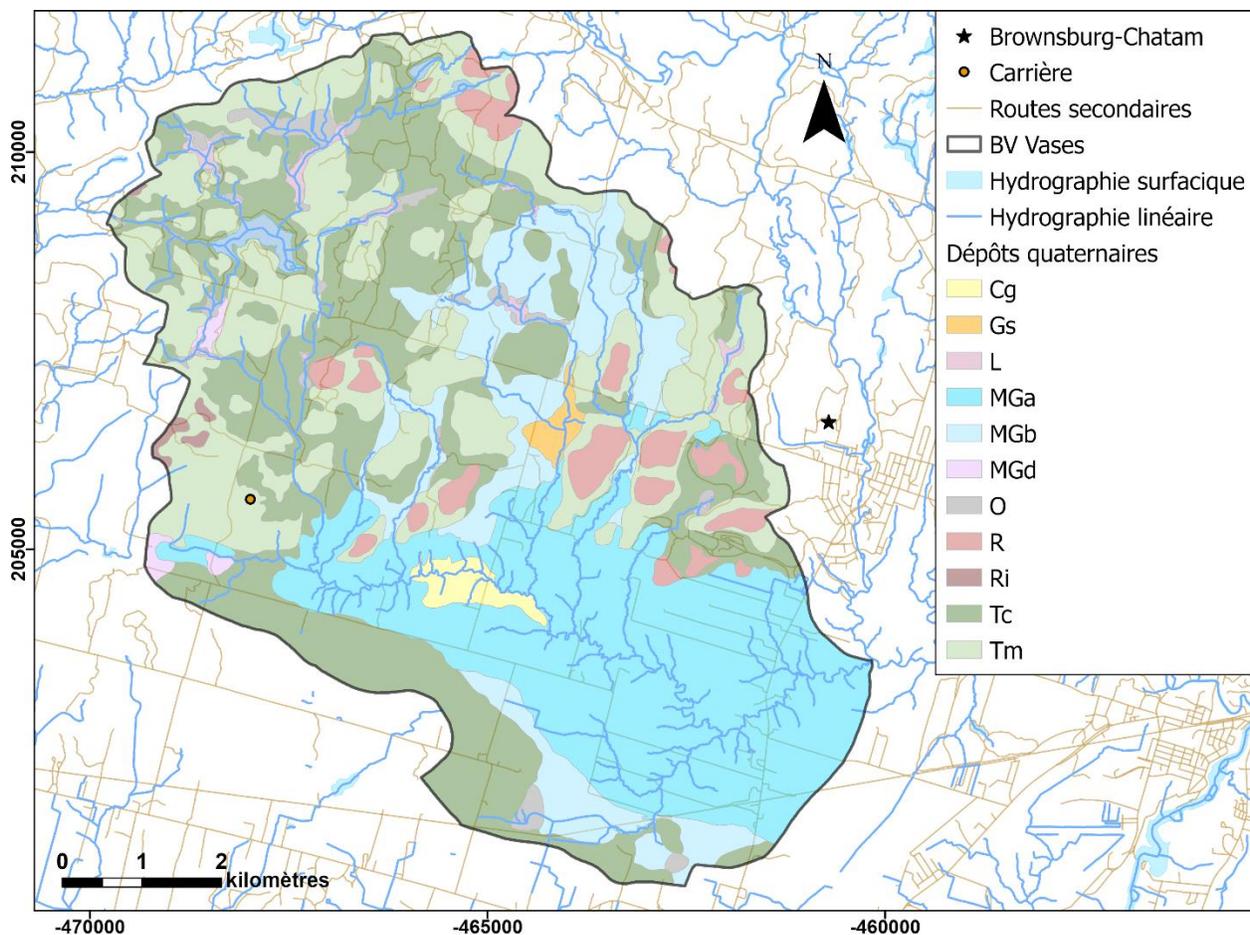


Figure 3 : Dépôts quaternaires du bassin versant du ruisseau des Vases (MRNF, 2021a).

2.2.3 Rivière à Simon

La géologie du bassin versant (Figure 67 en annexe) est généralement composée du roc fracturé grenvillien tandis que la portion amont de la rivière s'écoule majoritairement sur l'anorthosite de la suite AMCG de Morin (Corriveau et al., 1998). Dans la portion en aval du bassin se trouvent des roches sédimentaires de marbre, dolomie, schiste et quartzite. Un premier tributaire majeur de la rivière à Simon (rivière Chevreuil) qui s'écoule du centre ouest du bassin versant vers son centre, s'écoule sur la formation de gneiss ainsi que sur l'anorthosite de Morin. Le second tributaire majeur de la rivière à Simon (ruisseau Jackson), qui s'écoule de la portion sud vers le centre du bassin versant, s'écoule sur la formation de granitoïdes par endroits et sur la formation de marbres, dolomie schiste et quartzite à d'autres. La topographie du territoire est marquée avec la portion amont du bassin versant à environ 360 m d'altitude et la portion aval à une altitude de 155 m (Figure 4).

Les dépôts quaternaires (Figure 5) sont plutôt minces sur l'ensemble du bassin versant et n'atteignent que quelques mètres d'épaisseur par endroits (Gagné et al., 2022). Ils sont composés de tills minces (Tm) et continus (Tc), de matière organique (O), d'alluvions récentes (Ax) et anciennes (At) ainsi que de quelques zones de sédiments juxtaglaciaires (Gx). L'occupation du territoire du bassin versant est majoritairement urbaine et comporte quelques zones d'agroforesterie dans la portion amont.

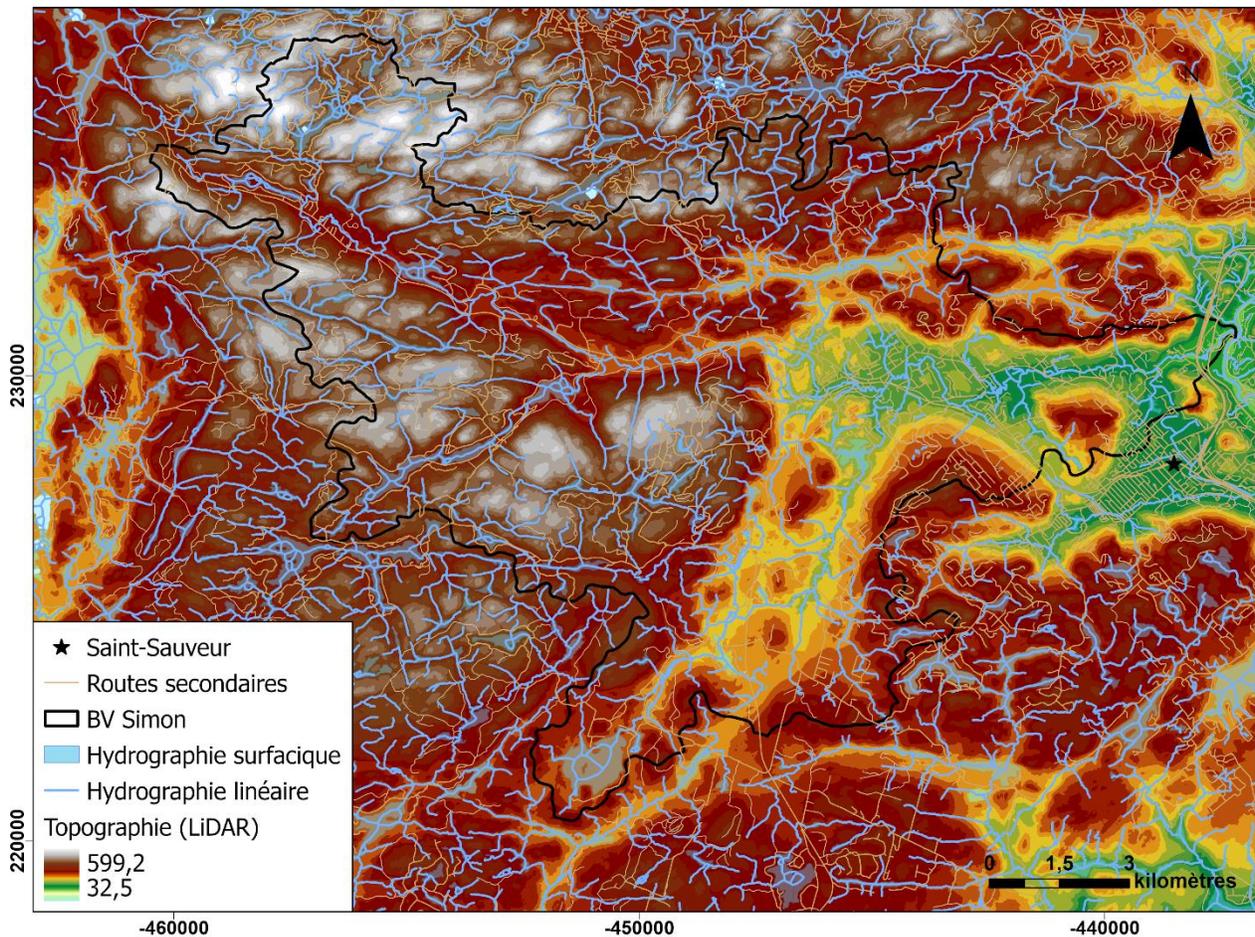


Figure 4 : Topographie du bassin versant de la rivière à Simon (MRNF, 2021b).

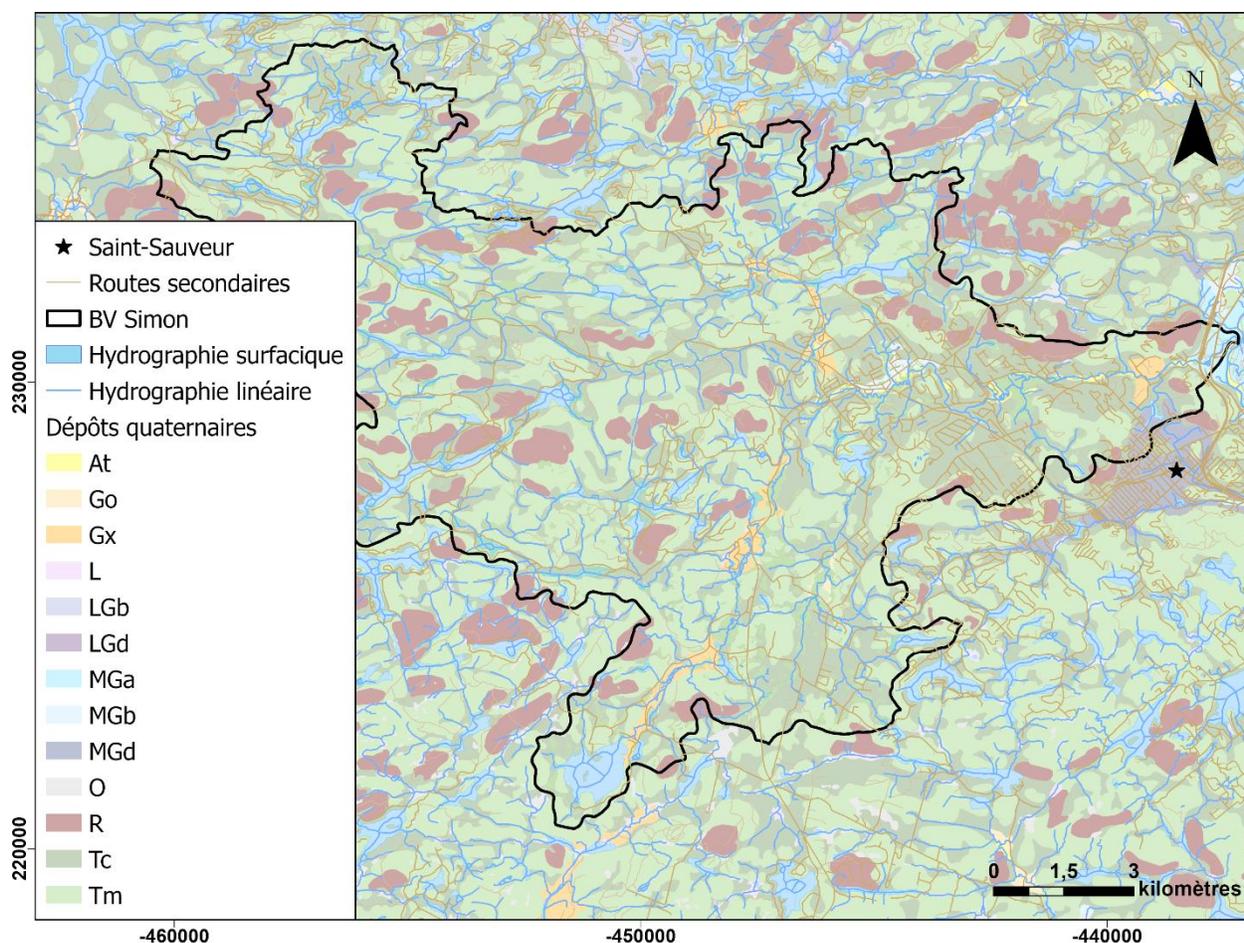


Figure 5 : Dépôts quaternaires du bassin versant de la rivière à Simon (MRNF, 2021a).

2.2.4 Rivière Sagouay

Le roc de la zone située en aval sur le bassin versant de la rivière Sagouay est majoritairement composé de gabbro. Une petite portion de la zone amont est composée de paragneiss, gneiss et marbre (Figure 68). La rivière s'écoule sur des unités de till mince (Tm) et continu (Tc), ainsi que sur des sédiments juxta glaciaires (Gx), deltaïques (MGd), éoliens (Ed) et d'épandage pro-glaciaire subaérien (Go) et les sédiments sont principalement composés de sables fins à grossiers (Figure 6). Les unités de sédiments atteignent jusqu'à 40 m d'épaisseur par endroit. Une carrière exploite les sédiments juxtaglaciaires à l'est de la rivière.

L'utilisation de ce territoire est majoritairement résidentielle et forestière, mais la densité de population est très peu élevée. Une petite portion du territoire est zonée agricole en aval du bassin versant. La vallée remplie par les dépôts sédimentaires constitue un territoire assez plat pour

l'ensemble du bassin versant. L'amont du bassin versant se situe à environ 265 m d'altitude, alors que sa portion aval est à 255 m d'altitude (Figure 7).

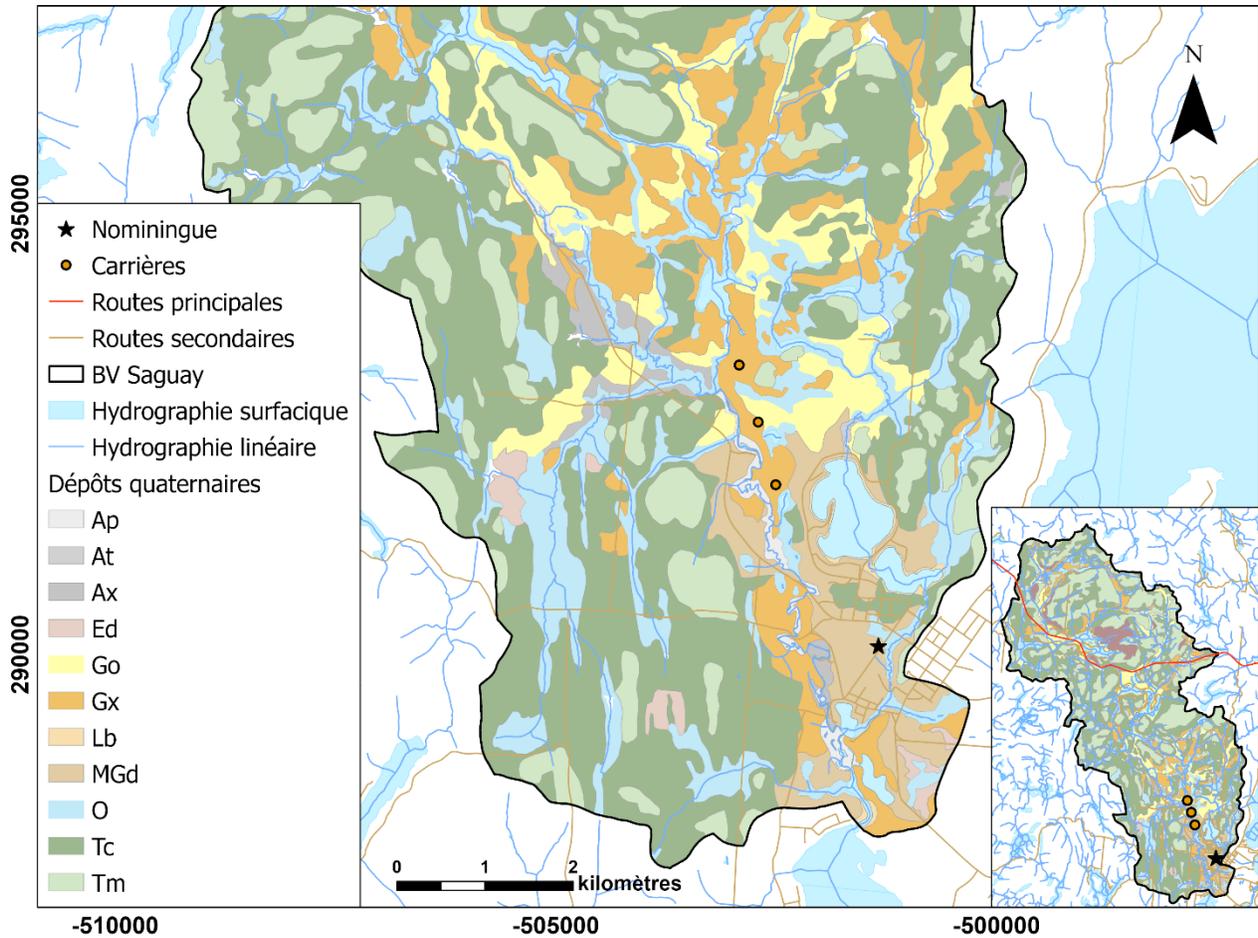


Figure 6 : Dépôts quaternaires du bassin versant de la rivière Sagway (MRNF, 2021a).

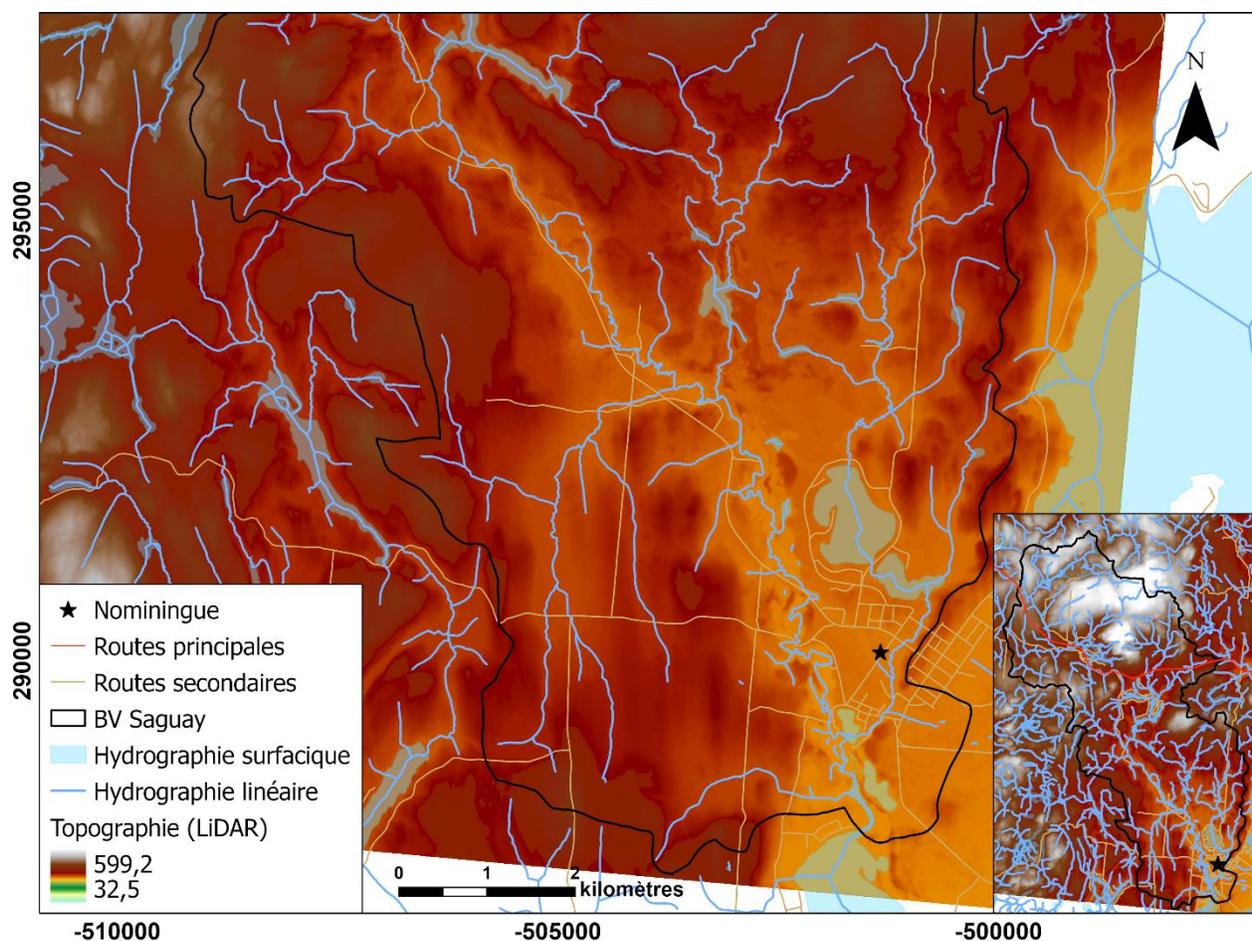


Figure 7 : Topographie du bassin versant de la rivière Sagway (MRNF, 2021b).

2.2.5 Ruisseau Lanthier

La géologie de ce bassin versant inclut du paragneiss, de la migmatite et des marbres, des dolomies, du schiste et du quartzite (Figure 69). Le tronçon principal du ruisseau s'écoule sur des unités de sédiments juxtaglaciaires (Gx) de till mince (Tm) et continu (Tc) dans la portion amont, puis sur des sédiments fins juxtaglaciaires (LGb) et glaciolacustres (LGa) dans la portion aval (Figure 8). Ces dépôts présents à l'aval du bassin versant ont une épaisseur variable de 5 à 14 m.

L'amont du bassin versant se situe à une altitude de 375 m, tandis que l'aval se trouve à 210 m d'altitude (Figure 9). Une observation de la topographie régionale issue du LiDAR semble indiquer qu'il y ait eu un ancien lac glaciaire en forme de doigts issu de la dernière grande déglaciation, expliquant la présence de dépôts LGa et LGb à une aussi haute altitude. Ces dépôts forment des

sols riches et imperméables ce qui explique l'occupation de ce territoire qui est consacrée à l'agriculture et à la foresterie.

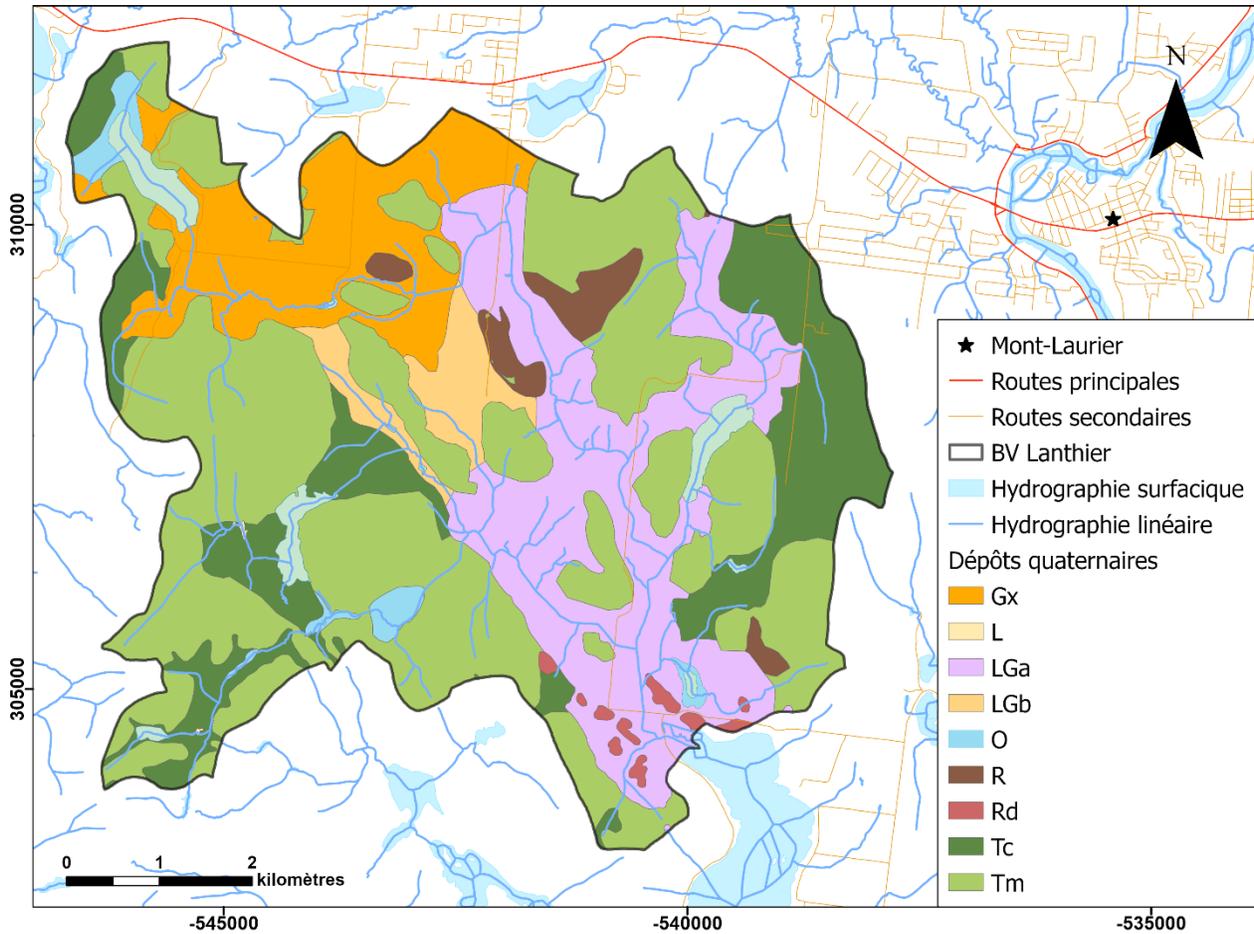


Figure 8 : Dépôts quaternaires du bassin versant du ruisseau Lanthier (MRNF, 2021a).

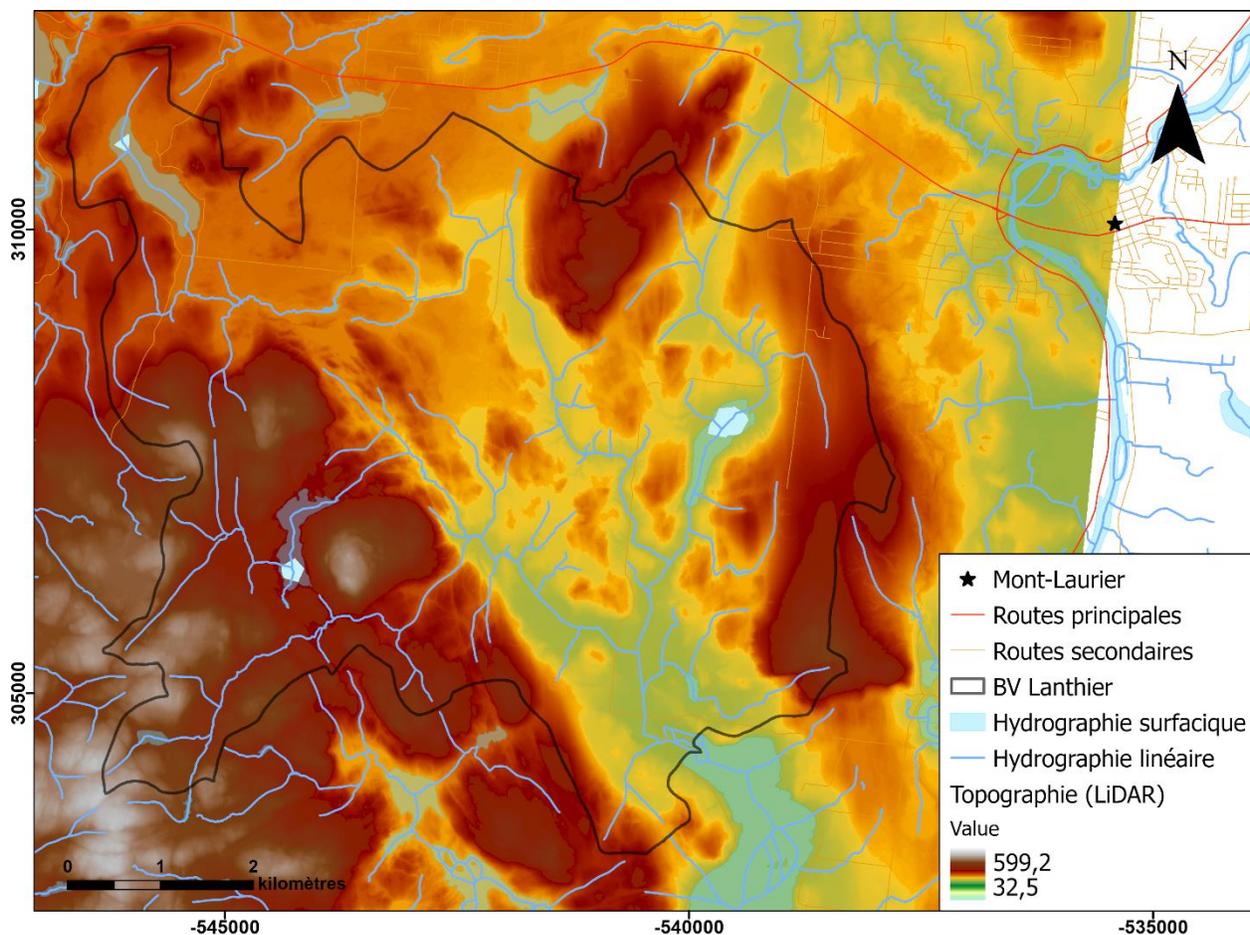


Figure 9 : Topographie du bassin versant du ruisseau Lanthier (MRNF, 2021b).

2.3 Hydrogéologie

2.3.1 Piézométrie et niveau de confinement

Une carte piézométrique de la région (Figure 60 en annexe) a été présentée dans le cadre du rapport final du projet PACES-LAULM (Gagné et al., 2022). Les niveaux piézométriques varient d'une altitude maximale de 920 m à une altitude minimale de moins de 50 m, respectivement sur les plus hauts sommets situés dans la région du Parc national du Mont-Tremblant et la municipalité de Val-des-Lacs, et près de la rivière des Mille-Îles et des Outaouais (Gagné et al. 2022). Les directions d'écoulement sont variables sur le territoire selon la quantité de déformation et de fractures présentes, mais s'orientent des hauts topographiques vers les bas topographiques. Les écoulements se font selon une orientation est-ouest ou ouest-est dans la majorité des cas et la profondeur moyenne du niveau d'eau se situe à 9,2 m sous la surface (Gagné et al. 2022). Les gradients

hydrauliques varient de 0,0003 m/m à 0,5 m/m dans la portion nord des Laurentides. Pour la base des Laurentides, le gradient hydraulique moyen est de 0,02 m/m, puis diminue à 0,005 m/m dans le secteur compris dans les Basses-Terres du Saint-Laurent.

La cartographie des zones de confinement (Figure 59 en annexe) montre des zones à nappe libre s'écoulant à travers le roc, le till mince ou les dépôts granulaires. Les zones de nappes semi-captives correspondent aux zones composées de till mince ou continu d'une épaisseur de 3 m ou moins. Les zones de nappe captive se trouvent dans les environnements composés de sédiments fins (silt, argile) ou de till continu de plus de 3 m d'épaisseur.

Le bassin versant du ruisseau des Vases présente une nappe libre en amont, puis la nappe devient semi-captive avant d'être captive dans la portion aval. Dans le cas de la rivière à Simon, l'ensemble du bassin versant est caractérisé par une nappe libre dans le roc et le till mince. La rivière Sagouay est située dans une région caractérisée par d'importantes épaisseurs de dépôts granulaires. L'eau souterraine de ce bassin versant est retrouvée dans une nappe libre. Le bassin versant du ruisseau Lanthier, comme celui du ruisseau des Vases, présente une nappe libre en amont et une nappe captive dans la portion aval.

2.3.2 Traceurs naturels de l'eau souterraine

L'activité du ^{222}Rn , la composition isotopique ainsi que la conductivité électrique de l'eau souterraine de 342 puits résidentiels (Figure 14) ont été mesurées dans le cadre du PACES-LAULM (Gagné et al. 2022). Aucune donnée n'est disponible pour les Basses-Laurentides où se trouve le ruisseau des Vases, ce bassin versant a donc été exclu des analyses de comparaison des traceurs naturels de l'eau souterraine.

^{222}Rn

L'activité moyenne du radon est de 6,98 Bq/L dans l'eau souterraine du bassin versant de la rivière à Simon, de 39,58 Bq/L dans l'eau souterraine du bassin versant de la rivière Sagouay et de 24,07 Bq/L dans de l'eau souterraine du bassin versant du ruisseau Lanthier. Aucune différence significative ($p > 0,05$; test de Tukey) n'est observée entre les activités en ^{222}Rn moyennes mesurées dans l'eau souterraine de ces trois bassins versants (Figure 10).

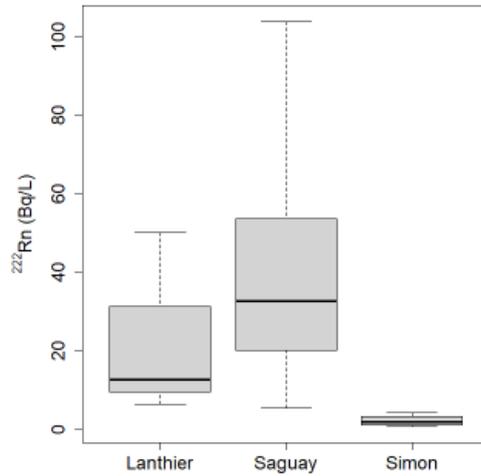


Figure 10 : Comparaison de l'activité ^{222}Rn mesurée dans l'eau souterraine des bassins versants Simon, Saguy et Lanthier.

Conductivité électrique

La conductivité électrique moyenne est de 189 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans l'eau souterraine du bassin versant de la rivière à Simon, de 171 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans l'eau souterraine du bassin versant de la rivière Saguy et de 238 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans l'eau souterraine du bassin versant du ruisseau Lanthier. Aucune différence significative ($p > 0,05$; test de Tukey) n'est observée entre la moyenne des conductivités électriques mesurées dans l'eau souterraine de ces trois bassins versants (Figure 11).

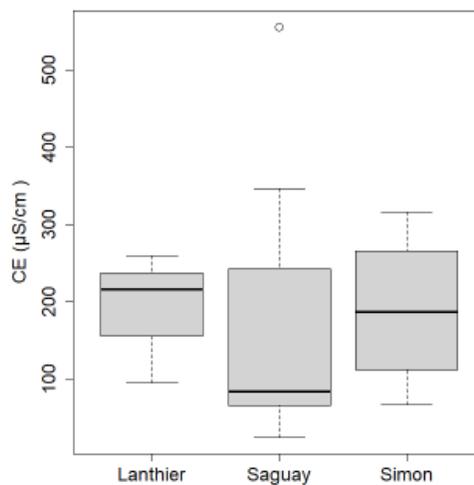


Figure 11 : Comparaison des conductivités électriques mesurées dans l'eau souterraine des bassins versants Simon, Saguy et Lanthier.

Isotopes stables de l'eau

La moyenne annuelle de la composition isotopique de l'eau souterraine en tenant compte de l'ensemble des échantillons de la zone d'étude est de $-12,5$ ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de $-78,8$ ‰ pour le $\delta^2\text{H}$. La composition isotopique moyenne dans l'eau souterraine est de $-77,5$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-11,4$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) sur le bassin versant de la rivière à Simon, de $-85,4$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-12,4$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) sur le bassin versant de la rivière Saguay, et de $-86,2$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-12,4$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) sur le bassin versant du ruisseau Lanthier. La composition isotopique en $\delta^2\text{H}$ de l'eau souterraine du bassin versant de la rivière à Simon est significativement enrichie ($p < 0,05$; test de Tukey) par rapport à celles des bassins versants Saguay et Lanthier (Figure 12a). Aucune différence significative ($p > 0,05$; test de Tukey) n'est observée entre la moyenne de composition isotopique en $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau souterraine de ces trois bassins versants (Figure 12b).

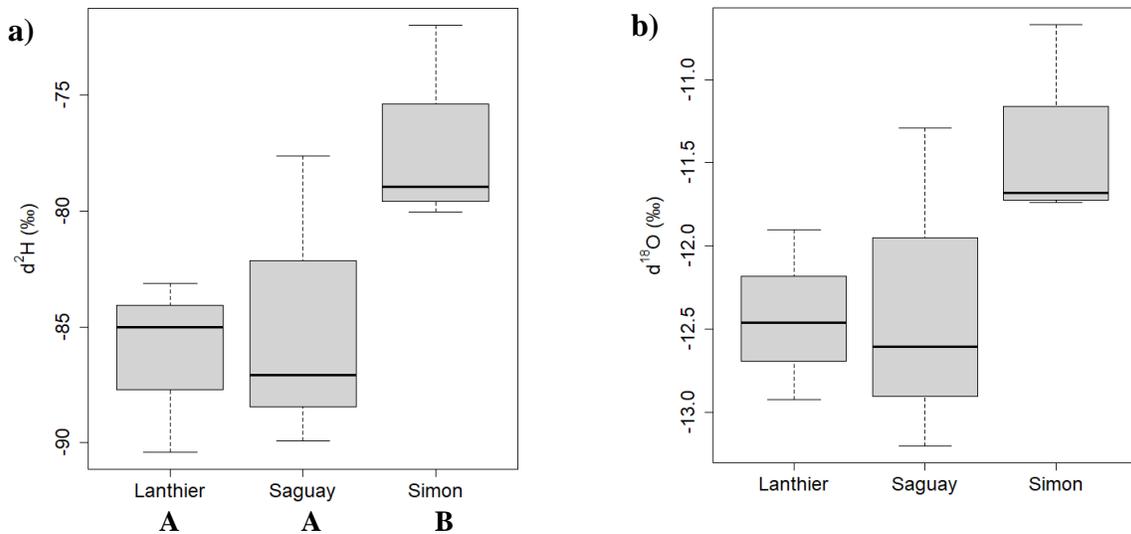


Figure 12 : Comparaison des compositions isotopiques de l'eau souterraine sur les bassins versants Simon, Saguay et Lanthier a) $\delta^2\text{H}$, b) $\delta^{18}\text{O}$. A et B : Ensembles significativement différents.

La composition isotopique de l'eau des précipitations a été mesurée tous les mois entre juin 2019 et avril 2020 à deux stations météorologiques dans le cadre du PACES-LAULM. La première station est située à Arundel et représente le secteur sud de la zone d'étude, tandis que la deuxième station est située à Ferme-Neuve et représente le secteur nord. La composition isotopique des précipitations mensuelles a été pondérée pour les deux stations et a permis d'obtenir la moyenne annuelle de la composition isotopique des deux stations.

Les résultats obtenus pour Arundel sont de -13,0 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$, et - 91,4 ‰ pour le $\delta^2\text{H}$, alors que ceux de la station de Ferme-Neuve sont de -13,0 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de -91,2 ‰ pour le $\delta^2\text{H}$ (Gagné et al., 2022). La composition isotopique de l'eau souterraine et des précipitations s'aligne sur les deux droites météoriques locales (Figure 13). Au Québec, la composition isotopique de l'eau de surface suit d'assez près la courbe météorique, tandis que celle de l'eau souterraine a généralement une signature isotopique appauvrie comparativement à celle des précipitations estivales étant donné qu'elle est principalement renouvelée à partir de la recharge printanière. Toutefois, les données du PACES-LAULM (Gagné et al., 2022) montrent que c'est plutôt l'inverse qui est observé dans les Laurentides. La principale période de recherche reste néanmoins le moment de la fonte de la neige (Gagné et al., 2022). Il est possible que les compositions isotopiques des précipitations de la station d'Arundel plus enrichies que celles de la station de Ferme-Neuve se traduisent dans les compositions isotopiques de l'eau souterraine de la région, et que la composition isotopique de l'eau souterraine dans le nord des Laurentides serait plus appauvrie que celle de l'eau souterraine retrouvée au sud.

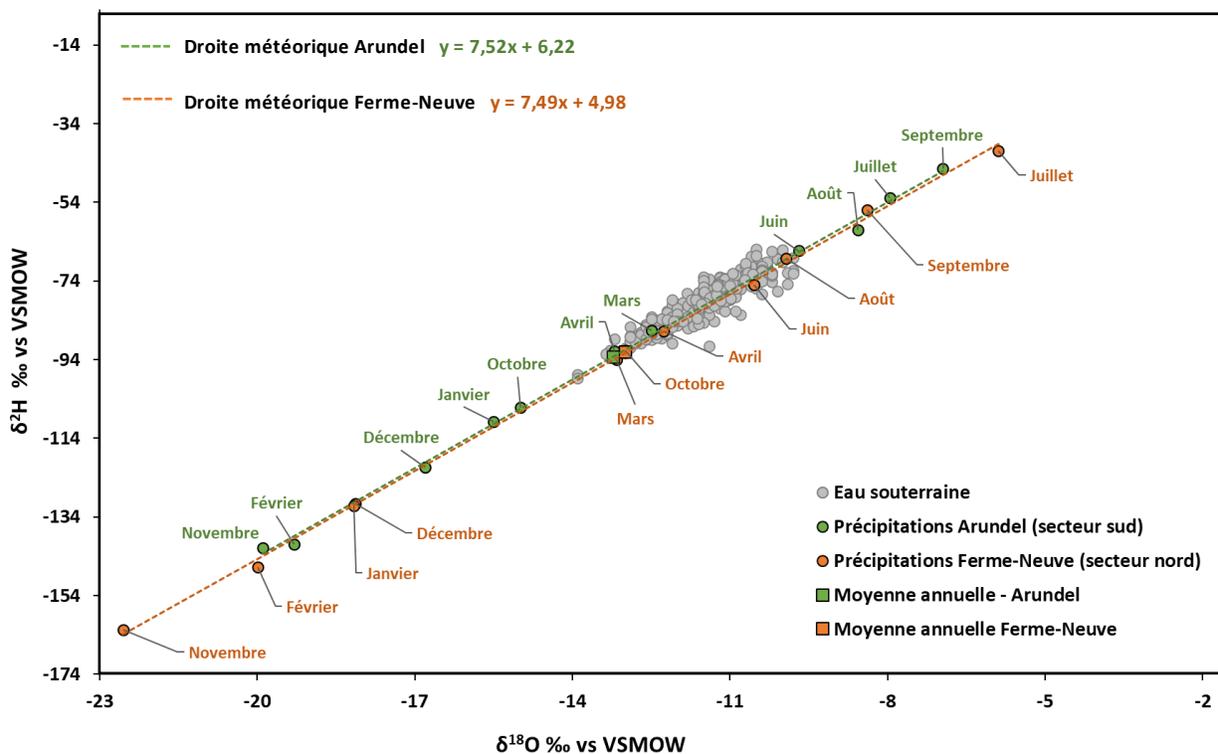


Figure 13 : Composition isotopique $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations et de l'eau souterraine dans la zone d'étude (données de Gagné et al., 2022).

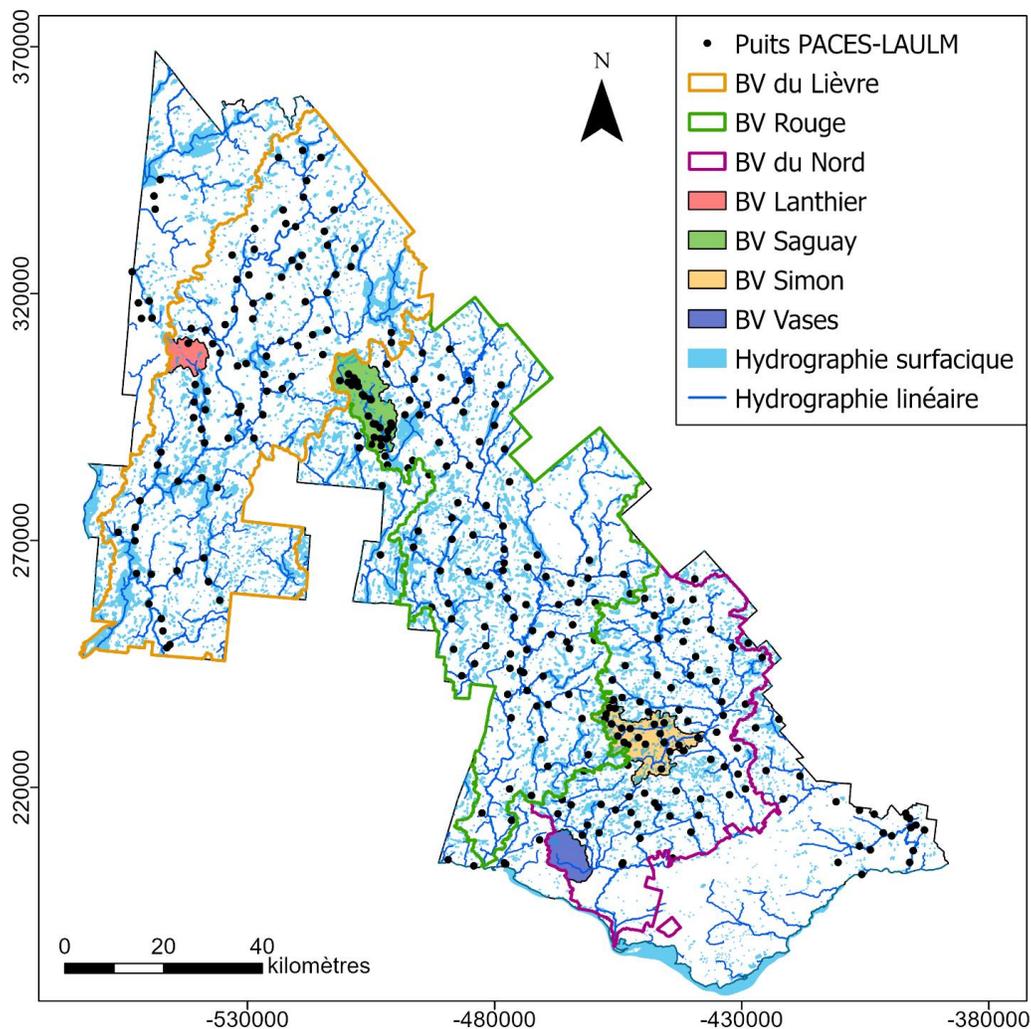


Figure 14 : Localisation des puits d'échantillonnage pour l'analyse des traceurs naturels de l'eau souterraine (modifié de Gagné et al., 2022).

2.4 Hydrologie

2.4.1 Conditions générales

La région comprend trois grands bassins versants qui représentent près de 75 % de la superficie de la région des Laurentides et de la MRC les Moulins. Le bassin versant de la rivière Du Nord d'une superficie de 2 212 km² est situé au S-E de la zone d'étude. Le bassin versant de la rivière Rouge traverse la zone d'étude du nord au sud et a une superficie de 3 512 km². Le bassin versant de la rivière Du Lièvre, d'une superficie de 3 630 km², est situé à l'ouest du bassin versant de la rivière Rouge, au nord-ouest des Laurentides (Figure 14).

2.4.2 Ruisseau des Vases

Le ruisseau des Vases est un sous-bassin versant de la rivière de l'Ouest et couvre une superficie de 63,5 km². Il est situé dans la région de Brownsburg-Chatham et prend source dans trois lacs soit : Indien, Goyette et Rainbow. Le ruisseau traverse le lac en Croissant dont la superficie est de 0,32 km². La superficie totale des lacs présents sur le bassin versant est de 0,51 km² (GRHQ, 2021). La portion du ruisseau des Vases se trouvant en aval du lac en Croissant est considérée dans le projet (Figure 15). Cette portion du tronçon principal est d'ordre 3 et s'écoule sur 13 km avant de se jeter dans la rivière de l'Ouest à la hauteur de Brownsburg-Chatham. Le bassin versant comprend plusieurs milieux humides, principalement en portion amont, qui couvrent une superficie totale de 6,4 km² (MELCCFP, 2020).

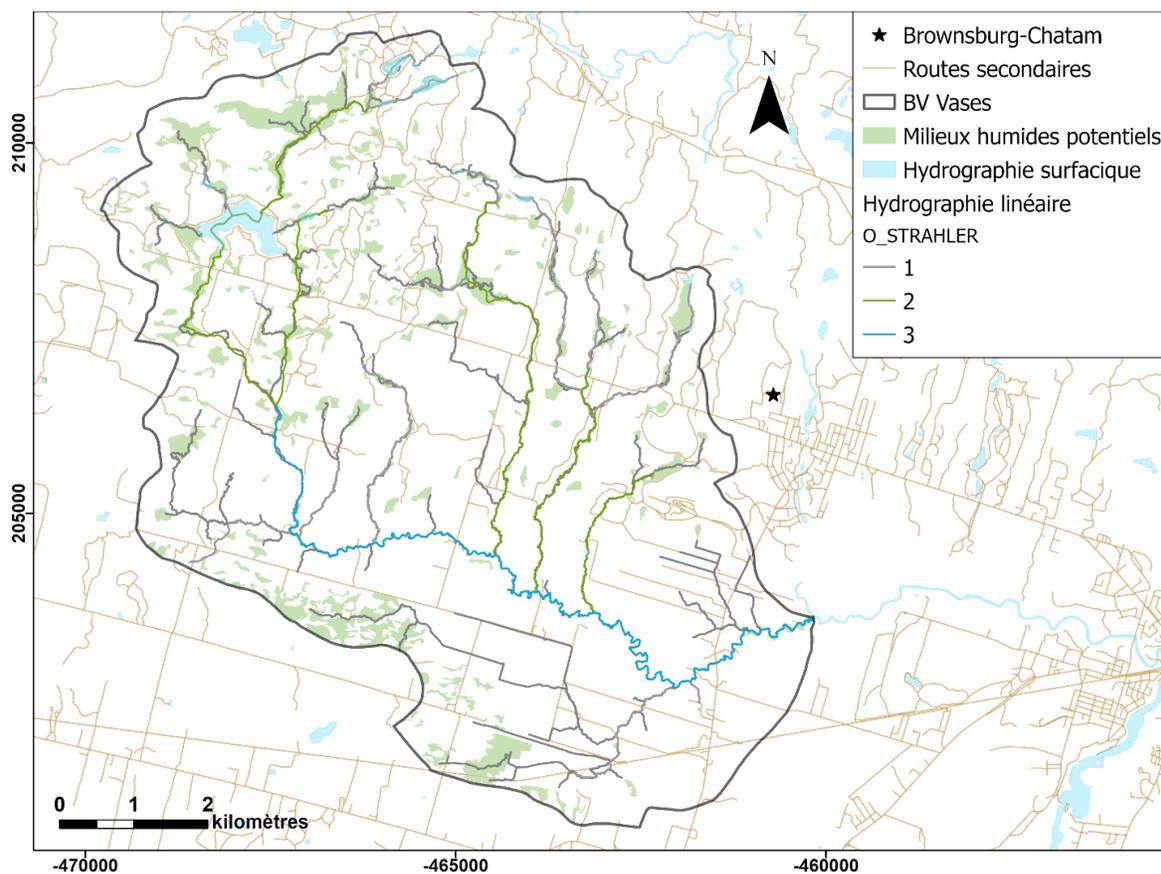


Figure 15 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant du ruisseau des Vases.

Le ruisseau possède plusieurs tributaires d'ordres 1 et 2. Le réseau parallèle des tributaires a été redressé par endroits, cependant la majeure portion du réseau hydrique demeure intouchée. L'aquifère est à nappe libre au nord du bassin versant et s'écoule dans le roc fracturé et les dépôts granulaires. Dans la portion sud, l'aquifère du roc fracturé est captif sous d'importantes épaisseurs d'argiles.

2.4.3 Rivière à Simon

La rivière à Simon est un sous-bassin versant de la rivière du Nord. Ce bassin versant présente un réseau rectangulaire qui couvre 165,7 km² de superficie et son exutoire se trouve un peu au nord de Saint-Sauveur (Figure 16). La rivière prend source à l'exutoire du lac Vingt Sous près de Saint-Adolphe-d'Howard et se déverse dans la rivière du Nord à la hauteur de Piedmont. Le bassin versant comprend 333 lacs dont la superficie totale atteint près de 10 km², ainsi que 1277 milieux humides d'une superficie totale de 14,3 km² (OBV Abrinord, 2018). La rivière à Simon traverse les lacs Guémont (0,35 km²), Castor (0,17 km²), Franc (0,1 km²) et Bouchette (0,55 km²) (GRHQ, 2021). La portion de la rivière située en aval du lac Guémont est étudiée. Ce tronçon mesure 30 km de longueur et comprend deux tributaires majeurs.

Le tributaire central (rivière Chevreuil) est un tributaire d'ordre 2 s'écoulant d'est en ouest qui se déverse dans la rivière à Simon à 11 km de son amont. Le tributaire sud (ruisseau Jackson) est le tributaire principal de la rivière à Simon avec son ordre de 4 et provient plutôt du sud. Ce tributaire se jette dans le tronçon principal de la rivière à Simon à 13,7 km de l'amont. Le réseau hydrographique issu du LiDAR présente également plusieurs tributaires d'ordre 1 tout au long du tronçon principal.

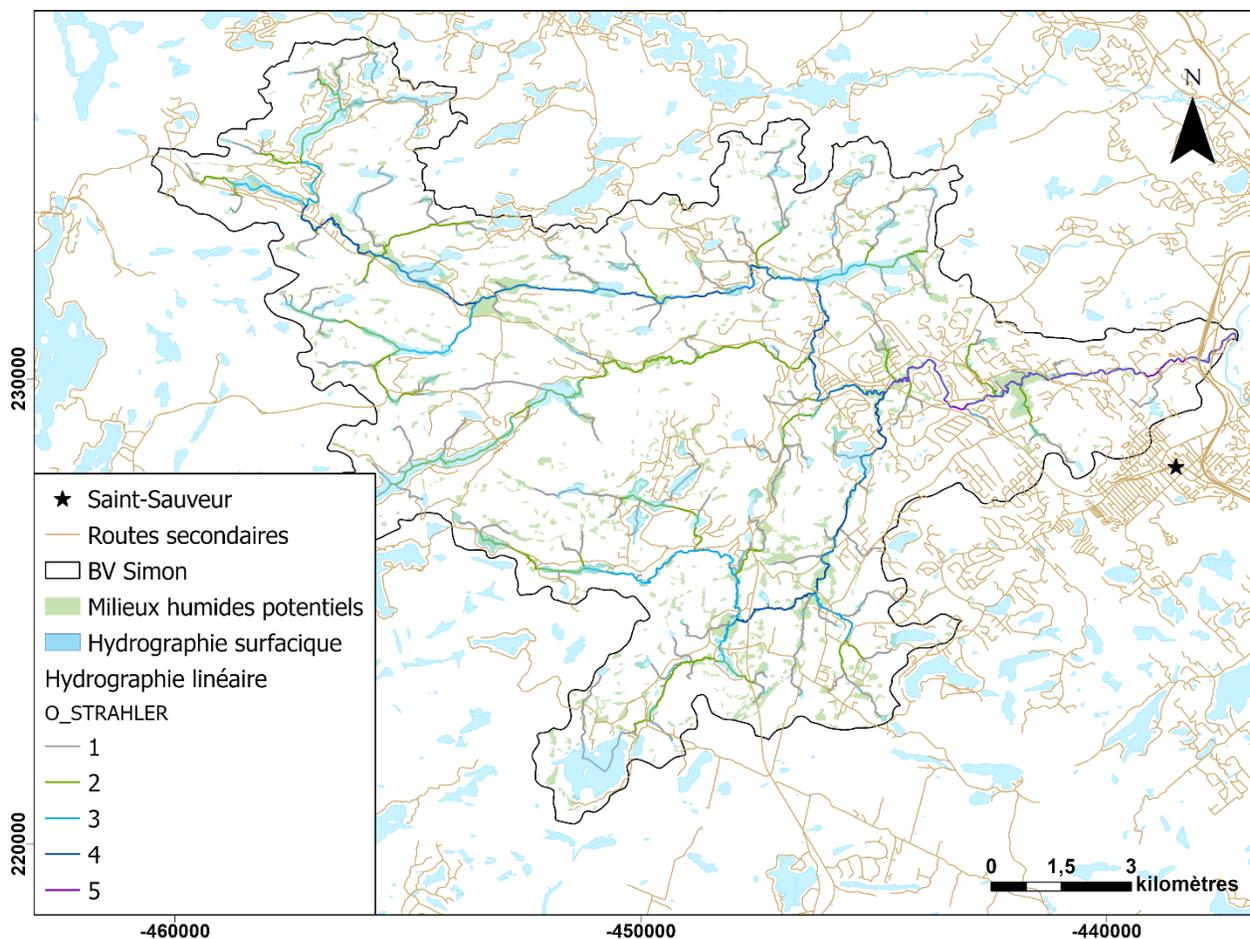


Figure 16 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant de la rivière à Simon.

2.4.4 Rivière Sagouay

La rivière Sagouay est un sous bassin versant de la rivière Rouge et couvre une superficie de 147,3 km². Son réseau dendritique se jette dans le Petit lac Nominique dans la ville du même nom. Le bassin versant de la rivière Sagouay prend source dans un ensemble de lacs de tête. Le territoire comporte 25 lacs dont la superficie totale est de 5,2 km² (GRHQ, 2021). Plus en aval, la rivière devient temporairement le lac Sagouay, puis éventuellement le lac Allard. L'exutoire de ce lac comporte un barrage qui n'a pas d'influence sur le niveau d'eau de la rivière. La portion de la rivière Sagouay à l'étude (Figure 17) est le segment entre le lac Allard et le Petit lac Nominique, d'une longueur de 9 km et d'ordre 4.

Les tributaires de ce tronçon sont nombreux et d'ordres 1 et 2. Les milieux humides occupent 12,9 km² du bassin versant (MELCCFP, 2020). La région est caractérisée par les dépôts glaciaires

avec des secteurs de till mince et continu, ainsi que des secteurs de sédiments juxtaglaciaires et fluvio-glaciaires. La nappe est libre dans les sédiments granulaires de la plus grande portion du bassin versant, avec quelques zones semi-captives.

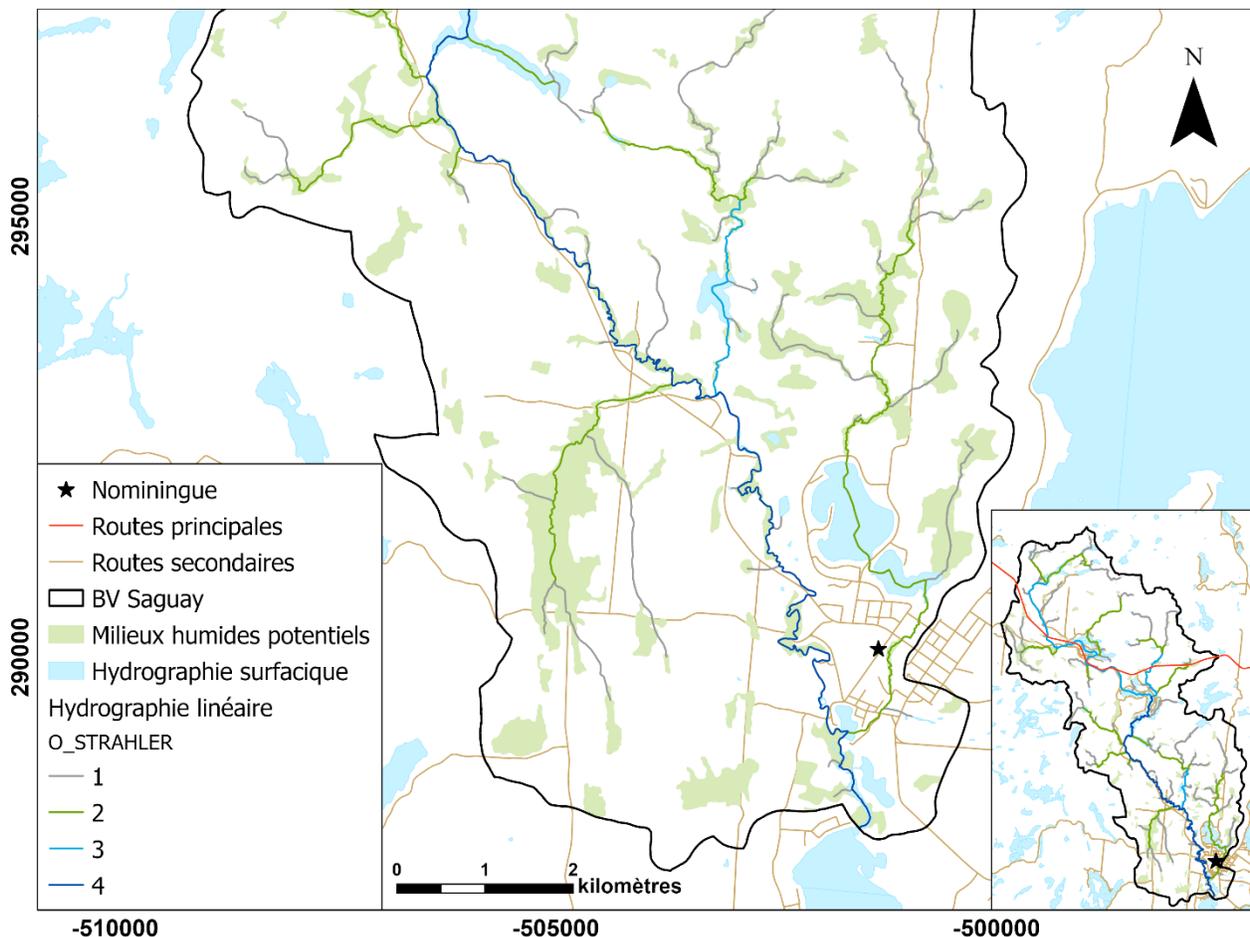


Figure 17 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant de la rivière Sagway.

2.4.5 Ruisseau Lanthier

Le ruisseau Lanthier est un sous-bassin versant de la rivière du Lièvre d'une superficie de 56 km². Le ruisseau prend sa source dans le lac du Neuf et s'écoule sur 11 km avant de se jeter dans le lac des Îles (Figure 18). Le bassin versant comprend sept lacs qui couvrent une superficie totale de 1,1 km² (GRHQ, 2021) et les milieux humides constituent 2,9 km² du territoire (MELCCFP, 2020). Plusieurs tributaires d'ordre 1 sont observés tout au long du tronçon principal. Un tributaire d'ordre 3 se jette dans la rivière à 9,9 km de l'amont du tronçon principal du ruisseau Lanthier. La nappe

de la portion amont du bassin versant est libre dans le roc et sa portion aval devient captive dans le roc sous le silt argileux (LGa).

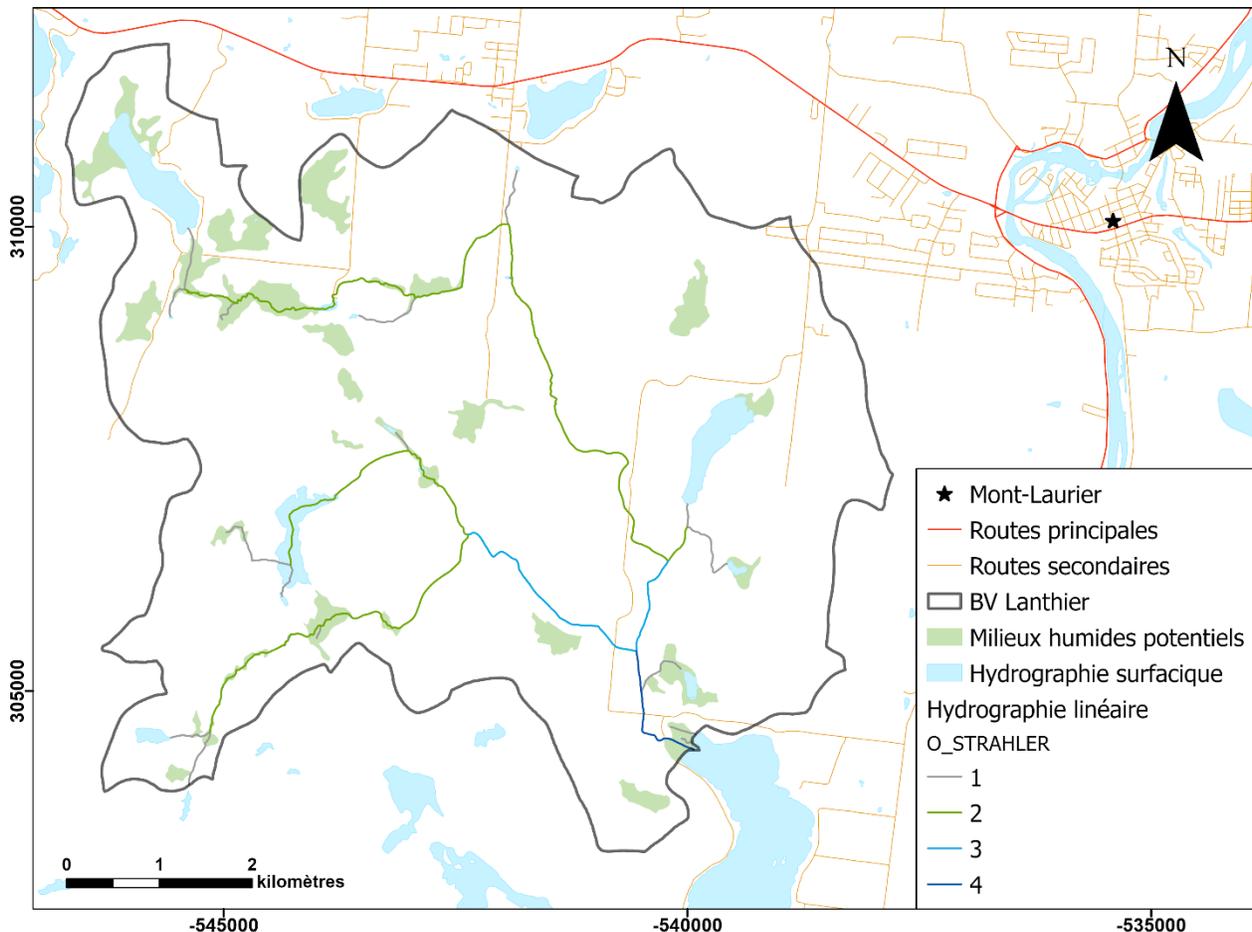


Figure 18 : Hydrographie et ordre Strahler des cours d'eau sur le bassin versant du ruisseau Lanthier.

2.5 Conditions météorologiques

Des données météorologiques interpolées sur la zone d'étude sont disponibles de 1961 à 2017 sur un maillage de $0,1^\circ$ (Climat Québec, 2019). Des cartes de la distribution spatiale des précipitations annuelles moyennes (Figure 64 en annexe) ainsi que des températures moyennes annuelles (Figure 65 en annexe) sur l'ensemble de la zone d'étude du PACES-LAULM (Gagné et al., 2022). Ces cartes montrent l'existence d'un gradient de température moyenne annuelle d'environ 6°C entre les Basses-Terres du Saint-Laurent ($6,1 - 7,5^\circ\text{C}$) et la portion nord de la zone d'étude ($1,7 - 3^\circ\text{C}$) pour la période de 1961 à 2017. Les Basses-Terres du Saint-Laurent reçoivent environ 1000 mm/an de précipitations moyennes annuellement. Le centre de la zone d'étude, qui est caractérisée par une

topographie plus élevée (région du Mont-Tremblant), reçoit plus de précipitations (~1100 mm/an). Les précipitations reçues dans la vallée de la rivière du Lièvre, située au nord de la zone d'étude, sont généralement plus faibles (900 à 1000 mm/an).

L'été 2021 a été particulièrement sec par rapport aux années précédentes. L'écart entre les températures observées au cours de l'été 2021 et les températures moyennes estivales de 1961 à 1990 pour la région des Laurentides est de + 1,5 à 2,5°C (ECCC, 2023a). La crue du printemps a été très courte, en raison des faibles volumes de fonte des neiges et des faibles précipitations. Les données historiques de la station météorologique d'Arundel entre 1981 et 2010 rapportent une moyenne de précipitations de 440,2 mm entre les mois de mai et août (MELCCFP, 2023). Entre mai et août 2021, les précipitations enregistrées à la station météorologique atteignaient 302,6 mm, soit une diminution de 30 % des valeurs normales (ECCC, 2023b). Les niveaux d'eau observés dans les cours d'eau à la mi-juin en 2021 étaient donc similaires aux valeurs habituellement observées en août-septembre pour l'ensemble des bassins versants étudiés.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre, la méthodologie utilisée pour les mesures de débit et de conductivité électrique ainsi que les protocoles liés à l'échantillonnage et aux analyses de l'activité ^{222}Rn et de la composition en isotopes stables de l'eau sont présentés. L'utilisation et les paramètres du calculateur Radin14 sont ensuite présentés. L'approche utilisée pour développer un indice de connectivité est également décrite.

3.1 Campagnes d'échantillonnage

Deux campagnes d'échantillonnage de l'eau de surface ont été réalisées en période d'étiage au courant des étés 2020 et 2021. La campagne de l'été 2020 a permis de tester le protocole d'échantillonnage et d'identifier les meilleures stations de mesure. La campagne de terrain de l'été 2021 a permis de mesurer le débit et la conductivité électrique de l'eau et de réaliser l'échantillonnage pour les analyses du ^{222}Rn , pour les isotopes stables de l'eau et pour la conductivité électrique de l'eau.

Au cours de la campagne de 2021, 98 stations ont été échantillonnées sur les tronçons principaux des quatre rivières à l'étude ainsi que sur leurs principaux tributaires (Tableau 4). Seuls ces résultats sont présentés dans ce mémoire (Figure 19, 20, 21 et 22). Les stations situées sur les tronçons principaux étudiés sont nommées à l'aide de nombres en ordre croissant selon leur distance par rapport à l'amont du bassin versant. Les stations situées sur les différents tributaires sont nommées à l'aide de lettres. Lorsque plus d'une station se trouvent sur un même tributaire, cette lettre est suivie d'un chiffre.

Tableau 4 : Répartition des sites d'échantillonnage par bassin versant.

	Vases		Simon		Saguay		Lanthier	
	Tronçons	Affluents	Tronçons	Affluents	Tronçons	Affluents	Tronçons	Affluents
Nombre de stations	7	18	14	22	7	16	7	7

L'absence de données sur l'eau souterraine dans le sous-bassin versant du ruisseau des Vases (Brownsburg-Chatam) a nécessité l'échantillonnage de deux puits résidentiels dans le cadre du projet au cours de l'été 2021. La conductivité électrique de l'eau souterraine a été mesurée et des échantillons ont été prélevés pour les analyses de l'activité ^{222}Rn et de la composition isotopique de l'eau. Les activités ^{222}Rn , les compositions isotopiques et les CE mesurées ont été attribuées à l'eau souterraine du sous-bassin versant.

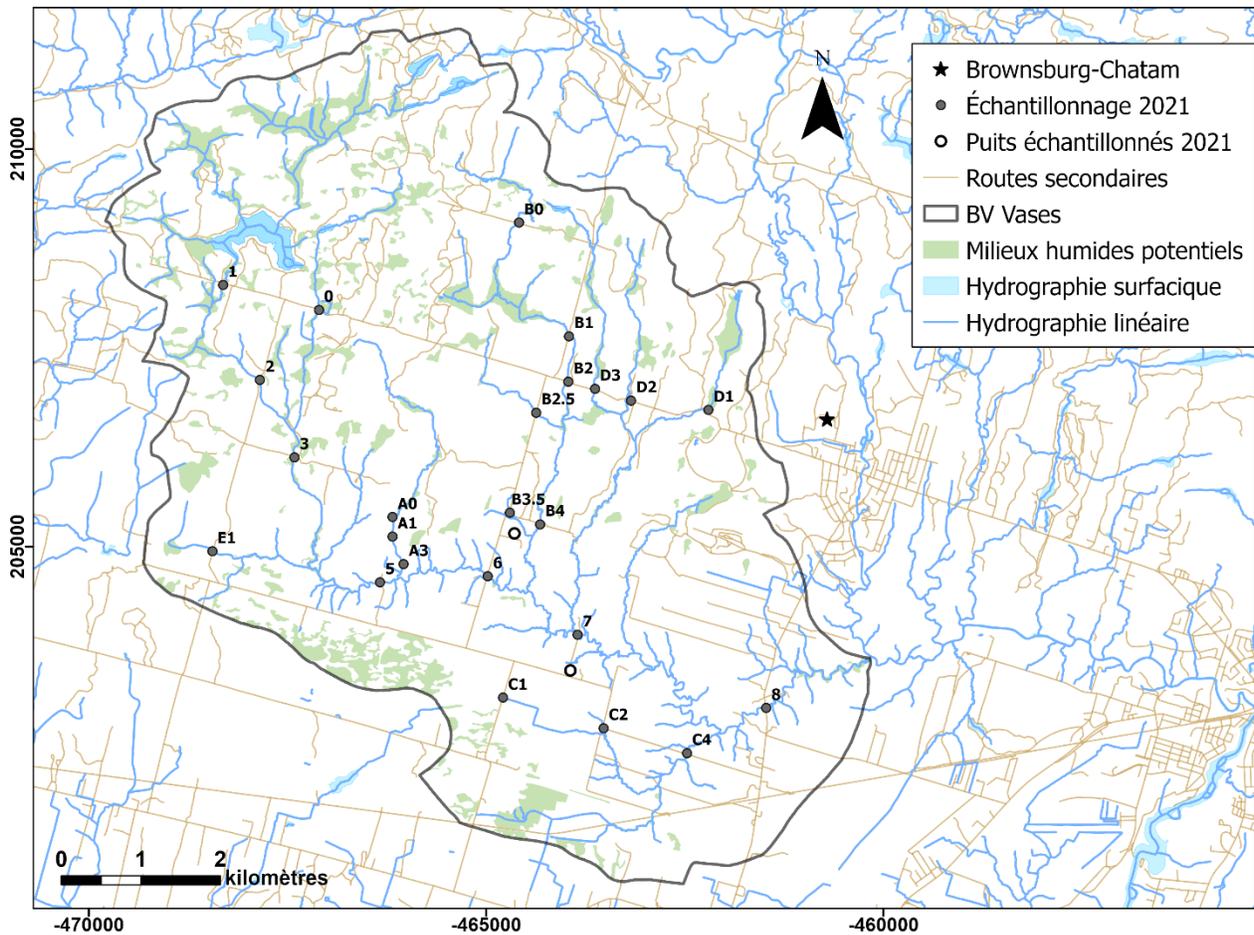


Figure 19 : Stations de mesures du débit et de la CE, d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique, ainsi que des deux puits résidentiels échantillonnés au cours de l'été 2021 sur le bassin versant du ruisseau des Vases.

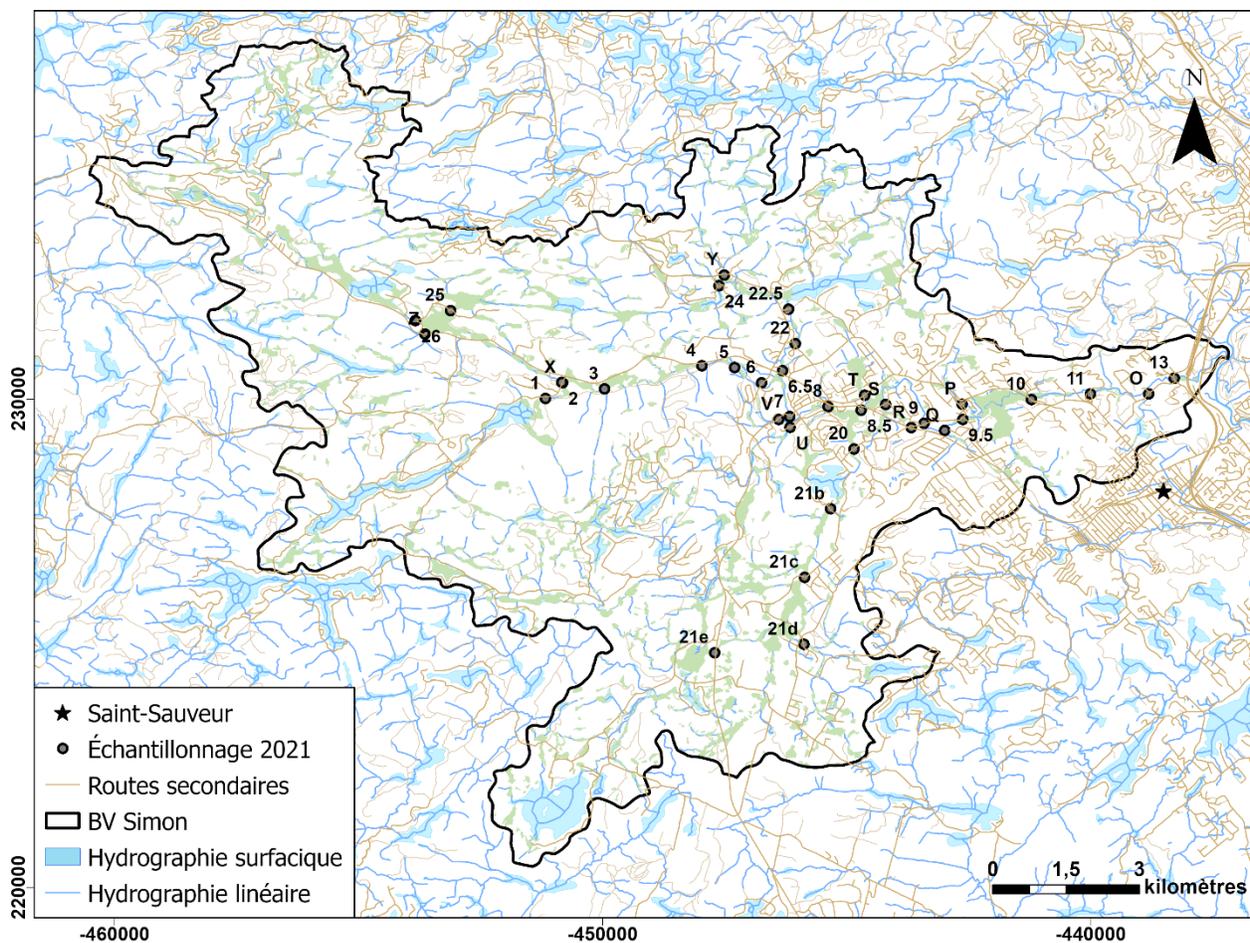


Figure 20 : Stations de mesures du débit et de la CE, ainsi que d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique sur le bassin versant de la rivière à Simon.

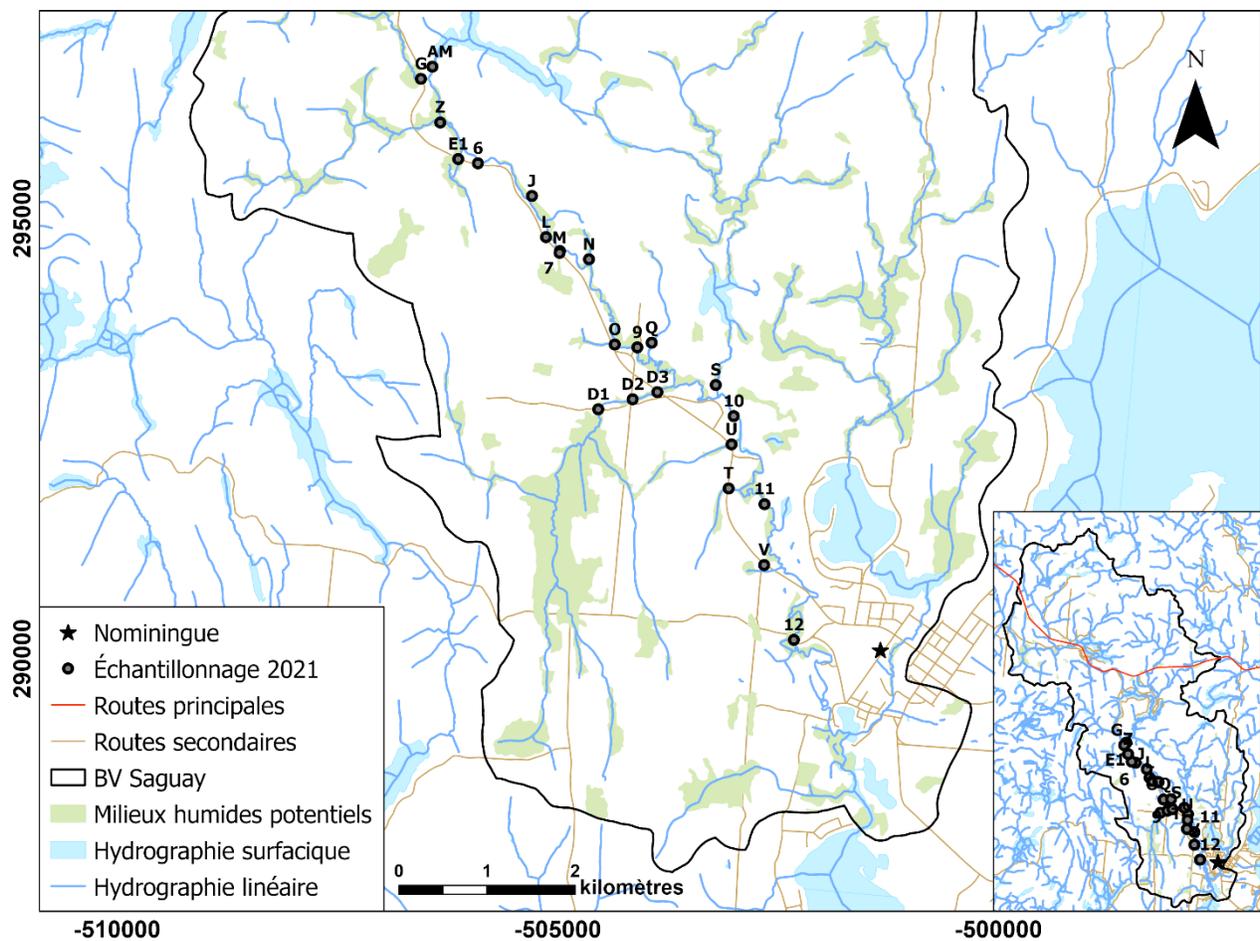


Figure 21 : Stations de mesures du débit et de la CE, ainsi que d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique sur le bassin versant de la rivière Saguary.

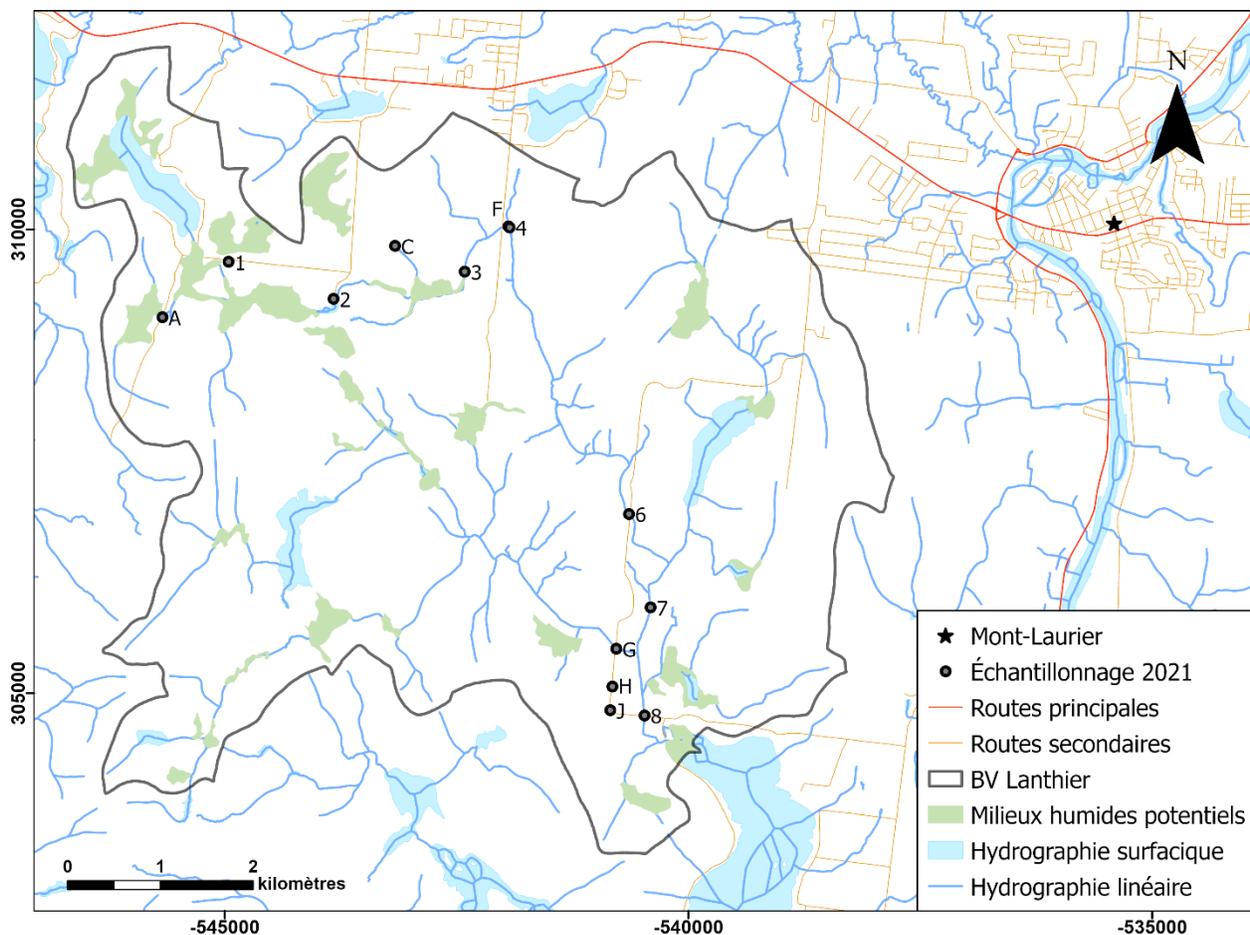


Figure 22 : Stations de mesures du débit et de la CE, ainsi que d'échantillonnage de l'eau pour les analyses d'activité ^{222}Rn et de composition isotopique sur le bassin versant du ruisseau Lanthier.

L'échantillonnage et les mesures de débit sur le ruisseau des Vases et ses tributaires ont eu lieu entre le 15 et le 26 juillet. À ces dates, les débits de la rivière du Nord ont été relativement constants, avec un intervalle de 8,7 à 11,7 m³/s (DEH, 2021). La station météorologique de Lachute rapporte 16,5 mm de pluie le 20 juillet, ainsi que 24 mm de pluie le 24 juillet (ECCC, 2021). Malgré ces précipitations, aucun pic de débit n'est observé sur la rivière Rouge, la rivière principale la plus proche.

Les données de la station de mesure de débit de la rivière du Nord à 175 m en amont du pont de la rue Bélanger à Saint-Jérôme ont été vérifiées afin de s'assurer d'être en contexte d'étiage au moment des travaux réalisés sur le terrain. L'échantillonnage ainsi que les mesures de débit aux différents points sur la rivière à Simon et ses tributaires ont été faits les 5, 7, 8 et 12 juillet 2021. Les données de précipitations de la station météorologique de Saint-Jérôme indiquent que

116,5 mm sont tombés sur la région durant le mois de juin. Aucune précipitation n'est tombée durant le mois de juillet (MELCCFP, 2021). Le 5 juillet, le débit de la rivière du Nord en amont de la chute Mc Neill était de 24,92 m³/s. Les jours suivants, le débit s'était stabilisé autour de 13 m³/s (DEH, 2021). Il est donc possible de supposer que les débits de la rivière à Simon suivaient la même tendance durant l'échantillonnage.

Les données de la station de mesure de débit de la direction de l'expertise hydrique du Québec (DEH) sur la rivière Du Lièvre à 2,2 km en amont du pont-route 311 à Lac-Saint-Paul ont été vérifiées afin d'assurer le contexte d'étiage. Le niveau d'eau est resté presque constant, avec des variations de 1 à 2 mm sur la rivière Rouge lors de l'échantillonnage de la rivière Sagouay du 2, 4 et 5 août 2021. Les données de précipitations recueillies par la station météorologique de La Macaza rapportent que 15,2 mm de pluie sont tombés sur la région durant la journée du 3 août 2021 (ECCC, 2021). Les données de débit de la rivière Rouge à la station de la DEH en amont de la chute McNeil présentent des variations de 2 à 3 m³/s durant les jours de l'échantillonnage sur la rivière Sagouay. Cependant, cette station se situe très près de l'exutoire de la rivière Rouge, alors que la rivière Sagouay se jette dans la Rouge à une centaine de kilomètres en amont. Le 5 août, le niveau d'eau de la rivière Rouge près de la ville de Rivière-Rouge était de 233,15 m. Le niveau d'eau le plus bas a été atteint le 5 septembre avec une valeur de 232,8 m. En comparaison, le plus haut niveau d'eau en 2021 a été atteint le 30 mars, avec une valeur de 234,82 m (DEH, 2021). Il y a une différence de 1,67 m entre la crue printanière et la période d'échantillonnage du début août. Ainsi, il est possible de dire que l'échantillonnage et les mesures de débit de la rivière Sagouay ont eu lieu durant la période d'étiage.

L'échantillonnage et les mesures de débits sur le bassin versant du ruisseau Lanthier ont eu lieu le 9 août 2021. Les données de débit sur la rivière Du Lièvre confirment que le débit était 20,8 m³/s plus faible que la médiane des données historiques (DEH, 2021). Aucune précipitation n'a été constatée durant les cinq jours précédant l'échantillonnage d'après la station météorologique de La Macaza (ECCC, 2021).

3.2 Mesures de débits

Les largeurs des segments de rivière ont été mesurées aux stations d'échantillonnage à l'aide d'un ruban à mesurer. Les profondeurs maximales et moyennes des segments de rivières ont été mesurées à l'aide des vélocimètres utilisés lors des mesures de débits. En fonction de la largeur et de la profondeur des sections, deux méthodes ont été utilisées afin de mesurer les débits.

La première méthode a été utilisée lorsque la profondeur de l'eau était supérieure ou égale à 0,5 m pour des sections de plus de 4 m de largeur. Un vélocimètre Doppler intégrateur (*acoustic Doppler courant profiler*) fixé sur un flotteur (*Teledyne RD Instruments StreamPro*) a été utilisé (Figure 23). L'épaisseur de la colonne d'eau devait être d'au moins 0,3 m pour que l'appareil puisse prendre les mesures. Ce vélocimètre mesure automatiquement les dimensions de la section, en plus de prendre plusieurs mesures de vitesse de l'eau. L'ensemble des mesures réalisées sur la section sont intégrées automatiquement et un débit total est fourni pour la section. Les mesures de débit sont répétées jusqu'à l'obtention de trois valeurs de débit total ayant une différence de moins de 5 % avec la moyenne. Une calibration du GPS du vélocimètre a été réalisée chaque jour afin de connaître la variation de la direction d'écoulement nécessaire à l'intégration des mesures. La calibration du GPS a été répétée jusqu'à l'obtention d'une incertitude inférieure à 2° et permet de réduire l'erreur associée à la mesure du débit.



Figure 23 : Vélocimètre Doppler intégrateur installé sur un flotteur.

La deuxième méthode a été employée pour les sites dont la largeur de la section était inférieure à 4 m et pour les sites plus larges dont la profondeur de l'eau était inférieure à 0,5 m. Un vélocimètre électromagnétique *Hach FH950* a été utilisé afin de mesurer la vitesse de l'eau en plusieurs points à travers la section. Pour les sections à la profondeur d'eau supérieure à 0,3 m, les mesures ont été prises à 20 et 80 % de la hauteur de la colonne d'eau. La vitesse moyenne de la mesure en un point est égale à la moyenne des deux vitesses mesurées.

Pour les sections à la profondeur d'eau inférieure à 0,3 m les mesures ont été prises à 60 % de la colonne d'eau. La largeur entre les points de mesure était de 10 % et dépendait de la largeur de la section. Par exemple pour une section de 2 m de largeur, les mesures de débit étaient prises à tous les 20 cm, alors que pour une section de 4 m de largeur, les mesures de vitesse étaient prises aux 40 cm et ainsi de suite. Une largeur maximale de 50 cm a été posée entre les points de mesure de vitesse pour les sections plus larges. Une fois toutes les mesures de vitesse obtenues, le vélocimètre électromagnétique calcule automatiquement le débit total de la section. L'erreur associée aux mesures de débits de ces deux appareils varie entre 3 et 7 % (Olivier et al., 2008), une erreur de $\pm 7\%$ a été appliquée aux valeurs de débits mesurées.

3.3 Mesures de conductivités électriques

La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'une sonde portative (WTW 2AA312 pH3310 SET 2) placée directement dans l'eau des rivières étudiées, jusqu'à l'obtention d'une valeur stable. Les conductivités électriques de l'eau souterraine des deux puits résidentiels du bassin versant du ruisseau des Vases ont été mesurées lors de leur échantillonnage à l'aide d'une sonde multi paramètres. L'incertitude des mesures de conductivités électriques est de $\pm 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Lefebvre et al., 2015).

3.4 Échantillonnage et analyse des isotopes stables de l'eau

Les échantillons pour l'analyse des isotopes stables de l'eau ont été prélevés à la main, à même l'eau de la rivière à une profondeur d'environ 10 cm par rapport à la surface de l'eau, des bouteilles de plastique rigides de 13 ml ont été utilisées et les échantillons n'ont pas été filtrés. La bouteille a été rincée trois fois avant d'être remplie de sorte à éviter la présence d'air dans le contenant. Du parafilm a été installé sur les bouchons des bouteilles afin d'empêcher l'évaporation. Les

échantillons ont été conservés à température ambiante durant l'échantillonnage. Durant le délai entre l'échantillonnage et les analyses en laboratoire, les échantillons ont été conservés à température ambiante et à l'envers, le bouchon vers le bas, afin d'éviter un potentiel échange entre l'échantillon et l'air ambiant. L'analyse des échantillons a été réalisée entre la mi-décembre 2021 et la mi-janvier 2022.

Un spectromètre de masse de type *Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy* (OA-ICOS, modèle T-LWIA-45-EP) a été utilisé pour les analyses au laboratoire de géochimie des isotopes stables légers du centre de recherche Geotop-UQAM. Le protocole d'analyse débute par pipeter 1 ml d'eau échantillonnée dans un vial de 2 ml fermé par un bouchon à septum. Les vials sont ensuite placés dans le plateau du spectromètre (Figure 24) qui récupère 1 μ l par mesure et effectue 10 mesures par échantillon. Les deux premières mesures ne sont pas prises en compte afin de limiter les effets mémoires entre chacun des échantillons. L'incertitude associée au résultat analytique de chaque échantillon est définie par le laboratoire à l'aide de l'écart-type de huit répliques d'analyse de chaque échantillon.

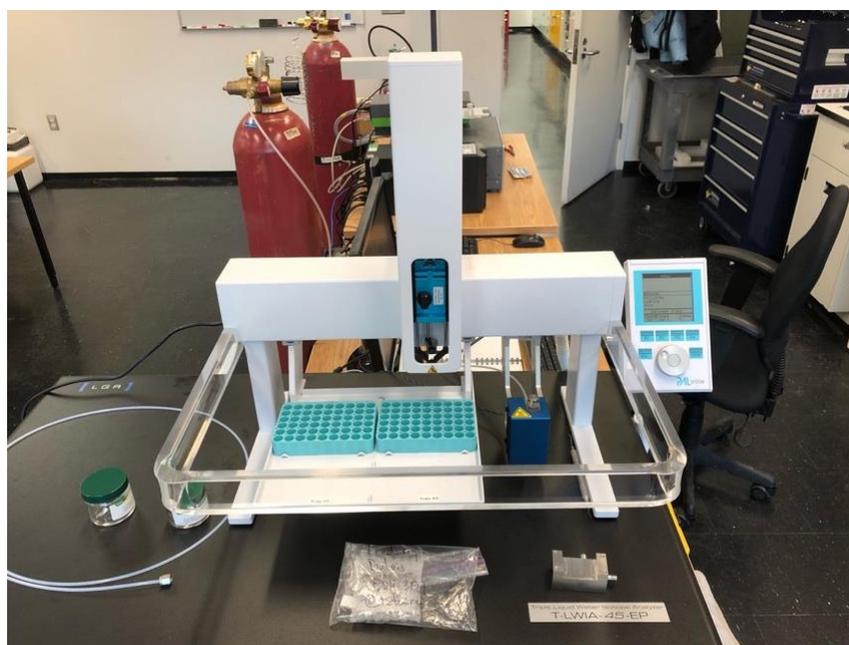


Figure 24 : Spectromètre infrarouge à ratios isotopiques à double laser OA-ICOS.

Afin de normaliser les résultats sur l'échelle VSMOW-SLAP, trois eaux de références internes au laboratoire ont été utilisées ($\delta^{18}\text{O} = 0,23 \pm 0,06 \text{ ‰}$, $-13,74 \pm 0,07 \text{ ‰}$ & $-20,35 \pm 0,10 \text{ ‰}$; $\delta^2\text{H} = 1,28 \pm 0,27 \text{ ‰}$, $-98,89 \pm 1,12 \text{ ‰}$ & $-155,66 \pm 0,69 \text{ ‰}$). Une quatrième eau de référence connue est mesurée durant chaque séquence analytique afin de s'assurer de la précision de la normalisation. Les incertitudes analytiques totales de la méthode sont inférieures à $\pm 0,2 \text{ ‰}$ et $\pm 1,0 \text{ ‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^2\text{H}$ respectivement.

3.5 Échantillonnage et analyse de l'activité ^{222}Rn

L'échantillonnage du ^{222}Rn a été réalisé à l'aide de bouteilles de verre de 250 ml en s'assurant d'éviter l'inclusion de bulles d'air. L'eau des différentes stations a été prélevée à la main et n'a pas été filtrée. Les bouteilles ont été rincées trois fois avec l'eau de la rivière avant l'échantillonnage. Les échantillons n'ont pas été conservés à 4°C. En raison de la courte demi-vie de 3,82 jours du ^{222}Rn , les échantillons ont été analysés par scintillation liquide moins de 36 h après leur échantillonnage.

Un compteur à scintillation liquide *Hidex-300* a été utilisé pour l'analyse de l'activité ^{222}Rn au Geotop-UQAM. L'eau échantillonnée est mélangée avec le scintillant Maxilight afin de concentrer le radon dans le scintillant. Pour les échantillons dont l'activité ^{222}Rn attendue est supérieure à 2,5 Bq/L, le protocole consiste à combiner 3 ml d'eau échantillonnée et 4 ml de scintillant dans un vial de 8 ml. Les échantillons sont homogénéisés en étant secoués à la main pendant au moins 30 sec et sont insérés dans le compteur. Pour les échantillons d'eau dont l'activité ^{222}Rn attendue est plus basse, 35 ml d'eau est retiré de la bouteille, puis 25 ml de scintillant est ajouté. La solution est ensuite homogénéisée pendant 5 min à l'aide d'un agitateur mécanique, puis laissée à reposer jusqu'à la séparation de l'eau et du scintillant. Finalement, 8 ml de scintillant sont pipetés dans le vial qui est ensuite inséré dans le compteur.

Des vials remplis de scintillant vierge sont insérés dans le compteur au début et à la fin de la série d'échantillons à analyser, et constituent des contrôles. Les échantillons sont disposés de sorte à analyser les échantillons les plus « vieux » en premier. Le temps de comptage de chaque vial est de ± 3 h. Les vials placés dans le compteur sont analysés un à un dans la chambre de comptage. La désintégration du ^{222}Rn produit du ^{218}Po et une particule alpha. Cette particule stimule les électrons

du scintillant qui libèrent des photons en revenant à un état stable. Ces photons sont captés et comptabilisés par les capteurs de la machine. Les capteurs comptabilisent également les photons émis par la désintégration du ^{218}Po en ^{214}Po . Une correction (facteur R) est donc appliquée afin de distinguer l'activité ^{222}Rn de celle des autres éléments. Le facteur R a été calibré à 1,9 (Lefebvre et al., 2013). L'activité ^{222}Rn mesurée est convertie en activité réelle (Bq/L) à l'aide de l'équation 1. L'erreur associée aux résultats analytiques d'activités ^{222}Rn obtenues est d'environ $0,025 \pm 0,03$ Bq/L (Lefebvre et al., 2013).

$$A^{222}\text{Rn}_{réelle} = \frac{A^{222}\text{Rn}_{brute}}{R_{SC} V_{eau} E_E E_S e^{-\lambda\Delta t}} \quad (1)$$

$A^{222}\text{Rn}_{réelle}$: activité réelle du ^{222}Rn (Bq/L)

$A^{222}\text{Rn}_{brute}$: activité mesurée du ^{222}Rn (cpm)

E_S : efficacité du scintillomètre

V_{eau} : volume d'eau en contact avec le scintillant (L)

E_E : efficacité de l'extraction

R_{SC} : rendement du scintillant ($R_{SC} = 0,75$)

λ : constante de désintégration du ^{222}Rn ($0,181 \text{ jours}^{-1}$)

Δt : temps écoulé entre l'échantillonnage et l'analyse (jours)

3.6 Bilan de masse avec Radin14

Le calculateur Excel Radin14 (Cook et al., 2006) est utilisé afin de calculer par bilan de masse du ^{222}Rn l'apport d'eau souterraine sur le tronçon principal des rivières à l'étude. La feuille de calcul Excel requiert les débits, les conductivités électriques et les activités ^{222}Rn à chaque point d'échantillonnage le long du tronçon principal de la rivière et des tributaires. L'activité ^{222}Rn et la conductivité électrique de l'eau souterraine, de même que la profondeur et la largeur du tronçon principal de la rivière sont également requises. Le calcul de bilan de masse tient compte de l'évaporation, du taux de dégazage, de la décroissance radioactive, des pompages dans la rivière ainsi que de la production de ^{222}Rn provenant de la zone hyporhéique. L'équation 2 représente l'équation de bilan de masse utilisée dans Radin14 pour quantifier la variation de la concentration d'un gaz dissous dans un tronçon de rivière recevant un apport d'eau souterraine (Cook et al., 2006).

$$\frac{\partial Qc}{\partial x} = Ic_i - kwc - \lambda dwc - cL + F \quad (2)$$

Q : débit (m³/j)

I : apport d'eau souterraine par unité de longueur de rivière (m³/m/j)

L : perte d'eau de surface par pompage anthropique ou recharge de la nappe (m³/m/j)

k : taux de dégazage du ²²²Rn (m/j)

F : flux de ²²²Rn à travers la zone hyporhéique (m³/m/j)

λ : constante de désintégration du ²²²Rn (j⁻¹)

w : largeur de la section de rivière (m)

d : profondeur moyenne de la rivière (m)

x : distance de l'amont (m)

c_i : activité ²²²Rn dans l'eau souterraine (mBq/L)

c : activité ²²²Rn dans la rivière à la distance x (mBq/L)

Le bilan de masse est calibré en faisant varier le taux de dégazage (k) ainsi que l'apport d'eau souterraine par unité de longueur de rivière (I). Le choix du taux de dégazage s'effectue en comparant la zone d'étude avec les valeurs de k de zones similaires dans la littérature (i.e. pente, substrat). Les valeurs de débit, de conductivité électrique ainsi que d'activité ²²²Rn sont calculées sur le tronçon de la rivière. Moreira (2016) a réalisé une analyse de sensibilité sur les paramètres du calculateur et a démontré que la largeur de la section de rivière, le taux de dégazage et l'activité en ²²²Rn dans l'eau souterraine sont les paramètres qui ont le plus grand impact sur l'émergence d'eau souterraine calculée. Pour cette raison, le flux de ²²²Rn à travers la zone hyporhéique a été négligé et l'évaporation a été posée à 1 mm/j.

Les isotopes stables n'ont pas été retenus pour les calculs de bilans de masse réalisés avec Radin14. Les variations entre les compositions isotopiques entre chacune des stations sur les tronçons ne variaient pas assez entre elles pour permettre une calibration raisonnable de Radin14. Les entrées d'eau souterraine simulées par le bilan de masse et les apports d'eau des tributaires n'expliquaient pas les compositions isotopiques mesurées sur les tronçons. Ceci pourrait être dû au fait que les compositions isotopiques de l'eau souterraine ont été mesurées lors de l'été 2019, tandis que celles des eaux de surface des quatre bassins versants ont été échantillonnées à l'été 2021. Un taux de dégazage adapté aux isotopes stables de l'eau aurait pu être posé indépendamment de celui associé

au ^{222}Rn (Gleeson et al., 2018). Ainsi, le bilan de masse réalisé à l'aide de Radin14 aurait dû être adapté pour l'utilisation des isotopes stables, ce qui aurait engendré une trop grande charge de travail additionnel. Les isotopes stables de l'eau n'ont donc pas été pris en compte lors des estimations des apports d'eau souterraine aux rivières réalisées à l'aide de Radin14.

3.7 Choix des taux de dégazage du ^{222}Rn

Le taux de dégazage (k) du ^{222}Rn est l'une des variables qui a une grande influence sur le calage du calculateur Radin14 (Cook et al., 2003). Cook et al. (2003) ont déterminé qu'un gradient de pente de l'ordre de 10 % et plus engendrait une valeur de k supérieure à 10 m/j, tandis qu'un gradient inférieur à 1 ‰ devrait engendrer une valeur de k près de 1 m/j. Un gradient de pente plus élevé combiné avec un écoulement turbulent ou avec la présence de blocs crée un remous qui amplifie le dégazage. Ces auteurs mentionnent que le vent aurait un impact négligeable sur le dégazage des petits cours d'eau. La morphologie de la rivière joue également un rôle sur le dégazage du ^{222}Rn , par exemple, un segment de rivière plus large et moins profond pourrait entraîner plus de dégazage (Zappa et al., 2003; 2007). Un portrait des taux de dégazage rapportés dans la littérature a été dressé (Tableau 5).

Les bilans de masse ^{222}Rn des quatre bassins versants ont été construits à partir des données mesurées à chaque point d'échantillonnage pour décrire les cours d'eau (largeur et profondeur des segments) ainsi que les activités ^{222}Rn et les conductivités électriques de l'eau souterraine et des tributaires. Les valeurs mesurées de débits, d'activités ^{222}Rn , et de conductivités électriques ont été utilisées pour calibrer les apports d'eau souterraine et la constante de dégazage du ^{222}Rn .

Les tronçons principaux des quatre bassins versants ont été discrétisés en intervalles de 500 m de longueur. La profondeur et la largeur des segments de rivière ont été mesurées aux points d'échantillonnage et interpolées sur tout le tronçon principal. Il est probable que des pompages soient présents dans certaines portions des cours d'eau, mais ces données ne sont pas connues et n'ont pas été prises en compte.

Tableau 5 : Taux de dégazage du ^{222}Rn vers l'atmosphère rapportés dans la littérature (modifié de Moreira, 2016).

Source	Rivière	Q initial (m ³ /s)	Profondeur moyenne (m)	Gradient de pente (%)	k (m/j)
Beaulieu et al., 2012	Ohio River, É.-U.		6 - 14		5,23
Botter et al., 2022	Rio Valfredda, Italie	0,0032	0,1	0,014	3 - 15
Cook et al., 2003	Daly River, Territoires du nord, Australie	10	1,5	0,03	1
Cook et al., 2006	Cockburn River, Australie	0,009	12	0,3	1,6
Elsinger et Moore, 1983	Pee Dee River, Caroline du sud, É.-U.			0,01	2,9 - 7,2
Ferlatte, 2011	Rivière Bécancour, Québec	7,3		0,14	1,3
Gleeson et al., 2009	Bassin versant de la rivière Tay, Ontario, Canada				0,16
Gleeson et al., 2018	Sagehen Creek, Californie, É.-U.	0,03	0,13	4,6	5,4
Hartman et Hammond, 1984	Baie San Francisco, CA, É.-U.				0,24 - 1,68
Lefebvre, 2011	Rivière Hallue, France	0,05		1,7	2,3
McDowell et Jonhson, 2018	Rivière au Columbia Malcolm Knapp Research Forest, C-B, Canada	0,0926		0,236	2 - 6
Raymond et al. 2012	Ruisseau et rivières partout aux É-U	0,54	0,28		2 - 5
Tobias et al., 2009	Suger Creek, Indiana, É.-U.	0,02	0,15	0,1	1,5
Ulseth et al. 2019	12 rivières alpines, Suisse	0,64		8.5	464
Wang et al., 2021	35 ruisseau et rivières, É.-U.	<0,5 - 200	0,02 - 2,83	0,01 - 0,67	0 - 20
Wanninkhof et al., 1992	West Fork River, Tennessee, É.-U.	0,02	0,1	4,3	5

3.8 Indice de connectivité

L'indice de connectivité développé dans ce projet s'inspire de la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987) qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination de surface et tient compte de sept paramètres hydrogéologiques et géomorphologiques. Une cote et un poids sont attribués à chacun des paramètres. La cote est attribuée selon un intervalle de 1 à 10 en fonction de la nature du paramètre, alors que le poids représente l'importance du paramètre sur la vulnérabilité de l'eau souterraine. Ainsi, un indice plus élevé implique une plus grande vulnérabilité du milieu.

L'indice de connectivité tient compte de l'ordre de Strahler (O) du cours d'eau, de la pente (P) ainsi que du substrat (S) présent dans le lit du cours d'eau. L'ordre de Strahler, la pente et le substrat ont été extraits sur une zone de 100 m de part et d'autre du cours d'eau. Une cote (c) et un poids (p) ont été attribués aux paramètres. L'indice de connectivité est calculé en multipliant la cote au poids de chacun des paramètres selon l'équation 3. Un indice de connectivité plus élevé indique un milieu plus propice à l'émergence d'eau souterraine.

$$IC = O_c O_p + P_c P_p + S_c S_p \quad (3)$$

L'indice de connectivité a été calibré manuellement à l'aide de l'ordre Strahler, de la pente et du substrat présent dans chaque segment de cours d'eau. Les itérations ont été réalisées manuellement en modifiant les poids et les cotes attribués à chacun des paramètres. Ces poids et ces cotes ont été attribués afin de refléter les liens attendus entre la présence d'une zone d'émergence et l'ordre de Strahler, la pente et le type de géologie. Ils ont été ajustés de manière à ce que les indices varient linéairement avec les variations de débits entre deux stations, ainsi que le $\delta^2\text{H}$, le $\delta^{18}\text{O}$ et le ^{222}Rn mesurés à chaque station d'échantillonnage pour les quatre bassins versants.

À titre d'exemple d'utilisation de l'indice de connectivité sur un plus grand territoire, l'indice est calculé pour tous les segments de rivières du bassin versant de la rivière du Nord, tels qu'identifiés dans le réseau hydrographique de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ).

3.9 Analyses statistiques

Les analyses statistiques réalisées sur les valeurs mesurées sur les bassins versants ont été effectuées sur R studio. L'analyse des différentes valeurs qui seront présentées à l'aide de graphiques de boîtes à moustaches au cours du prochain chapitre, a consisté en la comparaison des valeurs présentées en axe Y pour les différentes catégories présentées en axe X. Les tests ANOVA, suivis de tests Tukey ont été réalisés afin de comparer toutes les combinaisons possibles et déterminer si les valeurs de certaines catégories étaient significativement différentes ($p < 0,05$).

La démarche de calibration du bilan de masse visait à minimiser l'erreur quadratique moyenne (RMSE) à l'aide de l'équation 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(valeur_{mesurée} - valeur_{simulée})^2}{n}} \quad (4)$$

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de débits et de traceurs naturels de l'eau pour chacun des bassins versants à l'étude sont présentés. Le volume d'eau souterraine qui alimente la rivière, calculé par bilan de masse, est présenté pour chaque rivière. L'émergence d'eau souterraine calculée à l'aide du bilan de masse Radin14 est présentée pour chaque bassin versant. Le développement et la validation de l'indice de connectivité nappe-rivière sont ensuite présentés pour les quatre bassins versants. Un exemple de l'utilité de l'indice de connectivité sur un plus grand territoire est présenté pour le bassin versant de la rivière du Nord.

4.2 Évolution amont aval des débits

Les débits mesurés sur les tronçons principaux et les tributaires des quatre bassins versants étudiés (Tableau 6) ont été comparés entre eux à l'aide du test Tukey (Figure 25). Les débits des tronçons principaux des bassins versants Simon et Saguy sont significativement plus élevés ($p < 0,05$; test de Tukey) que les débits mesurés sur les bassins Vases et Lanthier. Les débits mesurés sur les tributaires de la rivière à Simon sont significativement plus élevés ($p < 0,05$; test de Tukey) que les débits mesurés sur les tributaires de la rivière Saguy.

Tableau 6 : Débits mesurés sur les bassins versants à l'étude.

BV	Vases		Simon		Saguy		Lanthier	
	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.
Débit min. (m ³ /s)	0,017	0,001	0,129	0,001	0,405	0,001	0,010	0,001
Débit max. (m ³ /s)	0,199	0,123	1,180	0,232	0,750	0,061	0,140	0,040
Débit moy. (m ³ /s)	0,088	0,033	0,574	0,053	0,546	0,009	0,054	0,007

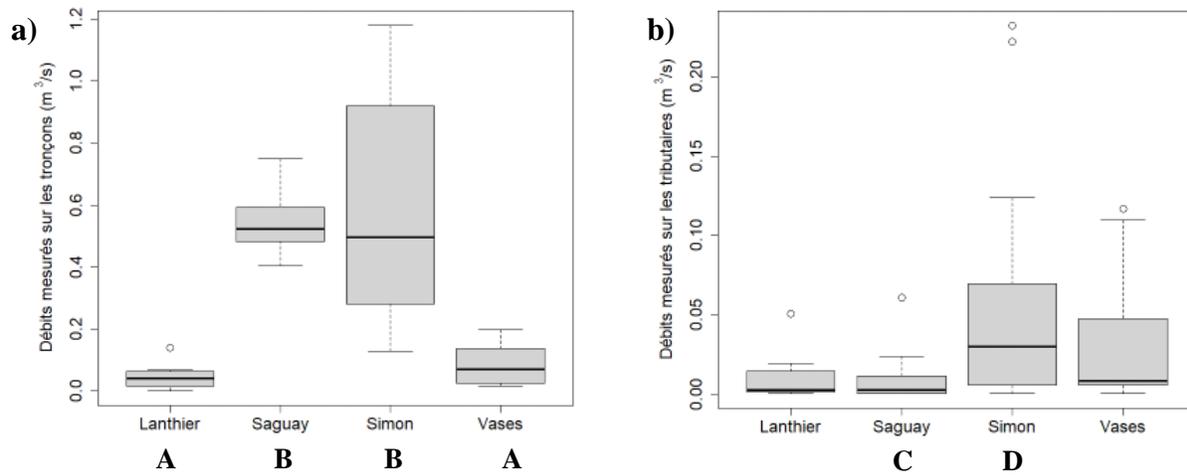


Figure 25 : Comparaison des débits mesurés sur les quatre bassins versants a) tronçons principaux et b) tributaires. A et B, C et D : Ensembles statistiquement différents ($p < 0,05$).

Ruisseau des Vases

Le débit minimal du tronçon principal du ruisseau des Vases est retrouvé à l'amont de la rivière ($0,017 \text{ m}^3/\text{s}$), alors qu'un débit maximal de $0,199 \text{ m}^3/\text{s}$ est retrouvé au 8^e km, avant son exutoire (Figure 26a). Le débit moyen du tronçon principal est de $0,088 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que celui de ses tributaires est de $0,033 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau 6). Les débits des tributaires du ruisseau des Vases sont inférieurs d'un ordre de grandeur aux débits mesurés sur son tronçon principal, à l'exception des tributaires B ($0,123 \text{ m}^3/\text{s}$) et C ($0,083 \text{ m}^3/\text{s}$). Respectivement, les tributaires B et C rejoignent le tronçon principal aux kilomètres 7,7 et 11,4.

Les deux premiers kilomètres du tronçon principal du ruisseau des Vases sont caractérisés par une pente de 1 %. L'augmentation de débit associée à ce segment est de $+0,008 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre 2 km et 5,6 km, le débit augmente de $+0,046 \text{ m}^3/\text{s}$. La pente est de 7 % entre 2 et 3 km et de 2,86 % entre 3 et 5,6 km. À partir de 5,6 km et jusqu'à l'exutoire du ruisseau, la pente est nulle. Le segment du ruisseau entre 5,6 et 8,3 km est caractérisé par une augmentation du débit de $+0,128 \text{ m}^3/\text{s}$, alors qu'entre le segment à 8,3 km et l'exutoire, le débit diminue de $-0,025 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rivière à Simon

Le débit le plus élevé est retrouvé à l'exutoire de la rivière à Simon, avec un débit maximal de $1,18 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit minimal du tronçon principal est retrouvé à l'amont de la rivière avec une valeur

de 0,13 m³/s. Le débit moyen est de 0,574 m³/s sur le tronçon principal et de 0,053 m³/s sur ses affluents (Tableau 6). Le tributaire sud rejoint le tronçon principal de la rivière entre les stations 8 et 8,5 à la distance de 10,6 km et présente le débit le plus élevé de sa catégorie avec 0,232 m³/s (Figure 26b).

La pente du tronçon principal de la rivière à Simon entre l'amont et le 12^e km est de 0,9 %. Du 9^e au 21^e km, la pente est de 0,64 %, puis elle augmente du 21^e au 23^e km (1,2 %). Le débit du tronçon principal augmente graduellement de l'amont jusqu'au 9^e km (+0,201 m³/s), puis augmente drastiquement du 9^e au 12^e km (+0,330 m³/s). Le débit diminue de -0,198 m³/s entre le 12^e et le 13^e km, puis augmente de +0,507 m³/s entre 13 et 14 km. Le même phénomène est observé entre les kilomètres 13 et 17,5 (-0,339 m³/s) et les kilomètres 17,5 et 23 (+0,6 m³/s).

Rivière Sagouay

Le débit moyen du tronçon principal de la rivière Sagouay (Figure 26c) est de 0,55 m³/s. Les débits minimaux et maximaux du tronçon principal de la rivière Sagouay sont de 0,405 m³/s et 0,750 m³/s et sont respectivement retrouvés à l'amont et à l'aval de la rivière (Tableau 6). Les débits des tributaires mesurés sur la rivière Sagouay sont tous inférieurs d'un ordre de grandeur aux débits mesurés sur son tronçon principal, avec un débit moyen de 0,009 m³/s. Situé quelque peu avant le 6^e km du tronçon principal, le tributaire S présente le débit le plus élevé de sa catégorie (0,061 m³/s).

Une augmentation de débit de +0,118 m³/s est observée entre l'amont du tronçon principal et le 3^e km. La pente associée à ce segment est de 0,39 %. Du 3^e au 6^e km du tronçon principal, le dénivelé est moins abrupt avec une pente de 0,06 %. L'augmentation de débit associée à ce segment est de +0,076 m³/s. La pente est plus abrupte (0,89 %) du 6^e au 7^e km, puis s'adoucit du 7^e au 9^e km (0,21 %). Les variations de débits associées à ces segments du tronçon sont respectivement de -0,015 m³/s et +0,166 m³/s.

Ruisseau Lanthier

Le débit moyen du tronçon principal du ruisseau Lanthier est de 0,054 m³/s, alors que celle de ses tributaires est de 0,007 m³/s (Tableau 6). Le débit minimal de 0,01 m³/s du tronçon principal est

retrouvé à son amont (Figure 26d). Les débits des tributaires mesurés sur le ruisseau Lanthier sont inférieurs d'un ordre de grandeur aux débits mesurés sur son tronçon principal, à l'exception du tributaire G où est retrouvé le débit de $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, le plus élevé des tributaires.

Une augmentation du débit de $+0,058 \text{ m}^3/\text{s}$ est observée entre l'amont du tronçon principal et son 4^e km. Ce segment de 4 km du tronçon principal présente une pente de 2 %. Du 4^e au 8^e km du tronçon principal, le débit diminue graduellement de $-0,01 \text{ m}^3/\text{s}$. La pente associée à ce segment est de 0,27 %. Le débit du segment retrouvé entre le 8^e km et le kilomètre 9,9 chute de $-0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ sur une pente d'environ 1 %. Le dernier kilomètre du tronçon principal présente une importante augmentation de débit de $+0,11 \text{ m}^3/\text{s}$. La pente de ce segment est nulle.

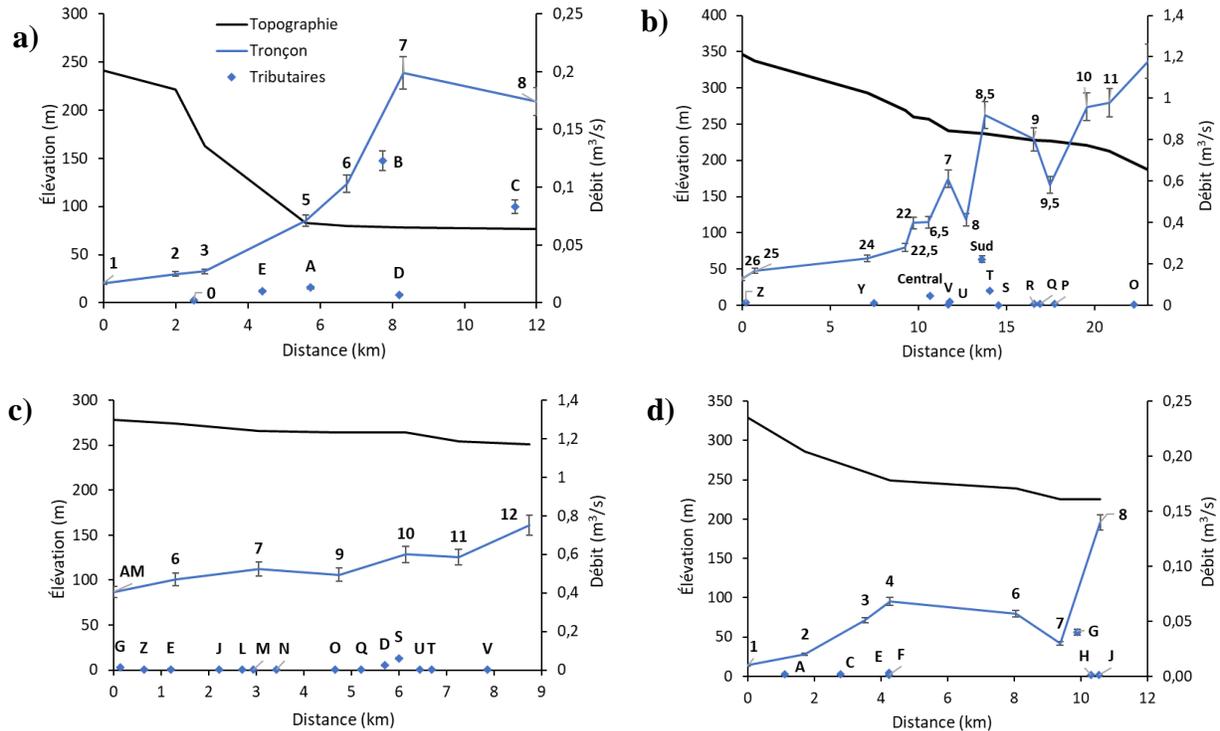


Figure 26 : Débits mesurés dans les bassins versants étudiés a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires (voir figures 15, 16, 17 et 18 pour la position des tributaires dans l'ensemble du réseau hydrographique). Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à l'appareil de mesure. L'ordre de grandeur des débits des panneaux a) et d) différent de ceux retrouvés aux panneaux b) et c).

4.3 Évolution amont aval des traceurs d'eau souterraine

4.3.1 ^{222}Rn

Les activités ^{222}Rn mesurées sur les tronçons principaux et les tributaires des quatre bassins versants étudiés (Tableau 7) ont été comparées entre elles à l'aide du test Tukey. Les activités ^{222}Rn dans le tronçon principal de la rivière Saguy et de ses tributaires sont significativement plus élevées ($p < 0,05$; test de Tukey) que celles de la rivière à Simon, du ruisseau des Vases et du ruisseau Lanthier (Figure 27).

Tableau 7 : Activités ^{222}Rn mesurées sur les bassins versants à l'étude.

BV	Vases		Simon		Saguy		Lanthier	
	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.
$^{222}\text{Rn min.}$ (Bq/L)	0,01	0,04	0,00	0,02	0,18	0,12	0,17	0,23
$^{222}\text{Rn max.}$ (Bq/L)	0,32	1,71	1,07	0,58	11,12	11,30	2,09	1,35
$^{222}\text{Rn moy.}$ (Bq/L)	0,16	0,51	0,19	0,16	2,61	2,70	0,61	0,65

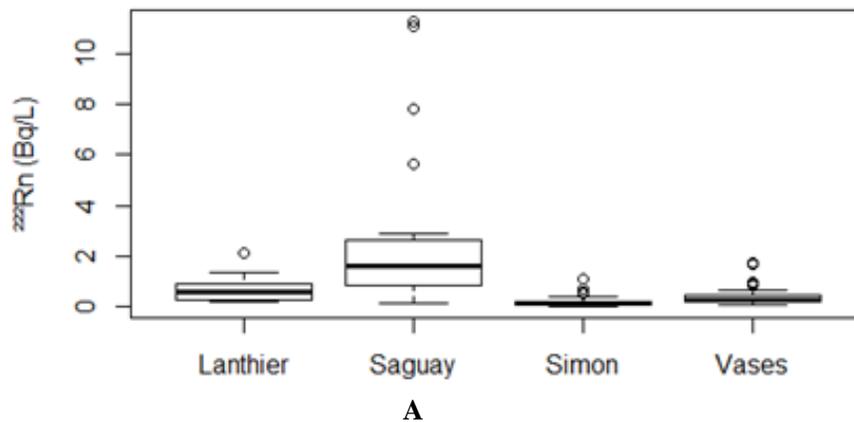


Figure 27 : Comparaison des activités ^{222}Rn dans l'eau des rivières par bassin versant. A : ^{222}Rn significativement plus élevé ($p < 0,05$).

Ruisseau des Vases

L'activité ^{222}Rn moyenne du tronçon principal est de 0,16 Bq/L, tandis que celle de ses tributaires est de 0,51 Bq/L (Tableau 7). L'activité ^{222}Rn minimale du tronçon principal, soit 0,01 Bq/L est retrouvée à la station 1 et l'activité ^{222}Rn maximale de 0,32 B/L est retrouvée à la station 2 (Figure 28a). Le tributaire E présente l'activité ^{222}Rn la plus élevée, soit 1,71 Bq/L. Les tributaires B et C ont également des activités ^{222}Rn élevées, soit 0,36 et 0,39 Bq/L.

Le seul pic d'activité ^{222}Rn observé sur le ruisseau des Vases est retrouvé à la station 2, située à 2 km de distance de l'amont (Figure 28a). Les deux premiers kilomètres du tronçon principal du ruisseau des Vases sont caractérisés par une pente de 1 %. L'augmentation de l'activité ^{222}Rn associée à ce segment est de +0,13 Bq/L. Du 2^e km au kilomètre 5,6, la pente est de 3,82 %. Du kilomètre 5,6 jusqu'à l'exutoire du ruisseau, la pente est nulle. Entre le 2^e et le 12^e km, une diminution de l'activité ^{222}Rn graduelle d'environ -0,03 Bq/L/km est observée.

Rivière à Simon

L'activité ^{222}Rn moyenne du tronçon principal est de 0,19 Bq/L, tandis que celle de ses tributaires est de 0,16 Bq/L (Tableau 7). L'activité ^{222}Rn minimale du tronçon principal est retrouvée à la station 7, avec une activité nulle (Figure 28b). L'activité ^{222}Rn maximale de 1,07 Bq/L du tronçon principal est retrouvée à la station 22. Les tributaires V et P ont les activités ^{222}Rn les plus élevées, soit 0,58 et 0,56 Bq/L.

La pente du tronçon principal de la rivière à Simon entre l'amont et le 12^e km est de 0,9 %. Du 9^e au 21^e km, la pente est de 0,64 %, puis elle augmente du 21^e au 23^e km (1,2 %). L'activité ^{222}Rn du tronçon principal augmente graduellement de l'amont jusqu'au 7^e km (+0,459 Bq/L), puis diminue drastiquement au 9^e kilomètre. Un pic d'activité ^{222}Rn de 1,07 Bq/L est retrouvé au kilomètre 9,7 du tronçon principal. Un second pic d'activité de 0,69 Bq/L est observé à une distance de 13,8 km depuis l'amont du tronçon principal. À l'exception de ces deux pics, l'activité ^{222}Rn sur le segment de rivière entre le 9^e et le 23^e km est de 0,04 Bq/L en moyenne.

Rivière Saguary

L'activité ^{222}Rn la plus élevée est observée sur la rivière Saguary, avec une valeur maximale d'environ 11 Bq/L. Cette valeur est retrouvée au point d'échantillonnage 10 (tronçon principal) ainsi que dans le tributaire J (Figure 28c). L'activité ^{222}Rn moyenne du tronçon principal est de 2,61 Bq/L, tandis que celle de ses tributaires est 2,7 Bq/L (Tableau 7). L'activité ^{222}Rn minimale du tronçon principal, soit 0,18 Bq/L, est retrouvée à la station AM. Les tributaires J, M et T ont les activités ^{222}Rn les plus élevées avec une moyenne de 9,25 Bq/L, alors que les tributaires E, U et V ont les activités ^{222}Rn les plus basses, avec une moyenne de 0,411 Bq/L. Les autres tributaires ont une activité moyenne de 1,51 Bq/L.

Une augmentation de l'activité ^{222}Rn de +0,93 Bq/L est observée entre l'amont du tronçon principal et le 3^e km. La pente associée à ce segment est de 0,39 %. Du 3^e au 6^e km du tronçon principal, le dénivelé est moins abrupt avec une pente de 0,06 %. L'activité ^{222}Rn entre les kilomètres 3 et 4,8 diminue de -0,19 Bq/L. Une augmentation importante de +10,06 Bq/L de l'activité ^{222}Rn est observée entre les kilomètres 4,8 et 6. La pente est plus abrupte (0,89 %) du 6^e au 7^e km, puis s'adoucit du 7^e au 9^e km (0,21 %). Les variations de ^{222}Rn associées sont respectivement de -8,65 Bq/L et -0,62 Bq/L.

Ruisseau Lanthier

L'activité ^{222}Rn moyenne du tronçon principal est de 0,61 Bq/L, tandis que celle de ses tributaires est de 0,65 Bq/L (Tableau 7). L'activité ^{222}Rn minimale du tronçon principal est retrouvée aux stations 6 et 7, avec une valeur de 0,17 Bq/L (Figure 28d). L'activité ^{222}Rn maximale du tronçon principal, soit 2,09 Bq/L, est retrouvée à la station 3. Le tributaire E présente l'activité ^{222}Rn la plus élevée et afflue sur le tronçon principal à une distance de 9,9 km de l'amont du ruisseau. Les tributaires A et J ont les activités les moins élevées, soit 0,23 et 0,27 Bq/L respectivement.

L'activité ^{222}Rn à l'amont du ruisseau est de 0,49 Bq/L. Une diminution de -0,24 Bq/L est observée entre l'amont et le 2^e km. Un pic d'augmentation de +1,84 Bq/L de l'activité est retrouvé à la station 3, située au kilomètre 3,5. L'activité ^{222}Rn diminue de -1,19 Bq/L entre les stations 3 et 4, cette dernière étant située à 4 km de l'amont du ruisseau. Ce segment de 4 km du ruisseau présente une

penne de 2 %. La penne du tronçon entre les kilomètes 4 et 10,5 est de 0,26 %. En aval du 4^e kilomète, l'activité ^{222}Rn diminue graduellement pour se stabiliser à une moyenne de 0,18 Bq/L aux stations 6, 7 et 8.

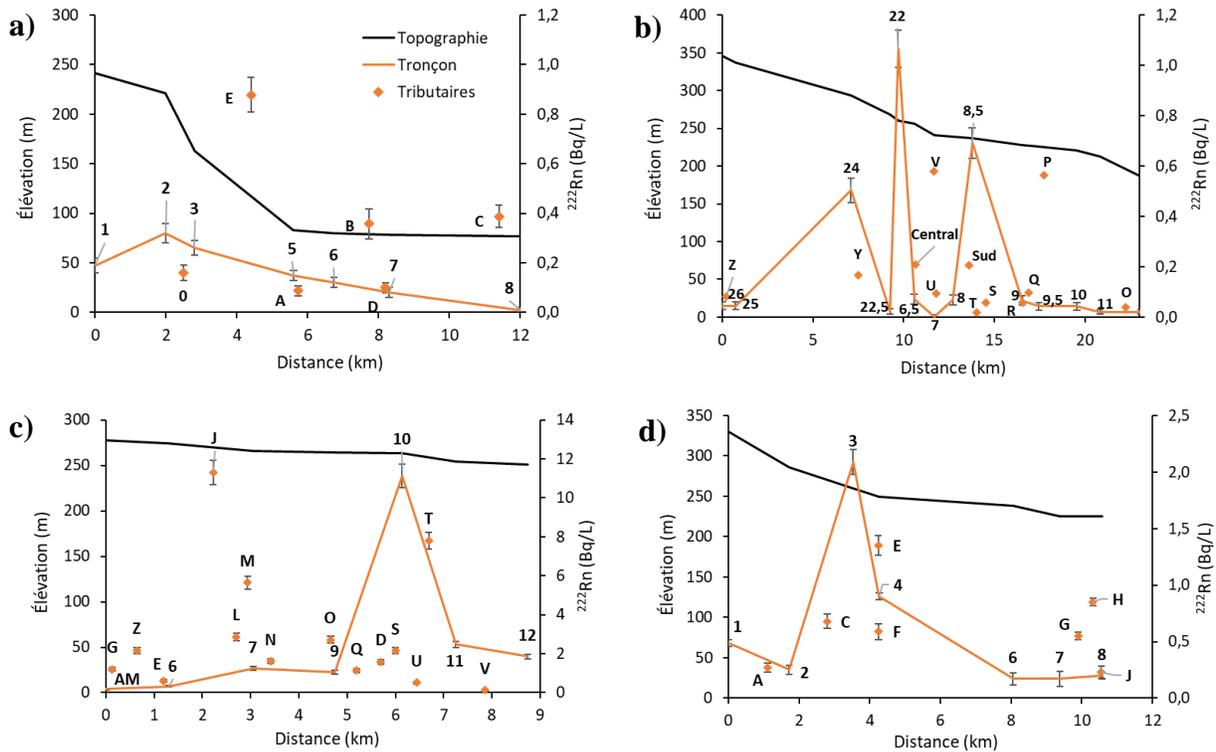


Figure 28 : Activités ^{222}Rn mesurées dans les bassins versants étudiés a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à la méthode analytique. Les activités ^{222}Rn des panneaux a) et b) sont du même ordre de grandeur. Cet ordre de grandeur diffère de ceux retrouvés aux panneaux c) et d).

4.3.2 Conductivité électrique

Les conductivités électriques (CE) mesurées sur les tronçons principaux et les tributaires des quatre bassins versants étudiés (Tableau 8) ont été comparées entre elles à l'aide du test Tukey. Les conductivités électriques mesurées sur la rivière Saguay et ses tributaires sont significativement plus faibles ($p < 0,05$) que celles mesurées sur les trois autres bassins versants étudiés (Figure 29).

Tableau 8 : Conductivités électriques mesurées sur les bassins versants à l'étude.

BV	Vases		Simon		Saguay		Lanthier	
	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.
CE min. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	39,9	26,8	85,6	41,9	74,5	35,3	89,8	96,0
CE max. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	187,2	476,0	165,1	428,0	79,3	121,5	152,0	507,0
CE moy. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	98,2	118,4	124,9	239,5	76,8	55,9	123,9	232,7

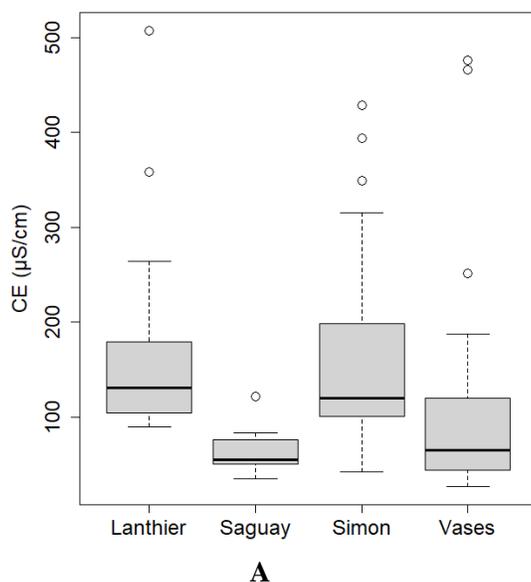


Figure 29 : Comparaison de la conductivité électrique mesurée par bassin versant. A : CE significativement plus petite ($p < 0,05$).

Ruisseau des Vases

La conductivité électrique moyenne du tronçon principal est de $98,2 \mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que celle de ses tributaires est de $118,4 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 8). La CE minimale du tronçon principal, soit $39,9 \mu\text{S}/\text{cm}$, est retrouvée à l'amont du ruisseau et la CE maximale de $187,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ est retrouvée à l'exutoire (Figure 30a). Le tributaire C présente la CE la plus élevée, soit $466 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les CE mesurées sur les autres tributaires sont toutes inférieures à celles mesurées sur le tronçon principal.

Les deux premiers kilomètres du tronçon principal du ruisseau des Vases sont caractérisés par une pente de 1 %. L'augmentation de la CE associée à ce segment est de $+16,3 \mu\text{S}/\text{cm}$. Du 2^e au 3^e km, la CE diminue de $-5,9 \mu\text{S}/\text{cm}$. La pente associée à ce segment est de 2%. Entre 3 et 5,6 km, la CE augmente de $+62,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ et la pente est de 2,85 %. À partir de 5,6 km jusqu'à l'exutoire du ruisseau, la pente est nulle. Le segment entre 5,6 et 8,3 km est caractérisé par une augmentation de la CE de $+4,6 \mu\text{S}/\text{cm}$. Sur le segment situé entre 8,3 km et l'exutoire, une augmentation plus prononcée de la CE est observée ($+64,2 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Rivière à Simon

La CE moyenne du tronçon principal est de $124,9 \mu\text{S}/\text{cm}$ tandis que celle de ses tributaires est $239,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 8). La CE minimale de $85,6 \mu\text{S}/\text{cm}$ du tronçon principal est retrouvée à la station 22,5 (Figure 30b). La CE maximale du tronçon principal de $165,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ est retrouvée à l'exutoire de la rivière. La plupart des tributaires ont une CE supérieure à celles retrouvées sur le tronçon principal.

La pente du tronçon principal de la rivière à Simon entre l'amont et 12 km est de 0,9 %. De 9 à 21 km, la pente est de 0,64 %, puis elle est plus prononcée du 21^e au 23^e km (1,2 %). Une diminution graduelle de la CE ($-28 \mu\text{S}/\text{cm}$) est retrouvée sur les premiers 9 km du tronçon principal. Une augmentation de la CE de $+49 \mu\text{S}/\text{cm}$ se produit entre 9 et 12,8 km. Sur le segment suivant (12,8 à 17,5 km), la CE demeure relativement stable et ne présente que de légères variations. Une légère augmentation de $+15 \mu\text{S}/\text{cm}$ est observée entre 17,5 km et l'exutoire de la rivière.

Rivière Sagway

La CE moyenne du tronçon principal de la rivière Sagway est de $76,8 \mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que celle de ses tributaires est de $55,9 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 8). La CE minimale du tronçon principal, soit $74,5 \mu\text{S}/\text{cm}$, est retrouvée à la station 10 et la CE maximale de $79,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ est retrouvée à son exutoire. La CE du tronçon principal reste assez stable tout au long du tronçon principal de la rivière Sagway (Figure 30c). Tous les tributaires ont une CE inférieure à celles retrouvées sur le tronçon principal de la rivière, à l'exception du tributaire T dont la CE est de $121,5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Ruisseau Lanthier

La CE moyenne du tronçon principal du ruisseau Lanthier est de $123,9 \mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que celle de ses tributaires est de $232,7 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 8). La CE minimale du tronçon principal est retrouvée à son amont avec une valeur de $89,8 \mu\text{S}/\text{cm}$. La CE maximale du tronçon principal, soit $152 \mu\text{S}/\text{cm}$, est retrouvée à l'exutoire du ruisseau (Figure 30d). Les tributaires E, H et J présentent les CE les plus élevées, soit 358 , 507 et $264 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement. Les CE retrouvées sur les autres tributaires sont dans le même intervalle que celles retrouvées sur le tronçon principal.

Une augmentation de la CE de $+29 \mu\text{S}/\text{cm}$ est observée entre l'amont du ruisseau et le kilomètre 3,5. Ce segment de 3,5 km du tronçon principal présente une pente de 1 %. La pente du tronçon entre 3,5 et 10,5 km est de 0,38 %. En aval de 3,5 km, une augmentation graduelle de la CE est observée jusqu'à 9 km ($+33,2 \mu\text{S}/\text{cm}$). Une légère diminution de la CE, soit $-11,2 \mu\text{S}/\text{cm}$, est retrouvée entre 9 km et l'exutoire du ruisseau.

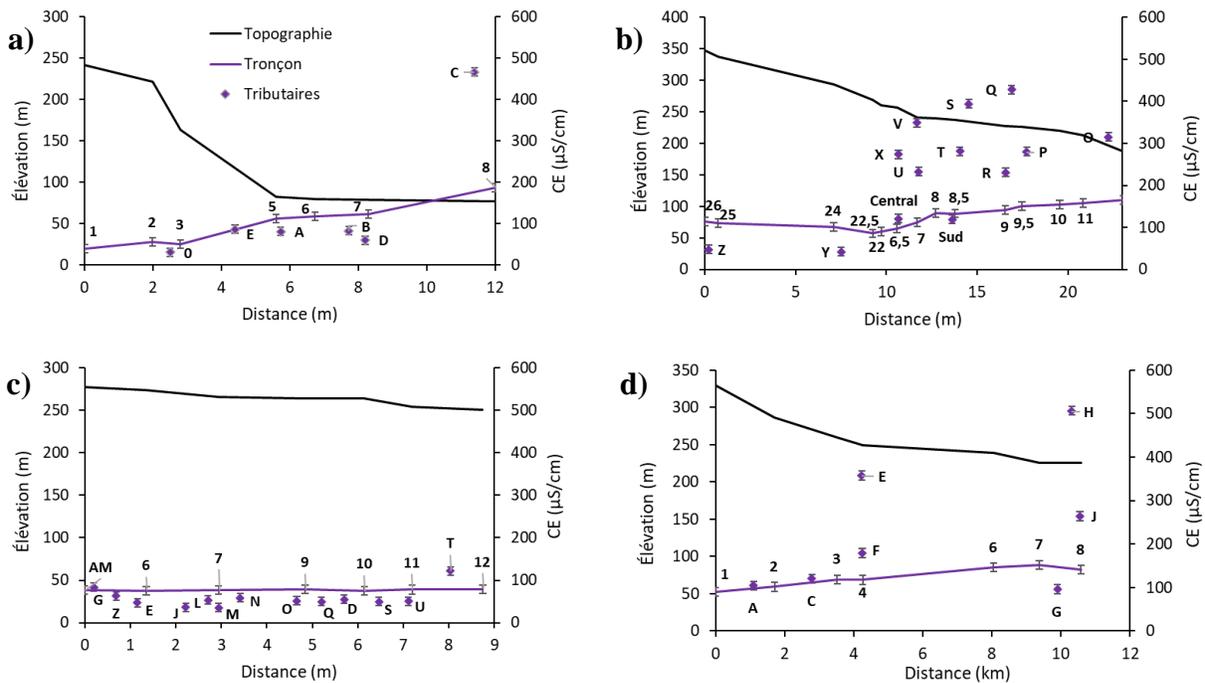


Figure 30 : Conductivité électrique mesurée dans les bassins versants étudiés a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent l'incertitude liée à l'appareil de mesure.

4.3.3 Isotopes stables de l'eau

Les résultats analytiques des isotopes stables de l'eau échantillonnés sur les tronçons principaux et les tributaires des quatre bassins versants étudiés ont été comparés à l'aide du test Tukey (Tableau 9). Les compositions isotopiques de l'eau des tronçons principaux et de leurs tributaires pour le $\delta^2\text{H}$ (Figure 31a) sont statistiquement différentes ($p < 0,05$; test de Tukey) pour tous les bassins versants étudiés. La comparaison des résultats de $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 31b) des quatre bassins versants révèle que les bassins Saguay et Lanthier ainsi que Vases et Simon ne sont pas significativement différents ($p > 0,05$).

Tel qu'attendu les valeurs de $\delta^2\text{H}$ (Figure 32) et de $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 33) sont conjointement plus enrichies ou plus appauvries selon les stations échantillonnées. Elles varient selon les mêmes tendances tout au long des tronçons des quatre rivières. Les ratios isotopiques varient entre les tronçons principaux et leurs affluents.

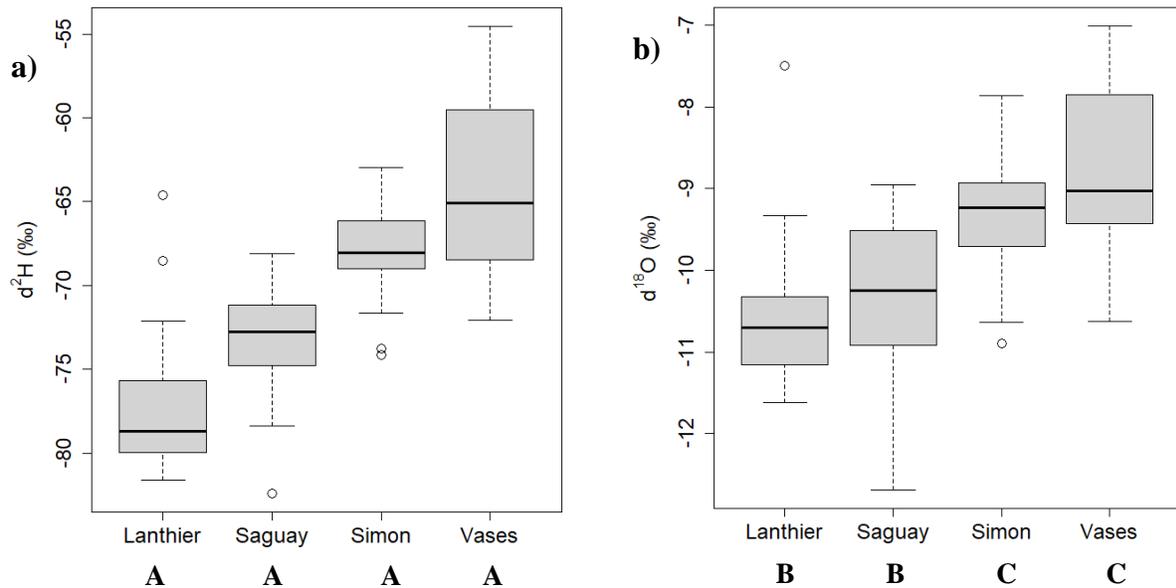


Figure 31 : Comparaison des compositions isotopiques des bassins versants étudiés a) $\delta^2\text{H}$ b) $\delta^{18}\text{O}$. A : Ensembles significativement différents ($p < 0,05$). B et C : Ensembles significativement différents ($p < 0,05$).

Tableau 9 : $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mesurés sur les bassins versants à l'étude.

BV		Vases		Simon		Saguay		Lanthier	
		Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.	Tronçon	Trib.
$\delta^2\text{H}$	min. (‰)	-72,0	-72,0	-68,9	-74,1	-76,7	-82,4	-79,7	-81,6
	max. (‰)	-64,6	-54,5	-63,9	-63,0	-72,2	-68,1	-64,5	-68,5
	moy. (‰)	-66,7	-63,2	-67,5	-68,1	-73,7	-73,0	-75,7	-77,9
$\delta^{18}\text{O}$	min. (‰)	-10,6	-10,5	-9,8	-10,9	-12,7	-11,7	-11,2	-11,6
	max. (‰)	-7,4	-7,0	-8,6	-8,1	-9,5	-9,0	-7,5	-9,3
	moy. (‰)	-9,0	-8,7	-9,1	-9,4	-10,5	-10,3	-10,2	-10,8

Ruisseau des Vases

La composition isotopique moyenne du tronçon principal est de $-66,7$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-9,0$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$), tandis que celle de ses tributaires est quelque peu enrichie, avec des valeurs de $-63,2$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-8,7$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) (Tableau 9). La composition isotopique minimale du ruisseau, soit -72 ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-10,6$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$), est retrouvée à la station 5. La composition isotopique maximale de $-64,6$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-7,4$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) est retrouvée à la station 3 (Figure 32a et 33a). Presque tous les tributaires présentent des valeurs de $\delta^2\text{H}$ et de $\delta^{18}\text{O}$ plus enrichies que celles retrouvées sur le tronçon principal, à l'exception du tributaire D dont la composition isotopique est de $-68,5$ ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-10,2$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$).

Les deux premiers kilomètres du tronçon principal du ruisseau des Vases sont caractérisés par une pente de 1 %, suivis d'une pente de 2 % entre 2 et 3 km. Un enrichissement de la composition isotopique de l'eau du tronçon principal est observé entre l'amont du bassin versant et la station 3. Entre 3 et 5,6 km, la pente est de 2,85 %. De 5,6 km jusqu'à l'exutoire du ruisseau, la pente est nulle.

Un pic d'appauvrissement de l'eau de -72 ‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-10,6$ ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) est observé à la station 5, située entre 3 et 6,7 km. À 6,7 km (station 6), la composition isotopique de l'eau en $\delta^2\text{H}$ est très similaire à celle retrouvée à la station du 3^e km. Pour le $\delta^{18}\text{O}$, la valeur retrouvée à la station 6 est

plus enrichie que celle retrouvée à la station 3. Un appauvrissement de la composition de l'eau de $-67,3\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) et $-9,2\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) est observé à la station 7 (8,3 km) puis reste stable jusqu'à l'exutoire.

Rivière à Simon

La composition isotopique moyenne du tronçon principal est de $-67,5\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) et $-9,1\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) tandis que celle de ses tributaires est un peu plus appauvrie, soit $-68,1\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) et $-9,4\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) (Tableau 9). La composition isotopique minimale de l'eau du tronçon principal ($-68,9\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$; $-9,8\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$) est retrouvée à la station 8,5. La composition isotopique maximale de l'eau du tronçon principal ($-63,9\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$; $-8,6\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$) est retrouvée à la station 9 (Figure 32b et 33b). Les compositions isotopiques de presque tous les tributaires sont dans le même intervalle que celles du tronçon principal, à l'exception du tributaire U, qui est très appauvri ($-74,1\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$; $-10,9\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$).

Un appauvrissement important de la composition isotopique de l'eau du tronçon principal est observé sur le segment du 1^{er} kilomètre, entre l'amont de la rivière et la station 25. L'eau est rapidement enrichie entre 1 et 7 km (stations 25 et 26). Les valeurs de compositions isotopiques retrouvées de 7 km jusqu'à l'exutoire du tronçon principal prennent une allure en dent de scie, ce qui complique la description des résultats.

Un pic de composition enrichie est retrouvé à la station 9 ($-63,9\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$; $-8,1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$), à 16,5 km depuis l'amont du tronçon principal. Les compositions de l'eau des autres stations situées entre 7 km et l'exutoire sont très variables et s'alignent autour de la moyenne de composition isotopique de la rivière.

Rivière Saguay

La composition isotopique moyenne du tronçon principal de la rivière Saguay est de -73‰ ($\delta^2\text{H}$) et $-10,3\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$), alors que celle de ses tributaires est de $-73,7\text{‰}$ ($\delta^2\text{H}$) et $-10,5\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) (Tableau 9). La composition isotopique maximale du tronçon principal ($-72,2\text{‰}$ $\delta^2\text{H}$; $-9,5\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$) est retrouvée à son exutoire. Le tributaire J présente la valeur de $\delta^2\text{H}$ la plus appauvrie, soit $-82,4\text{‰}$. La valeur de $\delta^{18}\text{O}$ minimale des tributaires, soit $-11,7\text{‰}$, est retrouvée sur le tributaire Q. Les autres compositions observées sur les tributaires sont du même intervalle que celles retrouvées sur le tronçon de la rivière.

La composition isotopique de l'eau de la rivière Saguay s'enrichit graduellement d'amont en aval (Figure 32c et 33c). Un pic à la composition appauvrie est observé à la station 10, située à environ 6 km de l'amont de la rivière. Ce pic correspond à la composition isotopique minimale retrouvée sur la rivière Saguay ($-76,7 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$; $-12,7 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$).

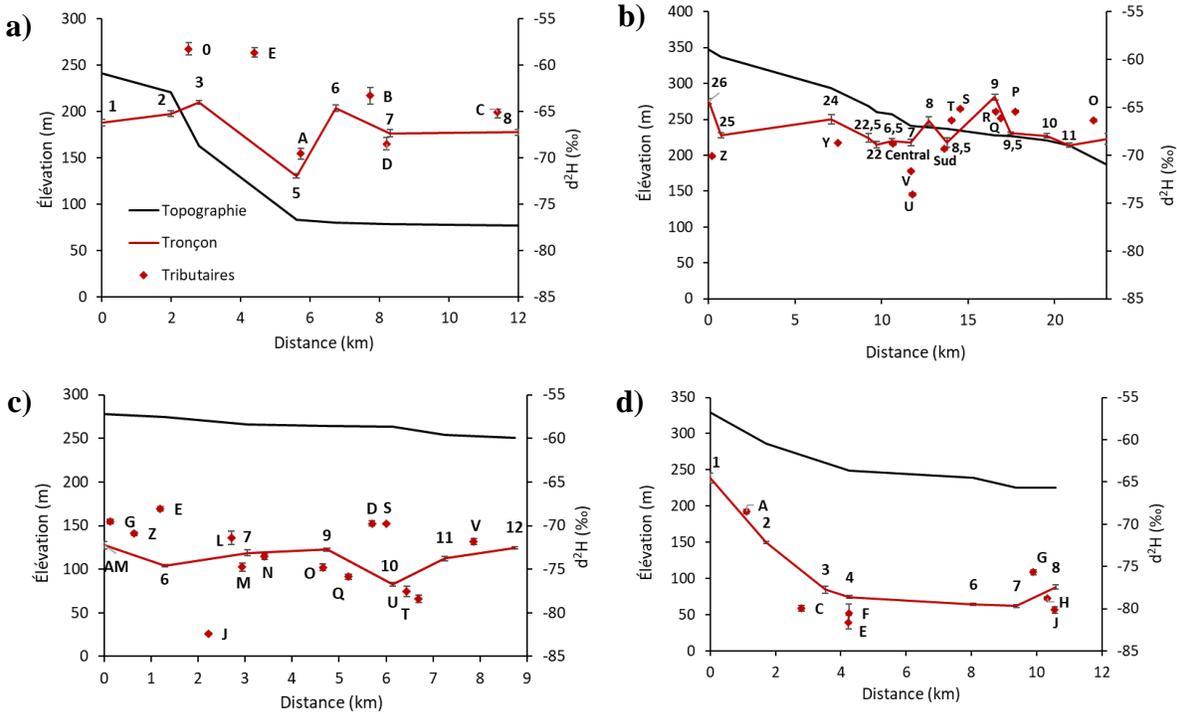


Figure 32 : $\delta^2\text{H}$ dans l'eau de surface sur a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées à la méthode analytique.

Ruisseau Lanthier

La composition isotopique moyenne du tronçon principal est de $-75,7 \text{ ‰ } (\delta^2\text{H})$ et $-11,2 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})$, tandis que celle de ses tributaires est de $-77,9 \text{ ‰ } (\delta^2\text{H})$ et $-10,8 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})$ (Tableau 9). La composition isotopique minimale du tronçon principal est retrouvée à la station 7 ($-79,7 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$; $-11,2 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$). La composition isotopique maximale du tronçon, soit $-64,5 \text{ ‰ } (\delta^2\text{H})$ et $-7,5 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})$, est retrouvée à l'amont du ruisseau (Figure 32d et 33d). Le tributaire A présente la composition isotopique la plus enrichie de sa catégorie ($-68,5 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$; $-9,3 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$), alors que le tributaire E présente la composition la plus appauvrie ($-81,6 \text{ ‰ } \delta^2\text{H}$; $-11,6 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$).

Un appauvrissement de la composition isotopique de l'eau est observé entre l'amont du ruisseau et la station 3, qui est située à 3,5 km. Ce segment de 3,5 km du tronçon principal présente une pente de 1 %. La différence de compositions isotopiques entre ces deux stations est de -13,2 ‰ ($\delta^2\text{H}$) et de -3,2 ‰ ($\delta^{18}\text{O}$). La pente du tronçon entre 3,5 et 10,5 km est de 0,38 %. Entre l'eau des stations situées à 3,5 km et 9 km, un appauvrissement graduel de la composition isotopique est observé (-2 ‰ $\delta^2\text{H}$; -0,4 ‰ $\delta^{18}\text{O}$). Un enrichissement de l'eau de +2,2 ‰ ($\delta^2\text{H}$) et de +0,6 ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) est retrouvé sur le segment du ruisseau situé entre 9 km et l'exutoire du ruisseau.

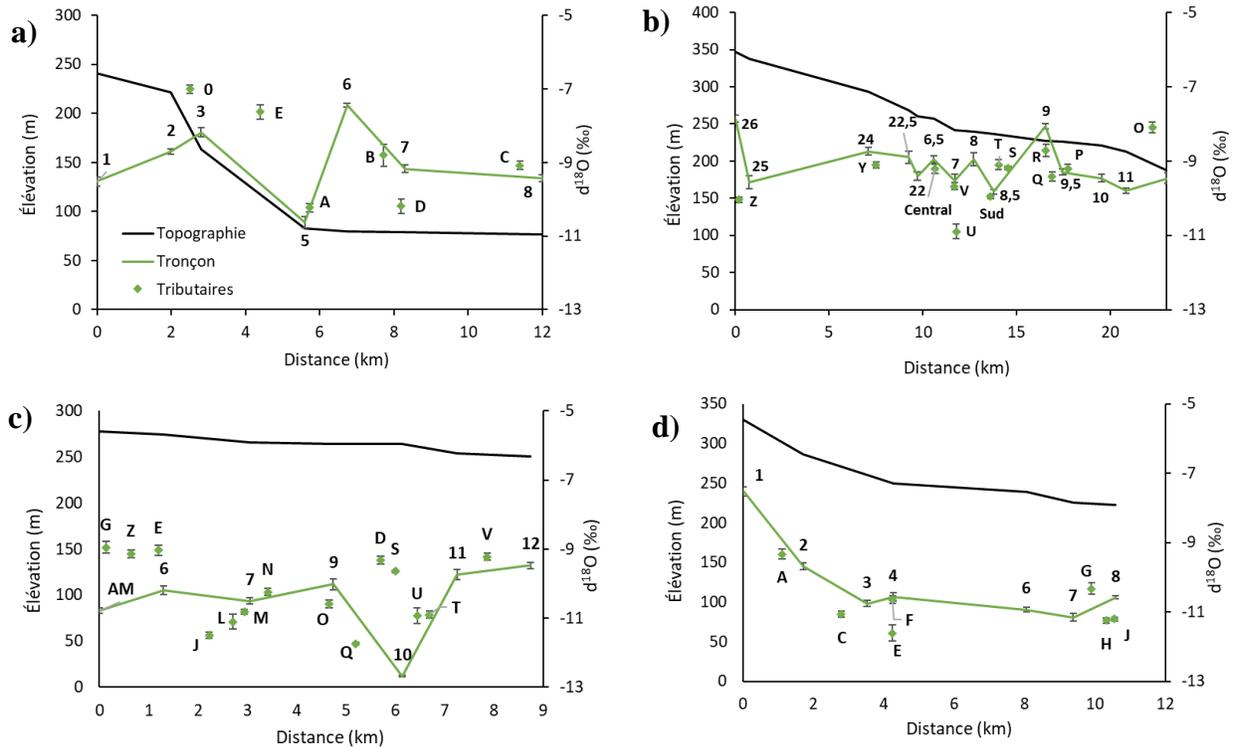


Figure 33 : $\delta^{18}\text{O}$ dans l'eau de surface sur a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay, d) ruisseau Lanthier. Les chiffres représentent les stations de mesures du débit sur les tronçons principaux et les lettres représentent les tributaires. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées à la méthode analytique.

4.4 Quantification de l'émergence d'eau souterraine

4.4.1 Ruisseau des Vases

Les débits, la conductivité électrique et l'activité ^{222}Rn mesurés sur le ruisseau des Vases et ses tributaires servent de données d'entrée et de valeurs mesurées pour le calage du bilan de masse Radin14 (Tableau 10). La conductivité électrique et l'activité ^{222}Rn mesurées dans les deux puits

échantillonnés dans le cadre de ce projet ont été appliquées à l'eau souterraine du bilan de masse (CE_I et C_I). Le taux de dégazage du ^{222}Rn a été calibré à 5 m/j afin de reproduire les données mesurées lors du calage de l'émergence de l'eau souterraine sur le ruisseau. Le taux de dégazage a été calibré manuellement par essai-erreur en fonction de la géomorphologie du ruisseau et en fonction des taux de dégazages cités dans la littérature pour des cours d'eau similaires (Tableau 5). Le taux de dégazage calibré est en accord avec l'intervalle de k en fonction de la pente recommandé par Cook et al. (2003).

Tableau 10 : Paramètres de base de la modélisation du ruisseau des Vases.

Symbole	Description	Valeur	Unité	Type
E	Taux évaporation	0,001	m/j	Estimé
k	Taux de dégazage	5	m/j	Calibré
λ	Constante de désintégration du ^{222}Rn	0,181	j^{-1}	Littérature
w	Largeur moyenne	4,45	m	Mesuré
d	Profondeur moyenne	0,49	m	Mesuré
Q_0	Débit amont	0,017	m^3/s	Mesuré
CE_0	CE amont	39,9	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesuré
CE_I	CE de l'eau souterraine	180 – 348,5	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesuré
C_0	Activité ^{222}Rn amont	190	mBq/L	Mesuré
C_I	Activité ^{222}Rn de l'eau souterraine	24 822 – 63 659	mBq/L	Mesuré

L'émergence d'eau souterraine simulée par le bilan de masse est de $527 \text{ m}^3/\text{jour}$ sur le ruisseau des Vases. Trois importantes zones d'émergence d'eau souterraine sont observées sur le ruisseau des Vases (Figure 34a). La première représente $0,05$ à $0,15 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ d'apport d'eau souterraine et se situe entre 0 et 3 km de l'amont de la rivière. Elle est responsable d'une augmentation du débit de $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$, ainsi que d'une augmentation de l'activité ^{222}Rn d'environ $300 \text{ mBq}/\text{L}$. La deuxième se situe entre 3 et 5 km de l'amont du ruisseau, avec un apport d'eau souterraine qui de $0,2 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$. Sa contribution au débit total de la rivière est de $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que l'activité en ^{222}Rn augmente jusqu'à $600 \text{ mBq}/\text{L}$. Une petite émergence d'eau souterraine est observée entre les 6^e et 7^e km du ruisseau et contribue au débit de $0,45 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$.

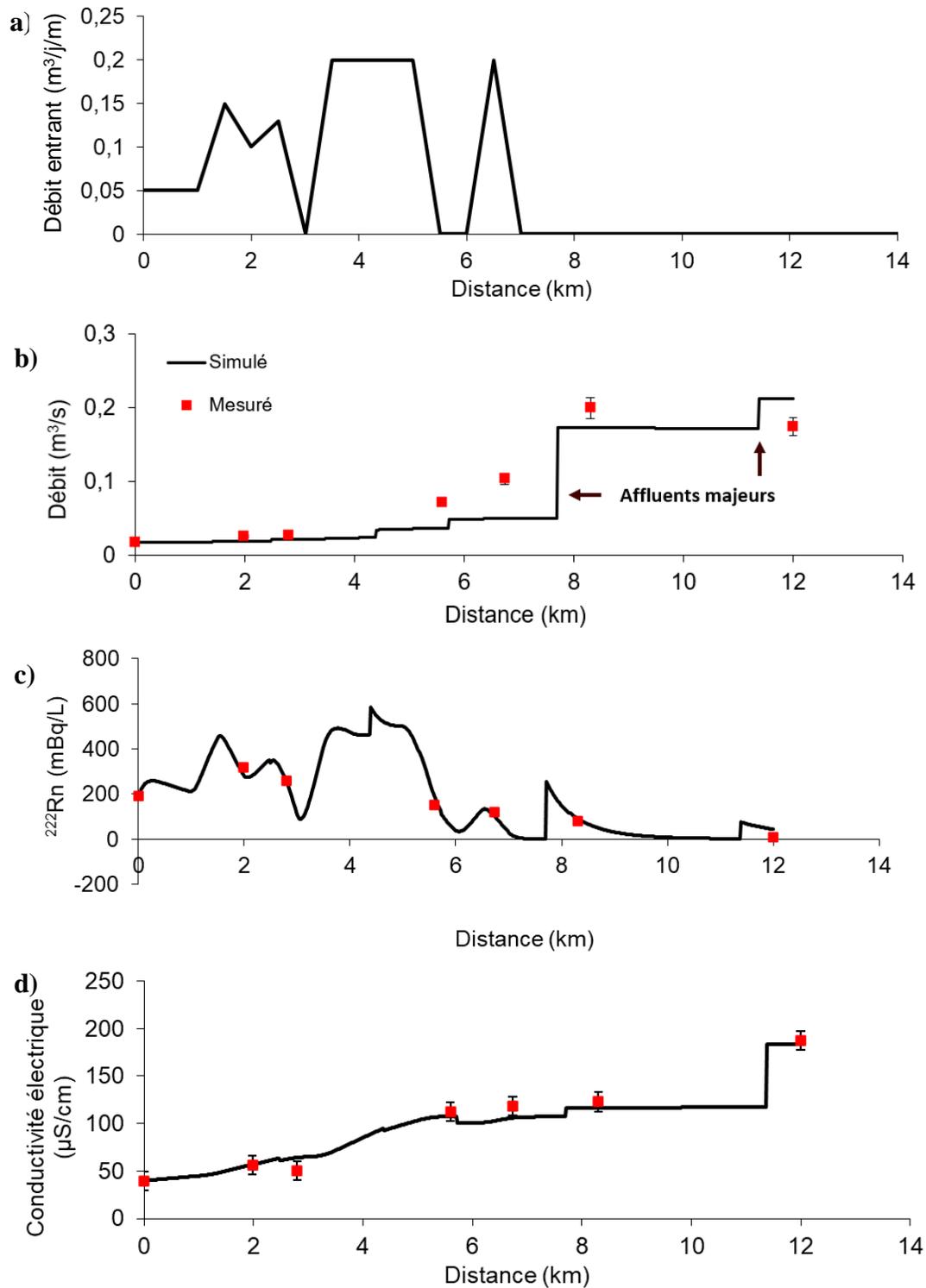


Figure 34 : Calcul pour le ruisseau des Vases a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn).

Le débit total à l'exutoire du ruisseau est surévalué par le bilan de masse. Les débits simulés sur les trois premiers kilomètres du tronçon sont assez représentatifs des valeurs mesurées. Les débits simulés entre 5 et 10 km sont sous-estimés (Figure 34b). L'activité ^{222}Rn simulée permet de reproduire les valeurs mesurées sur l'ensemble du ruisseau des Vases (Figure 34d). La CE simulée permet également de reproduire les valeurs mesurées sur la majeure portion du ruisseau. La CE simulée entre 6 et 7 km est sous-évaluée, alors que la CE simulée entre les 2 et 3 km est surévaluée (Figure 34c).

4.4.2 Rivière à Simon

Les débits, la conductivité électrique et l'activité ^{222}Rn mesurés sur la rivière à Simon et ses tributaires servent de données d'entrée et de valeurs mesurées pour le calage du bilan de masse Radin14 (Tableau 11). La conductivité électrique et l'activité ^{222}Rn mesurées dans les puits de ce bassin versant dans le cadre du PACES ont été appliquées à l'eau souterraine du bilan de masse (CE_I et C_I). Le taux de dégazage du ^{222}Rn a été calibré à 2,5 m/j afin de reproduire les données mesurées lors du calage de l'émergence de l'eau souterraine sur le ruisseau. Le taux de dégazage a été calibré manuellement par essai-erreur en fonction de la géomorphologie du ruisseau et en fonction des taux de dégazages cités dans la littérature pour des cours d'eau similaires (Tableau 5). Le taux de dégazage calibré est en accord avec l'intervalle de k en fonction de la pente recommandé par Cook et al. (2003).

Tableau 11 : Paramètres de base de la modélisation de la rivière à Simon.

Symbole	Description	Valeur	Unité	Type
E	Taux évaporation	0,005	m/j	Estimé
k	Taux de dégazage	2,5	m/j	Calibré
λ	Constante de désintégration du ^{222}Rn	0,181	j^{-1}	Littérature
w	Largeur moyenne	10,58	m	Mesuré
d	Profondeur moyenne	1,16	m	Mesuré
Q_0	Débit amont	0,129	m^3/s	Mesuré
CE_0	CE amont	113,3	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesuré
CE_I	CE de l'eau souterraine	67 - 316	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesuré
C_0	Activité ^{222}Rn amont	40	mBq/L	Mesuré
C_I	Activité ^{222}Rn de l'eau souterraine	720 - 4160	mBq/L	Mesuré

L'émergence d'eau souterraine simulée sur la rivière à Simon est de 328 990 m³/j. La première zone d'émergence de 0,8 m³/j/m est observée à l'amont de la rivière (Figure 35a). Une seconde émergence d'eau souterraine variant de 1 à 3 m³/j/m se situe entre le 5^e et le 8^e km, contribuant au débit de la rivière de 0,056 m³/s. Un pic de débit entrant à la hauteur du 10^e km de la rivière de 17 m³/j/m contribue au débit total de la rivière de 0,258 m³/s. Entre le 13 et 22 km sur la rivière, 1 à 4 m³/j/m d'eau souterraine émerge et contribue à une augmentation du débit total de 0,245 m³/s.

Le débit total simulé à l'exutoire de la rivière à Simon est fortement sous-évalué par le bilan de masse. Les débits simulés sur l'ensemble du tronçon sont assez représentatifs des valeurs mesurées, avec un écart de $\pm 0,1$ m³/s entre les valeurs mesurées et simulées. Les débits simulés aux kilomètres 11,7 et 14 sont sous-évalués de 0,3 m³/s (Figure 35b). L'activité ²²²Rn simulée reproduit relativement bien les valeurs mesurées sur les 10 premiers km de la rivière (Figure 35c). Les activités sont fortement surévaluées entre les kilomètres 10,5 et 12. L'activité ²²²Rn simulée ne permet pas du tout de reproduire l'activité mesurée à la station 8,5 qui est située à 14 km de distance de l'amont de la rivière. Les activités simulées du 15^e km à l'exutoire sont représentatives des activités mesurées à ± 80 mBq/L. Les valeurs de CE simulées reproduisent les valeurs mesurées à ± 12 μ S/cm sur l'ensemble de la rivière, à l'exception de la station 8 située au 13^e km et pour laquelle la CE simulée est surévaluée de 20 μ S/cm (Figure 35d).

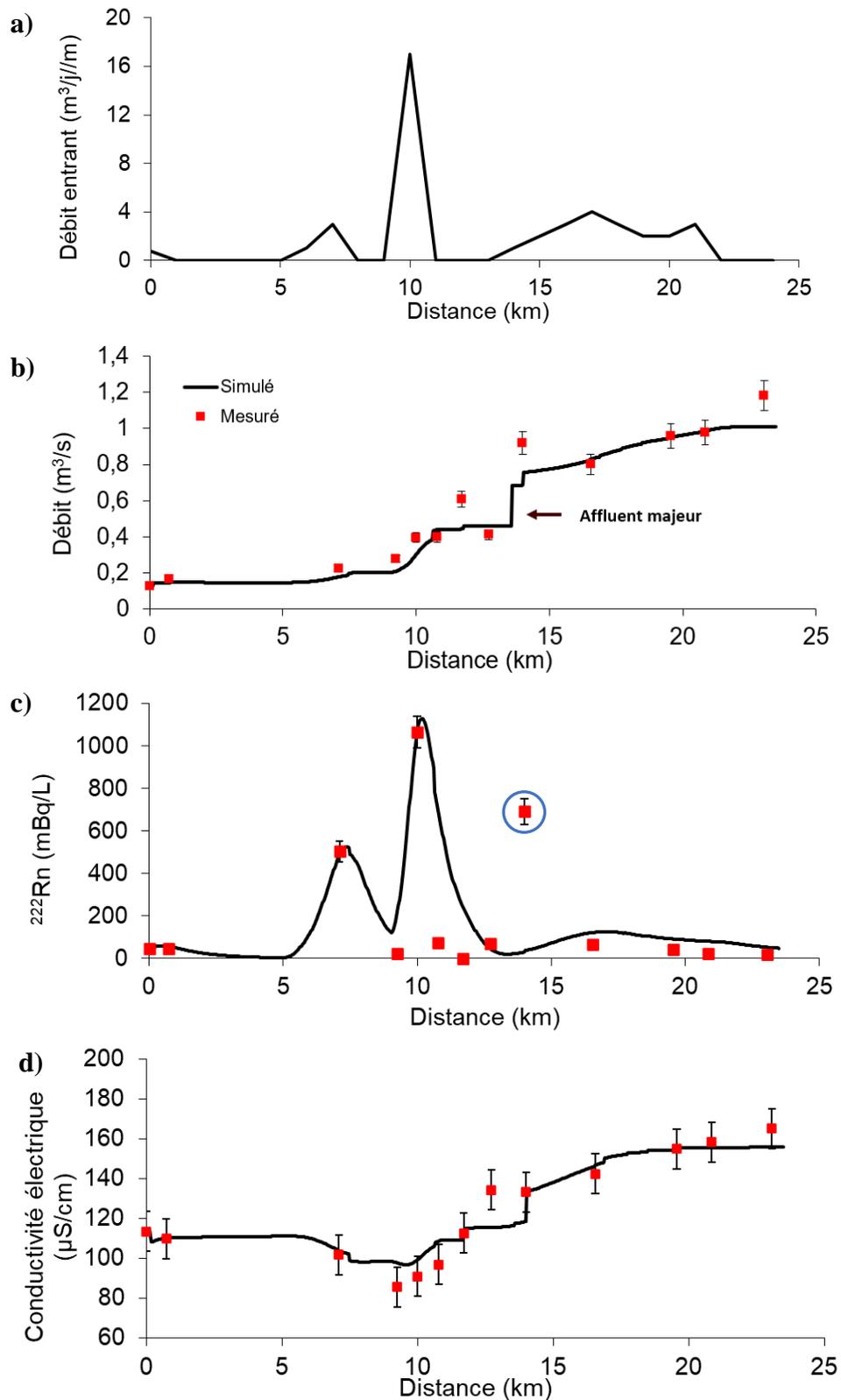


Figure 35 : Calcul pour la rivière à Simon a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn). La valeur encerclée en bleu représente une valeur aberrante.

4.4.3 Rivière Sagouay

Les débits, la conductivité électrique et l'activité ^{222}Rn mesurés sur la rivière Sagouay et ses tributaires servent de données d'entrée et de valeurs mesurées pour le calage du bilan de masse Radin14 (Tableau 12). La conductivité électrique et l'activité ^{222}Rn mesurées dans les puits de ce bassin versant dans le cadre du PACES ont été appliquées à l'eau souterraine du bilan de masse (CE_I et C_I). Le taux de dégazage du ^{222}Rn a été calibré à 2,3 m/j afin de reproduire les données mesurées lors du calage de l'émergence de l'eau souterraine sur le ruisseau. Le taux de dégazage a été calibré manuellement par essai-erreur en fonction de la géomorphologie du ruisseau et en fonction des taux de dégazages cités dans la littérature pour des cours d'eau similaires (Tableau 5). Le taux de dégazage calibré est en accord avec l'intervalle de k en fonction de la pente recommandé par Cook et al. (2003).

Tableau 12 : Paramètres de base de la modélisation de la rivière Sagouay.

Symbole	Description	Valeur	Unité	Type
E	Taux évaporation	0,001	m/j	Estimé
k	Taux de dégazage	2,3	m/j	Calibré
λ	Constante de désintégration du ^{222}Rn	0,181	j^{-1}	Littérature
w	Largeur moyenne	11,17	m	Mesuré
d	Profondeur moyenne	0,64	m	Mesuré
Q_0	Débit amont	0,405	m^3/s	Mesuré
CE_0	CE amont	76,3	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesuré
CE_I	CE de l'eau souterraine	25 – 227,6	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Mesuré
C_0	Activité ^{222}Rn amont	200	mBq/L	Mesuré
C_I	Activité ^{222}Rn de l'eau souterraine	30 970 – 48 080	mBq/L	Mesuré

L'émergence d'eau souterraine simulée est de $7456 \text{ m}^3/\text{jour}$ dans la portion de la rivière Sagouay à l'étude. Deux importantes zones d'émergence d'eau souterraine sont observées sur la rivière Sagouay (Figure 36a). La première représente $8 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ d'apport d'eau souterraine et se situe entre 1,2 et 2 km de l'amont de la rivière. Elle est responsable d'une augmentation du débit de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, ainsi que d'une augmentation de l'activité ^{222}Rn de $2135 \text{ mBq}/\text{L}$.

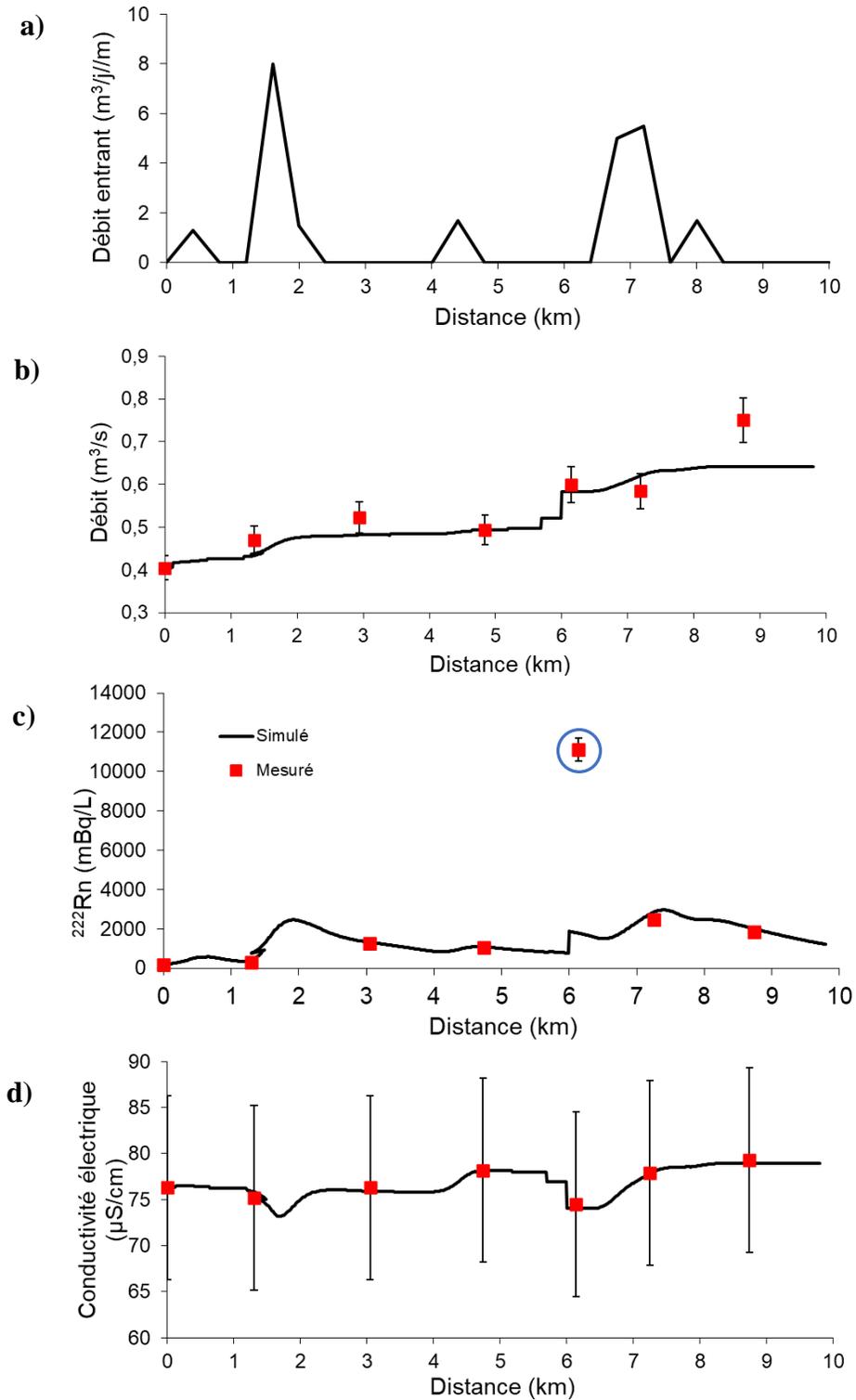


Figure 36 : Calcul pour la rivière Sagway a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn). La valeur encerclée en bleu représente une valeur aberrante.

La deuxième zone d'émergence se situe entre 6,4 et 7,6 km avec un apport d'eau souterraine qui varie entre 5 et 5,5 m³/j/m. Sa contribution au débit total de la rivière est de 0,01 m³/s, alors que l'activité en ²²²Rn passe de 856 mBq/L à 2940 mBq/L.

Le débit total simulé à l'exutoire de la rivière Saguay est fortement sous-évalué par le bilan de masse. Les débits simulés sur les huit premiers kilomètres du tronçon sont assez représentatifs des valeurs mesurées, avec un écart de $\pm 0,05$ m³/s entre les valeurs mesurées et simulées (Figure 36b). L'activité ²²²Rn simulée permet de reproduire les valeurs mesurées sur l'ensemble du tronçon de la rivière, à l'exception de l'activité ²²²Rn mesurée à la station 10 qui est située à 6 km de distance de l'amont (Figure 36c). Les valeurs de CE simulées permettent de reproduire les valeurs mesurées sur l'ensemble de la rivière Saguay, à ± 1 μ S/cm près (Figure 36d).

L'activité ²²²Rn de la station 10 (Figure 36c) n'a pas été prise en compte au cours du calcul de la RMSE associée. Elle a été considérée comme une valeur aberrante dû à l'impossibilité de l'intégrer au calculateur. Les raisons possibles pour cette impasse seront abordées dans le chapitre 5. La CE et le débit mesuré à la station 10 ont toutefois été conservés, les valeurs étant expliquées par l'apport d'un des tributaires.

4.4.4 Ruisseau Lanthier

Les débits, la conductivité électrique et l'activité ²²²Rn mesurés sur le ruisseau Lanthier et ses tributaires servent de données d'entrée et de valeurs mesurées pour le calage du bilan de masse Radin14 (Tableau 13). La conductivité électrique et l'activité ²²²Rn mesurées dans les puits de ce bassin versant dans le cadre du PACES ont été appliquées à l'eau souterraine du bilan de masse (CE_I et C_I). Le taux de dégazage du ²²²Rn a été calibré à 3,3 m/j afin de reproduire les données mesurées lors du calage de l'émergence de l'eau souterraine sur le ruisseau. Le taux de dégazage a été calibré manuellement par essai-erreur en fonction de la géomorphologie du ruisseau et en fonction des taux de dégazages cités dans la littérature pour des cours d'eau similaires (Tableau 5). Le taux de dégazage calibré est en accord avec l'intervalle de k en fonction de la pente recommandé par Cook et al. (2003).

Tableau 13 : Paramètres de base de la modélisation du ruisseau Lanthier.

Symbole	Description	Valeur	Unité	Type
<i>E</i>	Taux évaporation	0,001	m/j	Estimé
<i>k</i>	Taux de dégazage	3,3	m/j	Calibré
λ	Constante de désintégration du ²²² Rn	0,181	j ⁻¹	Littérature
<i>w</i>	Largeur moyenne	3,1	m	Mesuré
<i>d</i>	Profondeur moyenne	0,25	m	Mesuré
<i>Q₀</i>	Débit amont	0,01	m ³ /s	Mesuré
<i>CE₀</i>	CE amont	89,9	μS/cm	Mesuré
<i>CE₁</i>	CE de l'eau souterraine	95,6 – 155,8	μS/cm	Mesuré
<i>C₀</i>	Activité ²²² Rn amont	490	mBq/L	Mesuré
<i>C₁</i>	Activité ²²² Rn de l'eau souterraine	6480 – 53 090	mBq/L	Mesuré

L'émergence d'eau souterraine simulée sur le ruisseau Lanthier est de 3419 m³/j. Deux zones d'émergences sont observées en amont du ruisseau. La première se situe entre 0 et 1 km de l'amont, avec une décharge de 2 m³/j/m. Elle entraîne une augmentation du débit de 0,01 m³/s et une augmentation de l'activité ²²²Rn de 2000 mBq/L. La seconde se situe entre le 3^e et le 4^e km. Cette émergence contribue pour une augmentation de débit de 0,045 m³/s sur le ruisseau, ainsi qu'un pic d'activité ²²²Rn de 2090 mBq/L. De petites émergences d'eau souterraine sont observées à l'aval de la rivière (Figure 37a).

Le débit total à l'exutoire du ruisseau est surévalué par le bilan de masse. Les débits simulés sur les dix premiers kilomètres du tronçon sont assez représentatifs des valeurs mesurées, à l'exception du débit au 8^e km qui est quelque peu surévalué (Figure 37b). L'activité ²²²Rn simulée permet de reproduire les valeurs mesurées sur l'ensemble du ruisseau Lanthier (Figure 37d). La CE simulée permet de reproduire les valeurs mesurées sur les quatre premiers kilomètres du ruisseau. La CE simulée entre les kilomètres 4 et 5 est surévaluée de 20 μS/cm, alors que les CE simulées du 8^e km à l'exutoire sont sous-évaluées d'environ 10 μS/cm (Figure 37c).

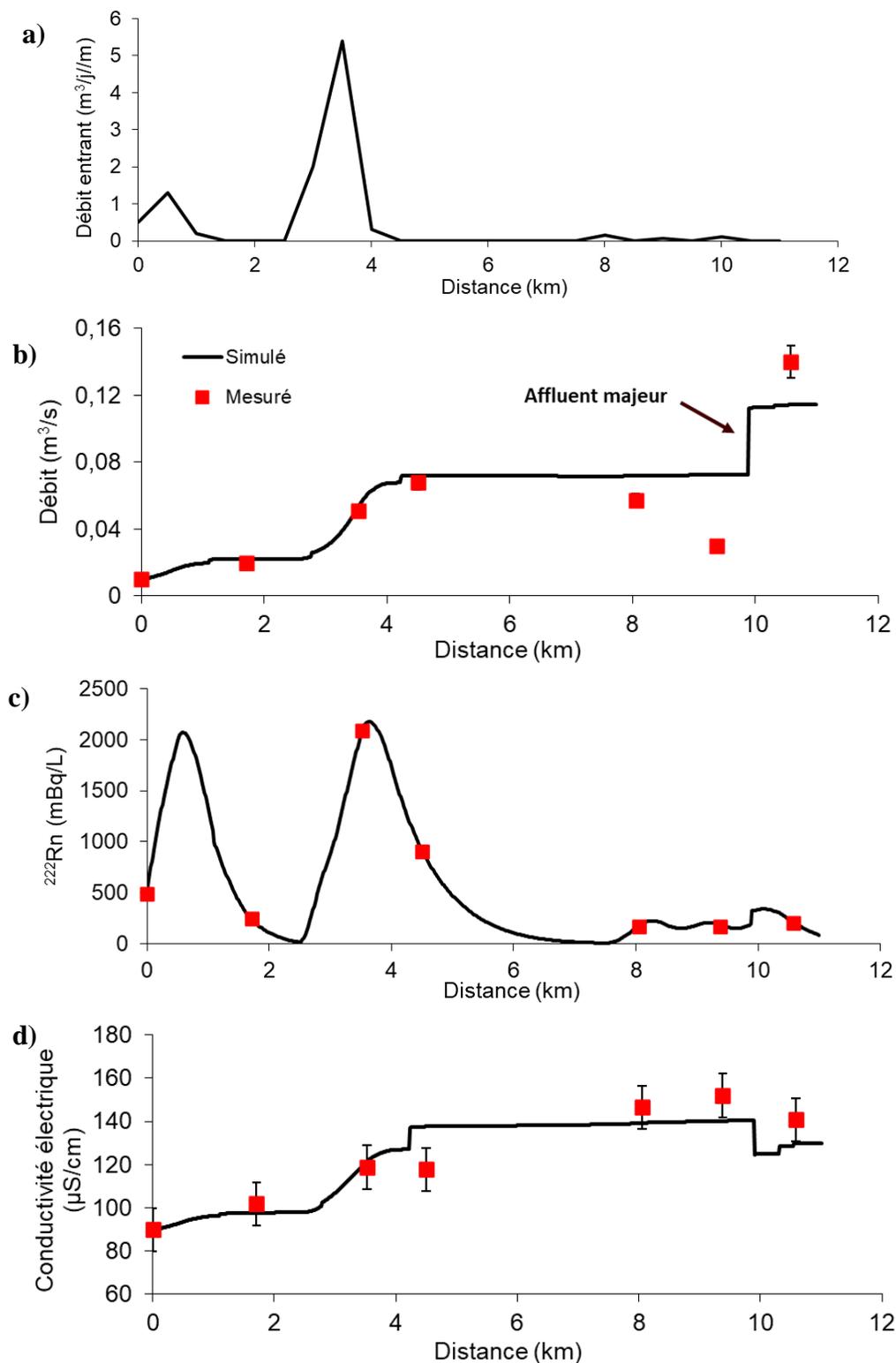


Figure 37 : Calcul pour le ruisseau Lanthier a) des apports d'eau souterraine, b) des débits totaux, c) de l'activité ^{222}Rn et d) de la conductivité électrique. Les barres d'erreur représentent les incertitudes liées aux appareils de mesure et à la méthode analytique (^{222}Rn).

4.4.5 Calibration des bilans de masse Radin14

La qualité des calibrations des bilans de masse Radin14 a été vérifiée avec le calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la régression linéaire (R^2) (Tableau 14). La RMSE calculée pour les valeurs de débits de la rivière à Simon est supérieure d'un ordre de grandeur à celles des trois autres cours d'eau. Les RMSE de la CE sont élevées sur la rivière à Simon et sur le ruisseau Lanthier, tandis que celles du ruisseau des Vases et de la rivière Saguay sont nettement plus faibles. Toutes les RMSE calculées selon les résultats d'activité ^{222}Rn des cours d'eau étudiées sont faibles. De manière générale, tous les R^2 associés aux différentes régressions linéaires entre les valeurs observées et les valeurs simulées sont supérieurs à 0,8, à l'exception du R^2 obtenu pour la comparaison des CE de la rivière à Simon ainsi que du R^2 obtenu pour la comparaison des activités ^{222}Rn du ruisseau Lanthier.

Tableau 14 : Résultats d'analyses statistiques de la calibration des bilans de masse Radin14 des quatre bassins versants étudiés.

Traceur	Statistique	Vases	Simon	Saguay	Lanthier
Débit (m^3/s)	RMSE	0,03	0,484	0,05	0,016
	R^2	0,87	0,87	0,81	0,84
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	RMSE	7,8	540	0,3	328
	R^2	0,98	0,33	0,89	0,84
^{222}Rn (Bq/L)	RMSE	0,02	0,06	0,26	0,21
	R^2	0,96	0,9	0,95	0,78

4.5 Indice de connectivité

4.5.1 Comparaison de l'indice avec les traceurs naturels de l'eau souterraine et les variations de débit

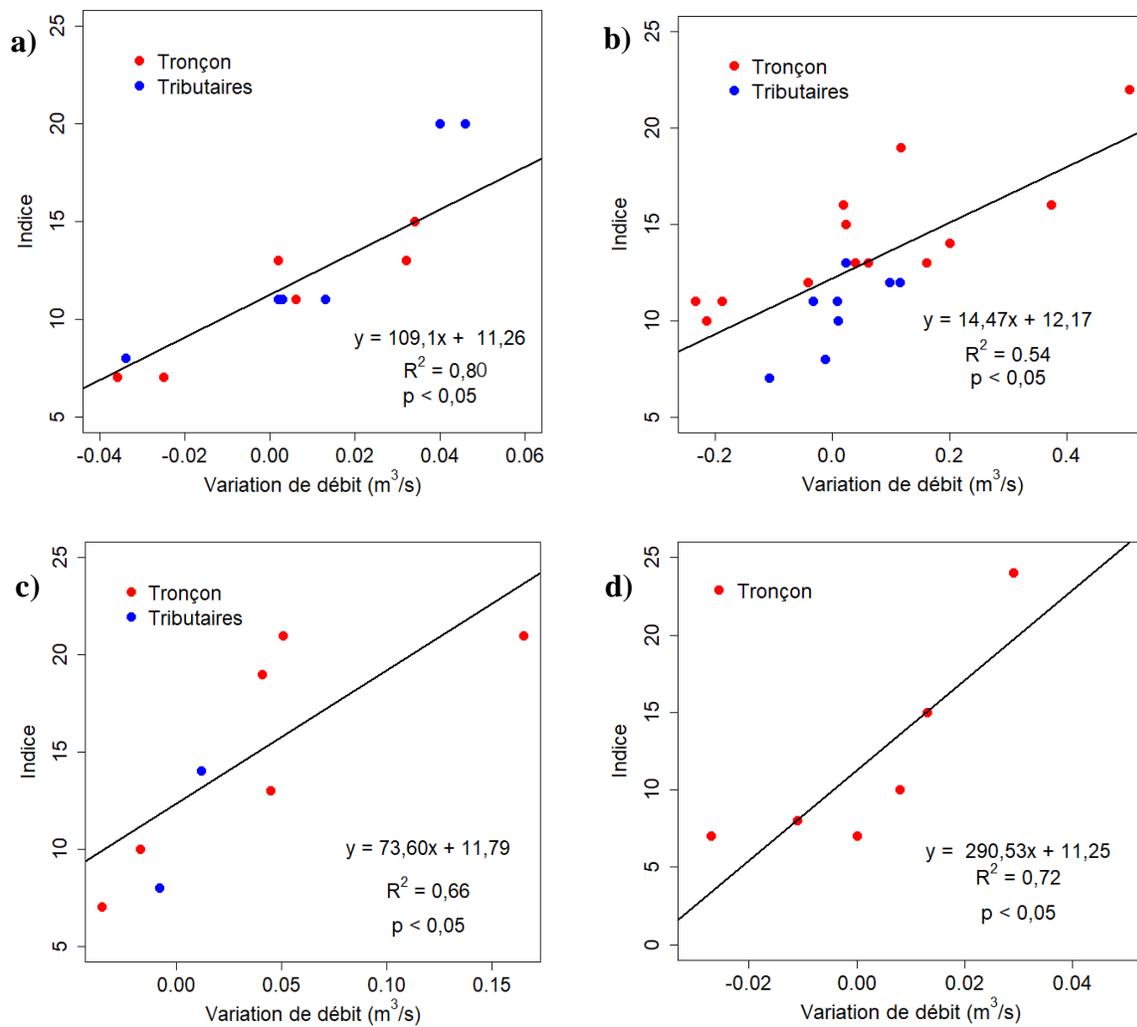
Lorsqu'une augmentation de l'activité ^{222}Rn et qu'une augmentation de débit entre deux stations de mesure n'est pas attribuable à un tributaire, l'apport d'eau souterraine devrait coïncider avec les indices les plus élevés. Les indices plus élevés devraient également coïncider avec les compositions isotopiques appauvries, alors que les indices plus faibles devraient coïncider avec les compositions isotopiques enrichies. Un indice de connectivité élevé devrait coïncider avec une faible connectivité électrique.

Pour tous les bassins versants, l'indice de connectivité est corrélé significativement ($p < 0.05$; test Tukey) avec les variations de débit (Figure 38) et avec l'activité ^{222}Rn (Figure 39). L'indice de connectivité est corrélé significativement ($p < 0.05$; test Tukey) avec la composition isotopique des eaux de la rivière Saguay (Figure 40c et 41c). Les compositions isotopiques des eaux de la rivière à Simon comparées avec l'indice (Figure 40b et 41b) suivent la tendance attendue, mais la corrélation n'est pas significative. Aucun lien significatif n'est observé entre la composition isotopique et l'indice du ruisseau des Vases (Figure 40a et 41a) et du ruisseau Lanthier (Figure 40d et 41d). La conductivité électrique de l'eau ne permet pas de démontrer un lien avec l'indice (Figure 42) et n'a donc pas été pris en compte pour la calibration des poids et des indices attribués aux paramètres.

Les poids et les cotes obtenus par calibration manuelle ont été attribués à chacun des paramètres utilisés dans le développement de l'indice de connectivité (Tableau 15). Les indices représentent un intervalle de 6 à 36. Les indices des quatre bassins versants (Figure 43, 44, 45 et 46) peuvent être regroupés en deux catégories. La première catégorie regroupe les indices de 6 à 15, soit les indices de connectivité plus faibles, et correspond aux stations où les activités ^{222}Rn sont plus faibles et où les augmentations de débits entre deux segments sont faibles. La seconde catégorie regroupe les indices de connectivité supérieurs à 15. Ceux-ci coïncident avec les activités ^{222}Rn plus élevées et les augmentations plus importantes de débits entre deux segments.

Tableau 15 : Poids et cotes des paramètres de l'indice de connectivité.

Cote	Ordre Strahler	Pente (degrés)	Substrat
1	5+	0-2	Argile, mat. org
2	3-4	2-4	Roc, till
3	1-2	4-6	-
4	-	6+	-
5	-	-	Granulaire
Poids	1	2	3



**Figure 38 : Indices de connectivité comparés en fonction des variations de débit entre deux stations
 a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.**

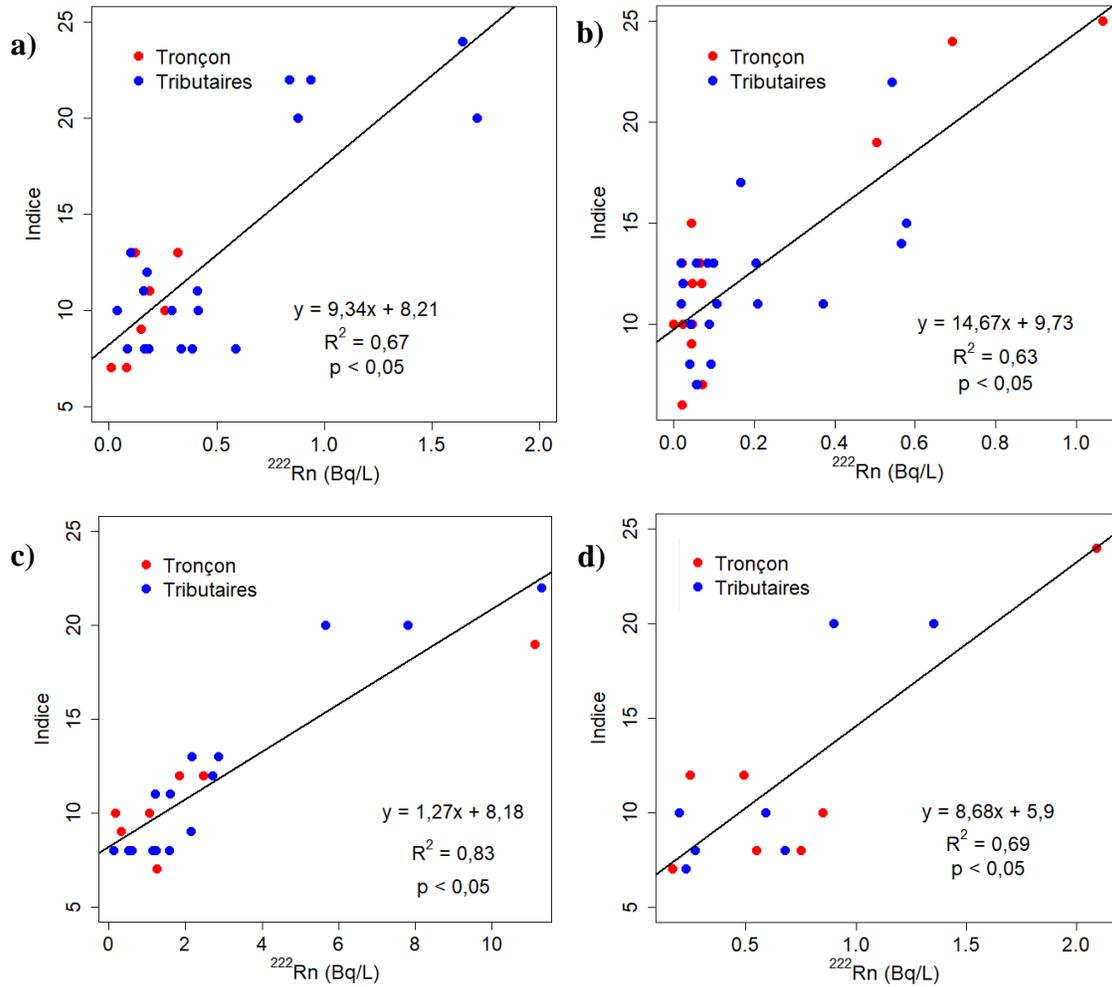


Figure 39 : Indices de connectivité comparés avec l'activité ^{222}Rn a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguy et d) ruisseau Lanthier.

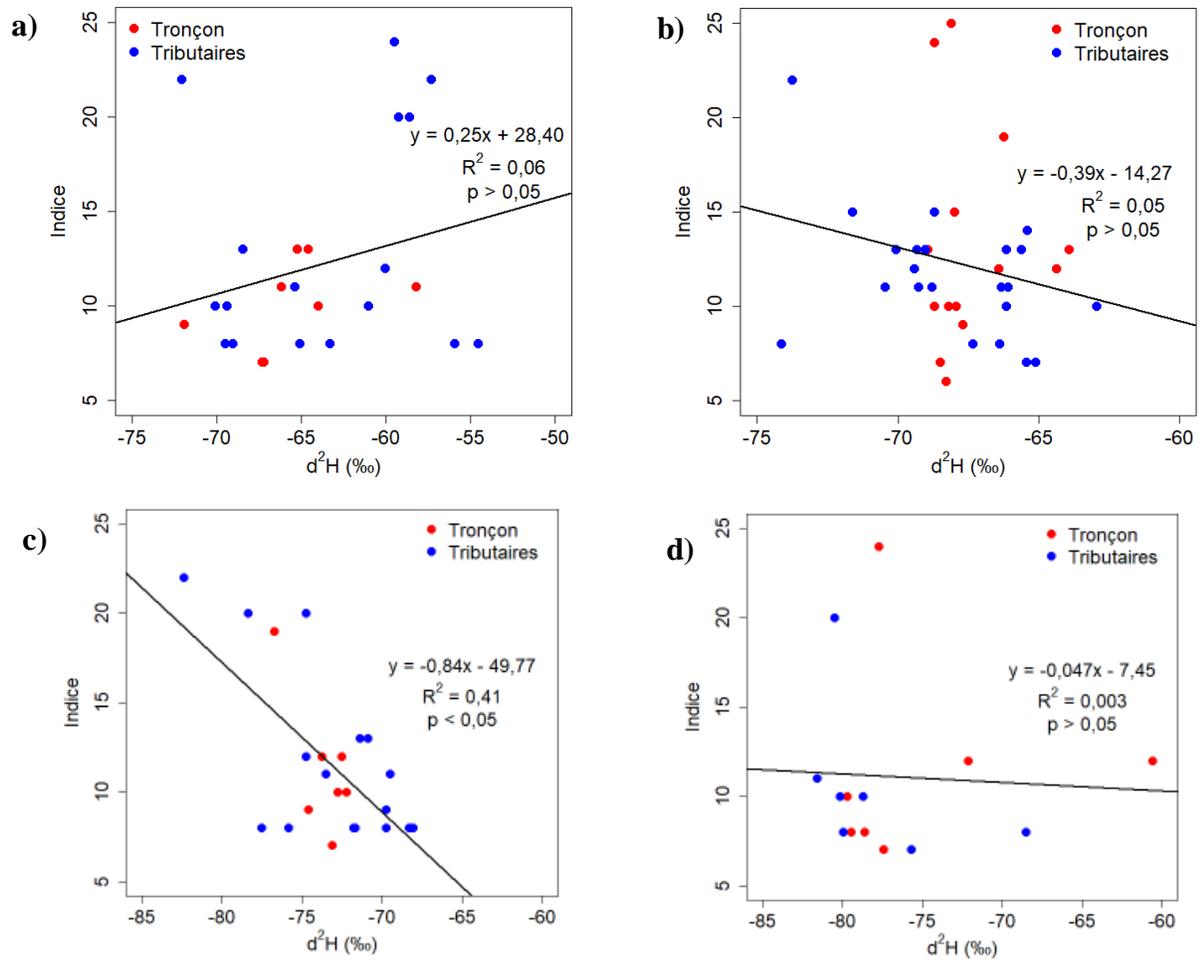


Figure 40 : Indices de connectivité comparés avec le $\delta^2\text{H}$ a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.

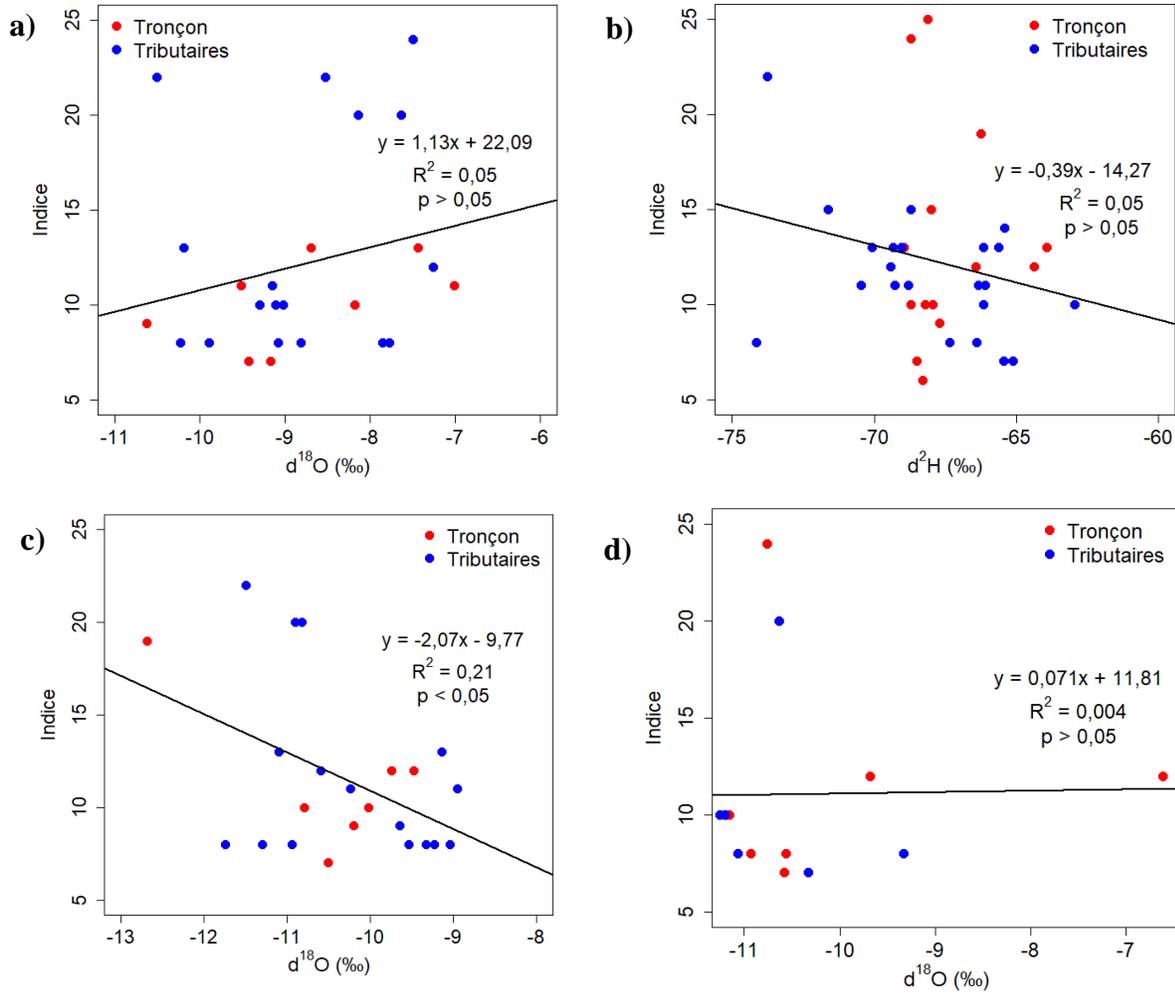


Figure 41 : Indices de connectivité comparés avec le $\delta^{18}\text{O}$ a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.

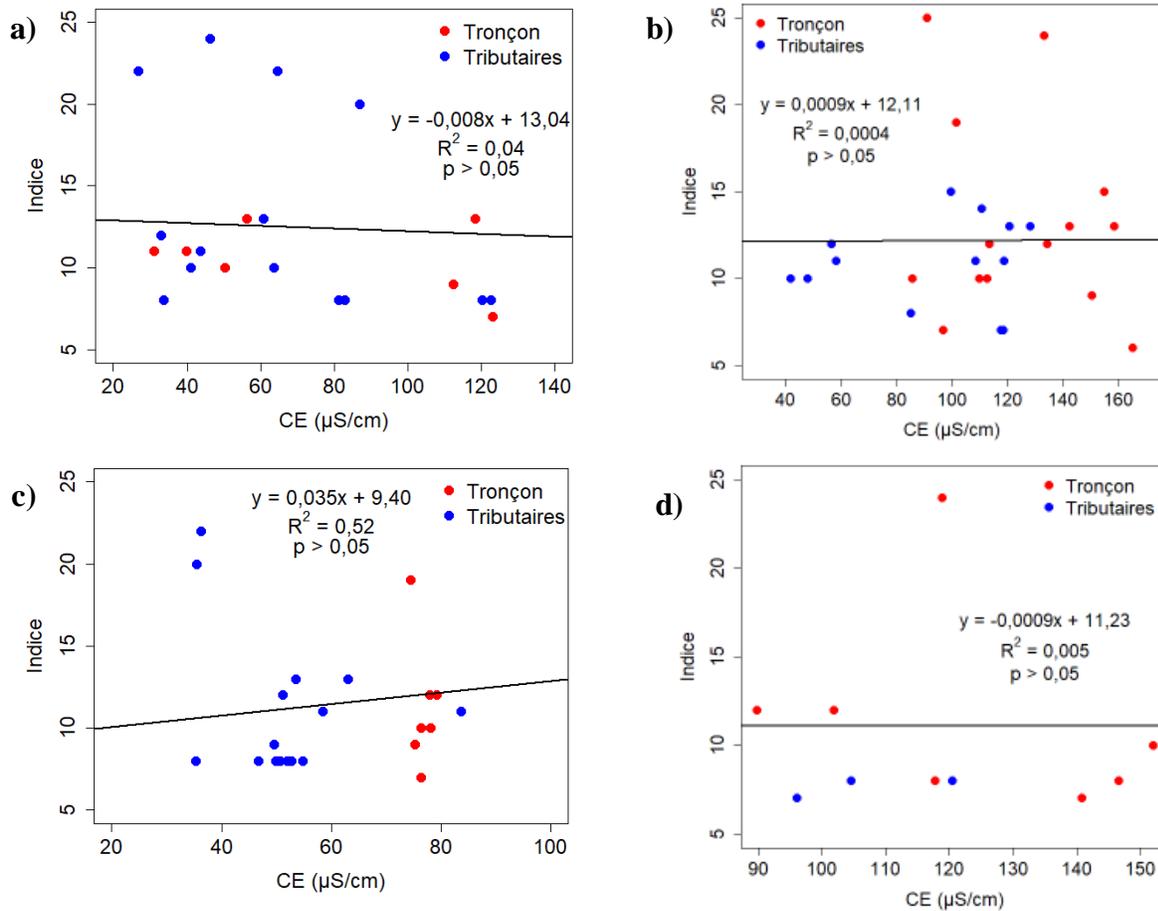


Figure 42 : Indices de connectivité comparés avec la conductivité électrique a) ruisseau des Vases, b) rivière à Simon, c) rivière Saguay et d) ruisseau Lanthier.

4.5.2 Ruisseau des Vases

Les indices de connectivité mesurés pour chaque segment du ruisseau des Vases (Figure 43) sont majoritairement dans l'intervalle de 11-15, alors que d'autres sont dans l'intervalle 6-10. Le potentiel d'émergence d'eau souterraine sur le ruisseau des Vases est faible. Certains segments dépassent l'indice 15, indiquant la présence d'une émergence d'eau souterraine.

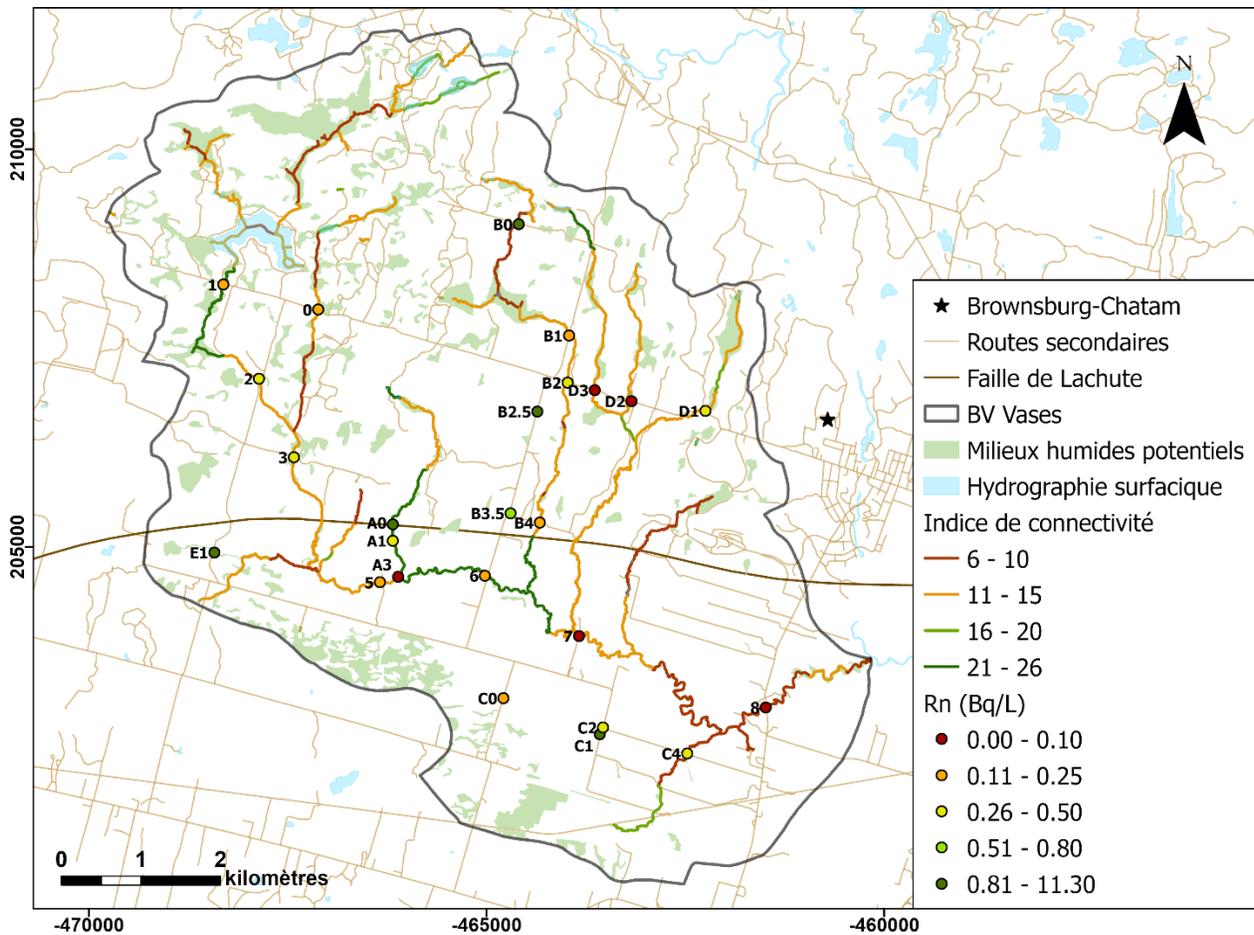


Figure 43 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur le ruisseau des Vases.

4.5.3 Rivière à Simon

Les indices de connectivité mesurés pour chaque segment de la rivière à Simon (Figure 44) sont majoritairement répartis dans les intervalles 11-15 et 16-20. Quelques segments ont un potentiel d'émergence de l'eau souterraine très faible, avec des indices de 6 à 10. À l'opposé, de rares segments sont dans l'intervalle d'indice 21-26, et ont un potentiel d'émergence d'eau souterraine très élevé.

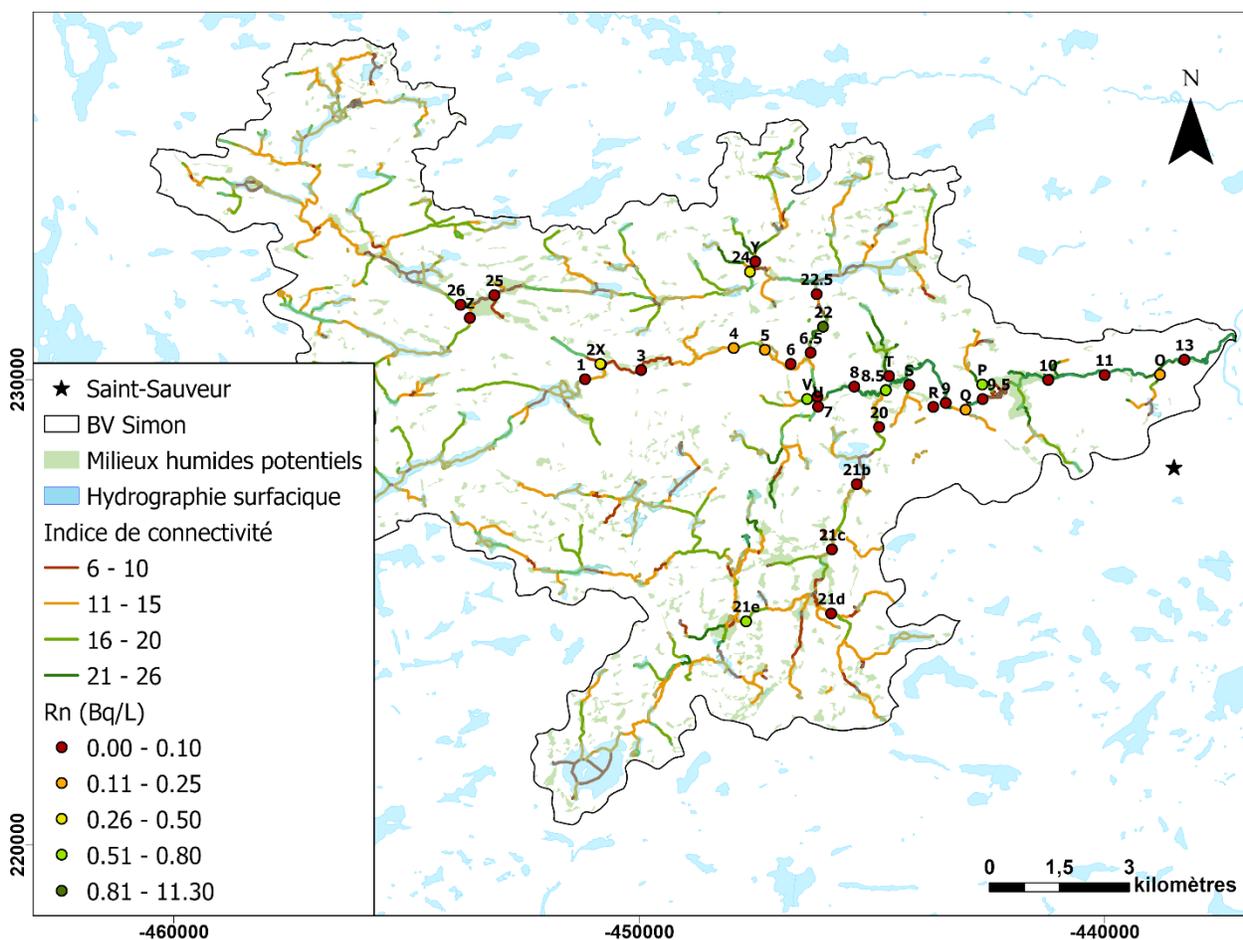


Figure 44 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur la rivière à Simon.

4.5.4 Rivière Saguay

Les indices de connectivités mesurés pour les segments de la rivière Saguay (Figure 45) sont majoritairement supérieurs à 15. Les segments d'indice inférieur à 15 sont tous retrouvés sur les tributaires de la rivière Saguay, à l'exception du segment de tronçon principal situé entre les tributaires D et S.

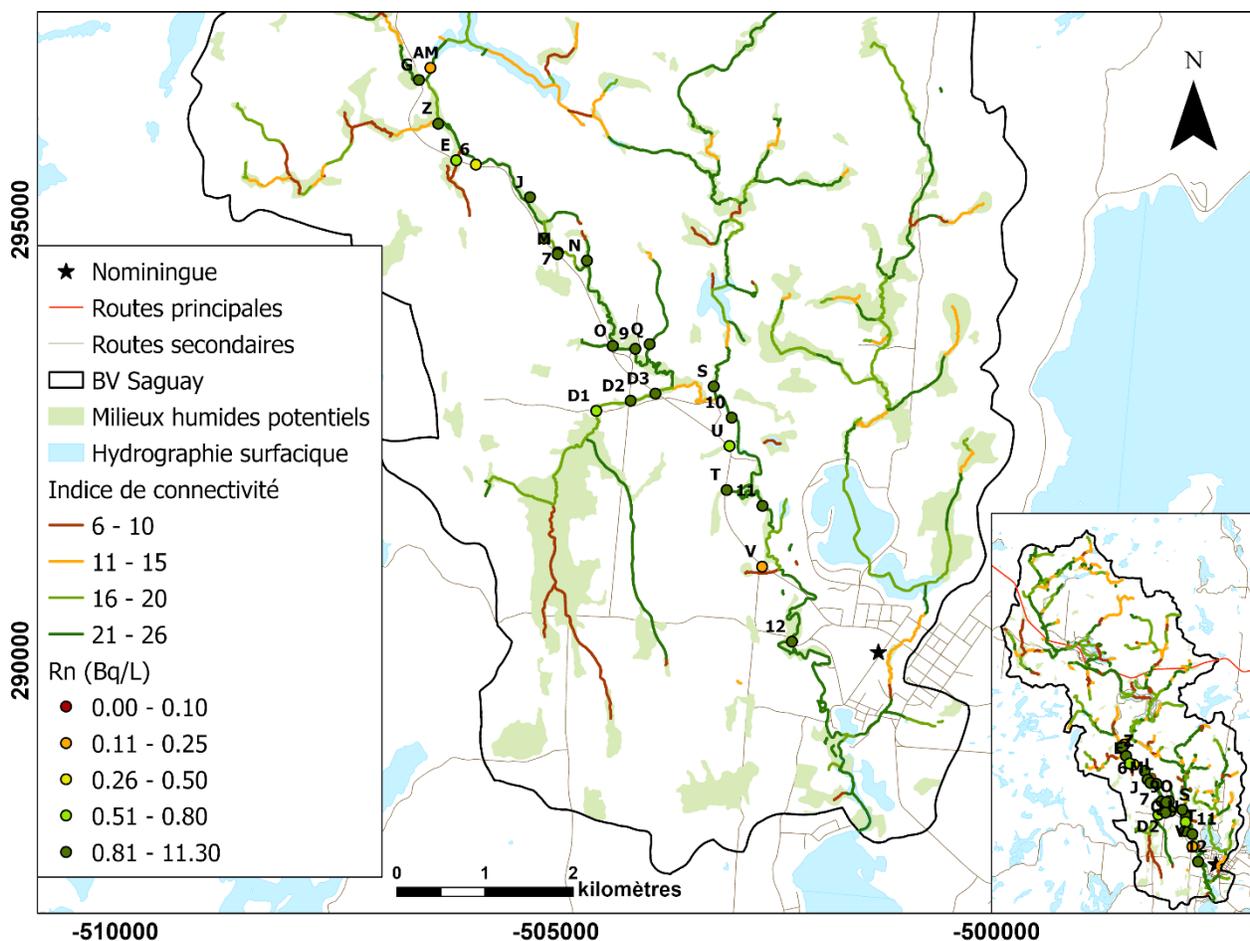


Figure 45 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur la rivière Saguay.

4.5.5 Ruisseau Lanthier

Les indices de connectivités mesurés pour les segments du ruisseau Lanthier (Figure 46) varient fortement. Les portions du ruisseau et de ses tributaires alimentés par des lacs indiquent des indices inférieurs à 15, milieux moins propices à l'émergence d'eau souterraine. Le phénomène inverse pourrait être lié à la présence de milieux humides.

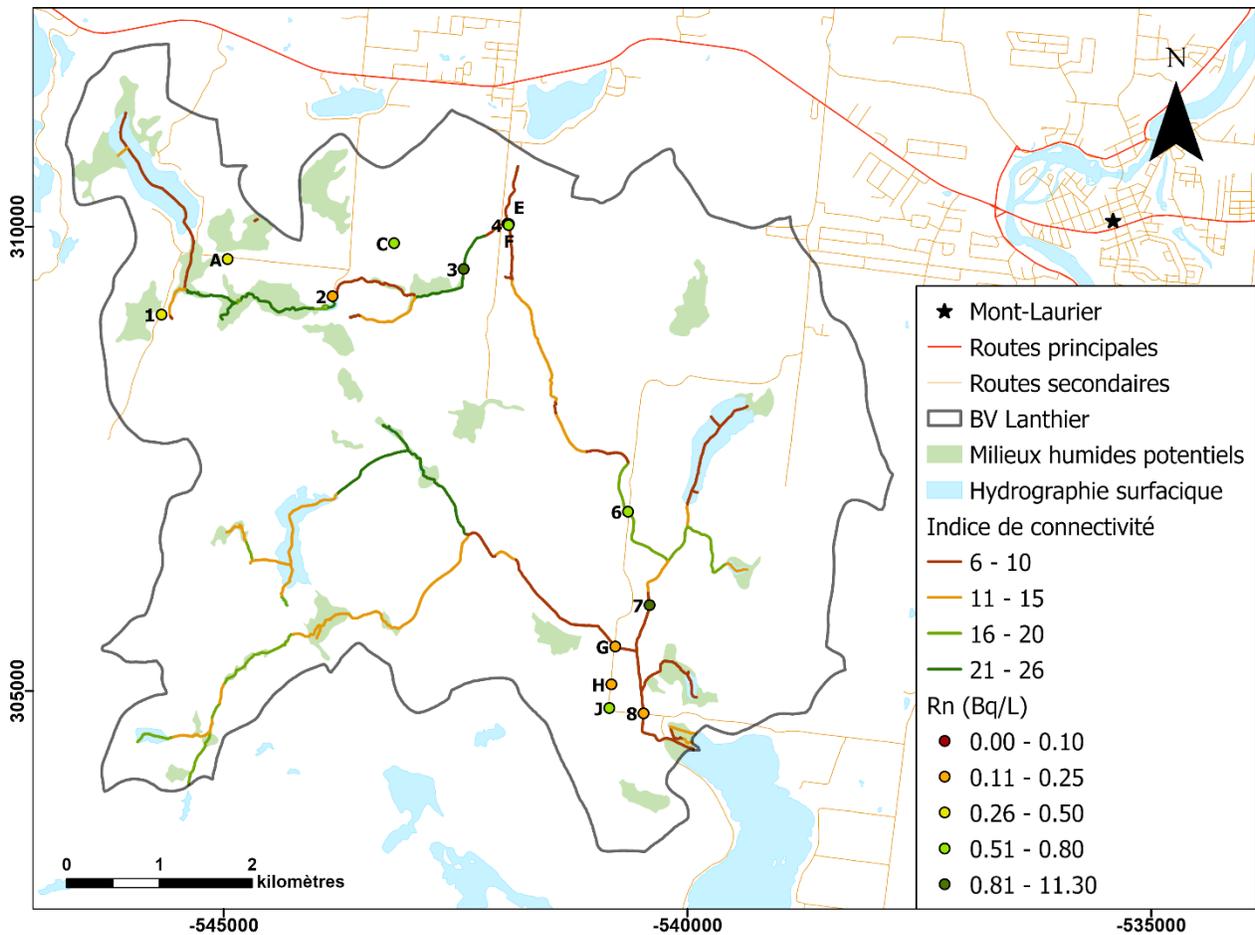


Figure 46 : Indice de connectivité et activité ^{222}Rn mesurée sur le ruisseau Lanthier.

4.5.6 Bassin versant de la rivière du Nord

Le tronçon principal de la rivière du Nord lui-même ne présente pas de grande variabilité d'indice de connectivité (Figure 47), la majorité des indices étant très élevés (21-26). Les indices retrouvés sur les cours d'eau des sous-bassins versants présentent une plus grande variabilité d'indices, tel qu'il a été observé sur le ruisseau des Vases (Figure 43) et sur la rivière à Simon (Figure 44) qui sont tous les deux tributaires à la rivière du Nord.



Figure 47 : Indice de connectivité sur le bassin versant de la rivière du Nord.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, les débits ainsi que les traceurs naturels de l'eau souterraine mesurés sur les tronçons principaux et les tributaires des quatre bassins versants à l'étude seront discutés. L'émergence d'eau souterraine calculée sur les rivières à l'étude sera abordée et comparée avec celle estimée par les bilans hydriques. La validité des bilans de masse sera également discutée. Les résultats associés à l'indice de connectivité seront comparés avec les résultats de Radin14. Les liens entre l'indice de connectivité et les variations de débits, l'activité ^{222}Rn , la composition isotopique et la conductivité électrique de l'eau mesurées sur les bassins versants seront abordés. La distribution spatiale des indices sur le bassin de la rivière du Nord sera ensuite discutée.

5.2 Débit et traceurs naturels de l'eau souterraine

5.2.1 Débits

Une augmentation de débit entre deux stations de mesure peut être causée par un apport d'eau souterraine à la rivière, un apport du ruissellement provenant de l'amont, ou encore un apport par les tributaires. Une diminution du débit entre deux stations de mesure peut être causée par une perte d'eau de la rivière vers la nappe, ou par un pompage directement dans le cours d'eau (considéré négligeables ici). Les erreurs de mesure liées aux appareils de mesure du débit peuvent influencer les résultats obtenus. Dans le cadre de ce mémoire, une erreur de $\pm 7\%$ a été appliquée aux valeurs de débits mesurées (Olivier et al., 2008).

Une importante augmentation du débit est observée sur la portion amont du tronçon principal du ruisseau des Vases entre les stations 1 et 5, mais elle n'est pas attribuable aux apports des tributaires (Figure 26a). Cette augmentation de débit se produit dans le secteur du bassin où les pentes sont les plus prononcées (1 à 3,82 %). Le tributaire B contribue grandement à l'augmentation du débit observée entre les stations 6 et 7, mais le tributaire C ne fait pas augmenter le débit entre les stations 7 et 8. Même si une diminution des débits est observée à cet endroit, en raison de l'erreur de mesure sur les débits, il est possible que les débits à la station 7 soient très similaires à ceux de la station 8. Également, ce segment de cours d'eau est caractérisé par la présence de plusieurs fermes laitières

et de culture de soja. Même si des pompages en cours d'eau n'ont pas été observés lors de l'échantillonnage, la possibilité de prélèvements dans la rivière (qui pourrait expliquer la baisse des débits) n'a pu être écartée.

Une perte de débit entre les deux stations est aussi possible en raison d'un glissement de terrain d'environ 1 km et d'une superficie de 146 m² qui s'est produit en 2018 au nord de ce segment du ruisseau (Figure 3). Il a été estimé que les sections d'affaissement les plus larges atteignaient près de 300 m de largeur sur près de 10 m de dénivelé, déstabilisant le lit du ruisseau des Vases (Bergeron, 2018). Le tronçon du ruisseau a alors été bloqué par les argiles et le dragage du ruisseau a été nécessaire afin d'éviter une accumulation d'eau trop importante sur ses berges. Ce segment du ruisseau est plus profond et plus large (Figure 70 en annexe) que les autres portions du ruisseau. Il est donc possible que la déstabilisation du dépôt argileux permette une contribution de l'eau souterraine sur ce segment de rivière. La station 7 est située à l'aval hydrologique du glissement de terrain et est caractérisée par une importante augmentation du débit qui serait expliquée par l'apport d'eau souterraine sur le segment de rivière entre les stations 6 et 7.

La pente moyenne du tronçon principal de la rivière à Simon est de 1 % entre 0 et 12 km, puis diminue à 0,5 % entre 12 km et l'exutoire de la rivière. Un lac traverse la rivière entre les stations 22,5 et 22 (Figure 20). L'augmentation du débit entre les stations 26 et 22,5 (0-9 km) est relativement constante (Figure 26b). Une augmentation rapide est observée entre les stations 22,5 et 7 (9-12 km), ce qui coïncide avec des dépôts perméables (Gx) et avec la diminution de la pente à 12 km (Figure 5). Le débit de la rivière en aval de 12 km varie localement avec des diminutions et des augmentations. Malgré ces variations, le débit augmente graduellement de la station 7 jusqu'à l'exutoire de la rivière. Les diminutions et augmentations rapides de débits observées de 12 à 23 km (stations 7 à 13) sont en partie attribuables à l'incertitude associée aux mesures des débits. Les augmentations de débits peuvent également être causées par des zones d'émergence de l'eau souterraine, tandis que les diminutions rapides peuvent être causées par le fait que la rivière soit localement perchée au-dessus de la nappe (et donc l'alimente), ou par des pompages en cours d'eau (aucun pompage n'a été observé). Le segment de la rivière entre les stations 6,5 et 9,5 s'écoule dans le secteur résidentiel de Morin Heights. Un important milieu humide traverse la rivière entre les stations 9,5 et 10, où une augmentation importante de débit est observée (Figure 5). Sur la rivière à Simon, seul le tributaire Sud, qui rejoint la rivière entre les stations de mesure 8

et 8,5 et qui est celui qui apporte le plus d'eau au tronçon principal, semble avoir un impact important sur le débit du tronçon principal. La contribution des tributaires retrouvés à l'amont de la rivière entre les stations 25 et 24 n'a pas pu être évaluée en raison du manque d'accessibilité (Figure 19).

Sur la rivière Saguay, seul le tributaire S semble contribuer au débit du tronçon principal en amont de la station 10. Le débit de la rivière Saguay augmente graduellement d'amont en aval (Figure 26c). Les sections du tronçon principal s'élargissent également d'amont en aval, sans variation importante (Figure 72a en annexe). En raison de l'absence de précipitations avant et pendant la campagne d'échantillonnage seuls quelques tributaires de la rivière Saguay étaient encore actifs et ils ont tous pu être mesurés (Figure 21). L'augmentation graduelle d'amont en aval n'est donc pas expliquée par les apports par les tributaires. Les augmentations de débit retrouvées entre les stations AM et 9 sont à peu près constantes et se situent dans l'ordre de grandeur de l'erreur liée aux appareils de mesure. De faibles diminutions de débit sont observées entre les stations 7 et 9, ainsi que 10 et 11 et se retrouvent également dans l'intervalle d'erreur des mesures. Les plus grandes augmentations du débit sont retrouvées entre les stations 9 et 10, ainsi que 11 et 12. La présence de dépôts meubles très perméables (Figure 6) et d'importante épaisseur confirme l'hypothèse que la majorité du tronçon principal de la rivière Saguay recevrait une contribution de l'eau souterraine.

Sur le ruisseau Lanthier, seul le tributaire G contribue au débit du tronçon principal, en aval de la station 7 (Figure 26d). Le débit augmente graduellement sur la portion amont du ruisseau Lanthier, puis diminue graduellement entre les stations 4 et 7. La portion amont du ruisseau Lanthier est composée de dépôts perméables (Gx) ainsi que de quelques portions de till et d'affleurements du roc (Figure 8). Sa pente est de 1,9 % alors que celle du segment aval de la rivière est de 0,42 %. L'augmentation du débit observée entre l'amont et 4 km serait donc soutenue par l'apport d'eau souterraine. À l'aval de 4 km et entre les stations 4 et 6, une diminution du débit est observée. La diminution du débit entre les stations 4 et 6 se situe dans l'incertitude liée aux appareils de mesure. La diminution du débit entre les stations 6 et 7 est plus prononcée. Ce segment du ruisseau coule sur des dépôts argileux. D'après le réseau hydrique du bassin versant (DEH, 2021), un tributaire provenant d'un lac de superficie importante rejoint le ruisseau entre les stations 6 et 7 (Figure 18). Cette importante diminution de débit est donc anormale. Les causes de cette diminution pourraient être liées à une erreur de mesure du débit importante lors de la campagne d'échantillonnage ou

encore à des pompages (non observés) sur la rivière qui coule en milieu agricole. Une autre explication possible pourrait être que la rivière est perchée par rapport à la nappe à cet endroit. Une augmentation importante du débit est observée entre les stations 7 et 8. Cette augmentation n'est pas due uniquement à l'apport du tributaire G, mais est probablement aussi causée par l'apport d'un tributaire d'ordre 2 prenant sa source dans un petit lac. Le débit de ce tributaire n'a pas pu être mesuré. La pente de ce segment est presque nulle et le substrat du ruisseau est composé de dépôts argileux et d'affleurements rocheux. La présence de roc dans le secteur indique qu'il est également possible qu'un apport d'eau souterraine contribue à l'augmentation du débit entre les stations 7 et 8.

5.2.2 ^{222}Rn

Les activités ^{222}Rn élevées retrouvées sur les segments de cours d'eau sont causées par un apport d'eau souterraine sur le segment lui-même ou par l'apport d'un tributaire soutenu par un apport d'eau souterraine. Les activités ^{222}Rn plus faibles peuvent être liées au dégazage qui se produit dans les cours d'eau et qui est accentué par les pentes plus importantes ainsi que par la présence d'obstacles dans le lit de la rivière. La courte demi-vie du ^{222}Rn a aussi une influence sur les niveaux d'activités mesurés. Il est également possible qu'une activité ^{222}Rn plus faible soit soutenue par un apport d'eau souterraine, mais que l'activité issue du roc sous-jacent soit moins élevée qu'ailleurs. Une activité ^{222}Rn anormalement élevée peut indiquer un apport d'eau souterraine très localisé qui ne serait pas représentatif de l'ensemble du segment de cours d'eau (Neupane et al., 2015). Des erreurs d'échantillonnage ainsi que des erreurs de mesure en laboratoire peuvent inclure un biais dans les valeurs retrouvées qui seront sous-évaluées. L'erreur liée à l'analyse par scintillation liquide est calculée pour chacun des échantillons en fonction de l'efficacité du comptage et du transfert de l'appareil et de l'erreur associée aux coups par minute. L'erreur associée aux résultats analytiques d'activités ^{222}Rn obtenues est d'environ 0,025 Bq/L (Lefebvre et al., 2013).

Un contraste est observé dans les activités ^{222}Rn de l'eau souterraine des bassins versants de la rivière du Lièvre (55,28 Bq/L) où se trouve le ruisseau Lanthier, de la rivière Rouge (36,49 Bq/L) où se trouve la rivière Sagway et de la rivière du Nord (12,39 Bq/L) où se trouvent la rivière à Simon et le ruisseau des Vases (Figure 10). L'activité ^{222}Rn mesurée sur la rivière Sagway est beaucoup plus élevée que celle retrouvée sur le ruisseau Lanthier, bien que l'activité ^{222}Rn

moyenne de l'eau souterraine du bassin versant de la rivière du Lièvre soit plus élevée que celle associée au bassin versant de la rivière Rouge.

Malgré la différence d'activité ^{222}Rn retrouvée dans leur eau souterraine, les contextes hydrogéologiques et morphologiques des ruisseaux des Vases et Lanthier sont similaires. Les portions aval des deux ruisseaux sont caractérisées par la présence de dépôts argileux et des nappes souterraines captives, tandis que leurs portions amont ainsi que leurs tributaires sont en conditions de nappe libre dans les dépôts quaternaires et le roc (Figure 3 et 8). Les dépôts argileux du ruisseau des Vases (Mga et Cg) atteignent 20 à 40 m d'épaisseur et les dépôts meubles retrouvés sur sa portion amont (Tm et Tc) ne représentent que 0 à 3 m d'épaisseur (Figure 58 en annexe). Dans le cas du ruisseau Lanthier, les dépôts argileux (LGA) de la portion aval représentent entre 10 et 30 m d'épaisseur, tandis que les dépôts meubles en amont (Gx) représentent entre 10 et 25 m d'épaisseur (Figure 58). Des pentes plus prononcées sont observées à l'amont du ruisseau des Vases, i.e. 1 % entre 0 et 2 km, 7 % entre 2 et 3 km, de 2,86 % entre 3 et 5,6 km. À l'aval de 5,6 km sur le ruisseau des Vases, la pente est presque nulle. La portion amont du ruisseau Lanthier est caractérisée par des pentes de 2,5 % entre 0 et 1,7 km.

Sur le ruisseau des Vases, le seul pic d'activité ^{222}Rn est observé à l'amont du cours d'eau et où la pente augmente de 1 à 7 % (Figure 28a). Dans le cas du ruisseau Lanthier, le pic d'activité ^{222}Rn a été observé à la station 3 sur un segment de ruisseau caractérisé par une pente de 1,14 % (Figure 28d). Sur le ruisseau des Vases, l'activité ^{222}Rn diminue très graduellement, tandis que sur le ruisseau Lanthier, elle chute rapidement entre les stations 3 et 6, ce qui pourrait être causé par une augmentation du taux de dégazage ou un apport plus important d'eau de ruissellement.

Les activités ^{222}Rn des tributaires E, B et C sur le ruisseau des Vases sont deux à quatre fois plus élevées que celles du cours d'eau. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces tributaires coulent sur des dépôts perméables (Gs, MGd et L), ce qui permet l'émergence de l'eau souterraine. Les tributaires aux activités ^{222}Rn moins importantes (O, A et D) coulent sur des dépôts moins perméables (Tm, Tc, MGb), l'émergence de l'eau souterraine y est donc plus limitée. Sur le ruisseau Lanthier, les activités ^{222}Rn retrouvées sur les tributaires ne semblent pas associées à un type de dépôt en particulier. Les tributaires E et H présentent une activité ^{222}Rn élevée. Les tributaires C, F et G présentent une activité ^{222}Rn plus élevée que la moyenne d'activité ^{222}Rn

retrouvée sur le cours d'eau tandis que les tributaires A et J ont des activités ^{222}Rn inférieures à la moyenne d'activité du cours d'eau.

Sur la rivière à Simon, les activités ^{222}Rn retrouvées sur les tributaires ne semblent pas associées à un type de dépôt en particulier. Les tributaires V et P qui présentent des activités ^{222}Rn très élevées, sont les tributaires dont le bassin de drainage amont est très abrupt (Figure 4). Ces tributaires sont caractérisés par la présence d'affleurements rocheux et de tills minces (Figure 5). Les tributaires Z, U, T, S, R, Q et O présentent des activités ^{222}Rn très faibles (Figure 28b). Les tributaires Y, Sud et Central ont des activités ^{222}Rn plus élevées que la moyenne d'activité ^{222}Rn du tronçon principal, mais inférieures à celles retrouvées sur les tributaires V et P. Sur le tronçon principal, les pics d'activité ^{222}Rn coïncident pour la plupart avec les augmentations de débit observées sur le tronçon principal (Figure 26b) et pourraient représenter des apports ponctuels d'eau souterraine chargée en ^{222}Rn et ne seraient pas représentatifs de l'ensemble du segment du cours d'eau. L'activité ^{222}Rn presque nulle retrouvée à la station 22,5 du tronçon principal de la rivière pourrait être expliquée par la présence d'un lac séparant le tronçon principal entre les stations 24 et 22,5 (Figure 20). La présence de ce lac contribue probablement à réduire l'activité ^{222}Rn par dégazage. À l'aval de ce lac, les sections de cours d'eau des stations ont une largeur assez importante, soit entre 10 et 18 m, à l'exception des stations 22 et 8,5 (Figure 71a en annexe). Il y aurait donc un apport d'eau souterraine chargée en ^{222}Rn soutenu entre les stations 22 et 8,5, mais le radon serait dégazé en raison de la grande largeur de la rivière. Il est possible qu'il y ait émergence d'eau souterraine dans ce secteur, cependant la faible profondeur de la rivière (environ 1 m) au moment de l'échantillonnage (Figure 71b en annexe), la pente du tronçon principal (0,9 %) ainsi que la présence de blocs privilégient le remous et donc le dégazage du ^{222}Rn . Entre la station 8,5 et l'exutoire, une diminution importante de l'activité ^{222}Rn est observée entre les stations 8,5 et 9. L'activité ^{222}Rn demeure très faible à partir de la station 9, jusqu'à l'exutoire. Une diminution importante du débit est observée entre les stations 8,5 et 9,5. Ce segment de rivière pourrait être une zone de perte d'eau vers la nappe. Le débit augmente rapidement entre les stations 9,5 et l'exutoire, ce qui pourrait être expliqué par la présence de milieux humides le long du cours d'eau.

L'ordre de grandeur plus élevé de l'activité ^{222}Rn observée sur le bassin versant de la rivière Saguay serait donc lié à la topographie assez plane du territoire, ainsi qu'à la présence de sédiments perméables (A, Go et Gx) de 4 à 20 m d'épaisseur (Figure 58 en annexe) constituant une nappe

libre (Figure 59 en annexe). Entre les stations 6 et 10, le débit du tronçon principal de la rivière Saguay augmente également (Figure 26c). Il y a probablement un apport d'eau souterraine soutenu à plusieurs endroits le long du cours d'eau, ce qui confirmerait l'hypothèse que les variations d'activité ^{222}Rn retrouvées sur le tronçon principal de la rivière soient directement liées aux apports d'eau souterraine. Le pic d'activité ^{222}Rn le plus élevé est retrouvé à la station 10. Le segment de rivière associé à cette station est caractérisé par d'importantes épaisseurs de dépôts sableux (Figure 6), une largeur de 10 m, ainsi qu'une profondeur moyenne de 0,5 m (Figure 72 en annexe). La station est située à l'amont de la plus grande pente observée sur la rivière (1 %), malgré qu'elle soit très faible en comparaison avec celles retrouvées sur les autres bassins versants étudiés. Cependant, il se peut que l'activité ^{222}Rn anormalement élevée retrouvée à la station 10 représente un apport d'eau souterraine très localisé qui ne serait pas représentatif de l'ensemble du segment de cours d'eau (Neupane et al., 2015). Cette deuxième hypothèse serait plus plausible dans le cas de la station 10 qui présente une augmentation de débit similaire à celles observées sur les autres segments du cours d'eau. Les tributaires AM, G, Z, E, J, L, M, N, O et T ont des activités ^{222}Rn supérieures à celles de la rivière, tandis que les tributaires Q, D, S, U et V ont des activités inférieures à celles de la rivière. En particulier, le tributaire J, caractérisé par des dépôts sableux (Go), qui a une activité ^{222}Rn particulièrement élevée, mais qui ne semble pas modifier celle du cours d'eau entre les stations 6 et 7. Les débits associés à tous les tributaires sont très faibles en comparaison avec ceux du cours d'eau principal, ce qui pourrait expliquer cette absence d'effet apparent de l'activité ^{222}Rn sur le cours d'eau.

5.2.3 Conductivité électrique

Une augmentation de la CE entre deux stations de mesure peut être causée par un apport d'eau souterraine à la rivière, un apport du ruissellement provenant de l'amont plus concentré sur certains segments de cours d'eau, ou encore d'un apport par les tributaires. Dans les deux cas, l'incertitude de mesure liée à l'appareil de mesure de la CE peut influencer les résultats obtenus. L'incertitude des mesures de conductivités électriques est de $\pm 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Lefebvre et al., 2015).

La CE mesurée sur le tronçon principal du ruisseau des Vases augmente graduellement tout au long du cours d'eau dû à l'accumulation des ions dissous d'amont en aval (Figure 30a). L'apport de l'eau de ruissellement et de drainage des secteurs agricoles augmente d'amont en aval sur le

ruisseau, conjointement avec l'augmentation de la superficie du bassin versant amont propre à chacune des stations. La CE de l'eau souterraine du bassin versant varie entre 180 et 349 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui est plus élevé que la CE moyenne observée sur le ruisseau. Il est donc possible que cette augmentation de la CE retrouvée à l'amont du ruisseau soit due à un apport d'eau souterraine. Les tributaires C et E ont des activités ^{222}Rn élevées (Figure 28a), cependant les CE mesurées sur les tributaires sont toutes plus faibles que celle retrouvée sur le tronçon principal de la rivière à l'exception du tributaire C. La CE du tributaire E est égale à celle retrouvée du cours d'eau principal à la jonction de ce tributaire. Un milieu humide et des champs agricoles sont présents le long du tributaire C (Figure 15) et une activité ^{222}Rn élevée y est retrouvée. Les tributaires E et C sont probablement alimentés par l'émergence d'eau souterraine. Dans le cas des tributaires aux CE et aux activités ^{222}Rn plus faibles, ces derniers ne sont probablement pas alimentés par l'eau souterraine.

La CE mesurée sur la rivière à Simon diminue très légèrement entre l'amont et la station 22 (Figure 30b), i.e. à l'endroit où la rivière s'élargit et devient plus profonde (Figure 71 en annexe). La plus grande diminution de CE est observée entre les stations 24 et 22,5. Ce segment de la rivière à Simon traverse un lac, ce qui expliquerait la diminution de la CE dû à un effet de dilution (Figure 16). En aval de la station 22, la CE augmente graduellement, ce qui peut s'expliquer par les apports des nombreux tributaires aux CE plus élevées retrouvés tout au long du segment. Une augmentation de la CE plus marquée est observée entre les stations 22 et 8. La CE mesurée dans l'eau souterraine des puits situés aux abords de la rivière varie de 67 à 328 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les segments de cours d'eau où la CE est plus élevée peuvent donc refléter un apport d'eau souterraine. Toutefois, considérant que des CE très faibles sont également retrouvées dans l'eau souterraine du bassin versant, il n'est pas possible de confirmer cette hypothèse en ne se fiant qu'aux CE mesurées sur les cours d'eau. Les CE mesurées sur les tributaires situés en amont de la rivière sont plus faibles que celles du cours d'eau, tandis que celles des tributaires situés à plus de 10 km de l'amont sont plus élevées que celles du cours d'eau. Les tributaires retrouvés à l'amont du bassin versant reçoivent moins d'eau de ruissellement que ceux retrouvés à l'aval de 10 km de l'amont étant donné leur plus petite superficie de drainage. Il ne semble pas y avoir de lien entre les CE mesurées sur la rivière à Simon et ses tributaires avec l'activité ^{222}Rn (Figure 28b) et la composition isotopique (Figure 32b et 33b). La géomorphologie de la rivière semble avoir le plus grand impact sur la CE de ce bassin versant

dû aux variations de largeur et de profondeur du tronçon principal qui ont probablement un impact sur le taux d'évaporation.

La CE mesurée sur le tronçon principal de la rivière Saguary est presque constante tout au long du cours d'eau (Figure 30c). Le léger pic de diminution de la CE observé au droit de la station 10 coïncide avec une activité ^{222}Rn très élevée (Figure 28c) ainsi qu'avec une composition isotopique très appauvrie (Figure 32c et 33c), tous les traceurs convergent donc vers un apport d'eau souterraine localisé à cet endroit. La CE associée à l'eau souterraine de la rivière Saguary varie entre 25 et 227 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Considérant cette large gamme de valeurs, il n'est pas possible de confirmer les apports d'eau souterraine dans le cours d'eau. Les CE mesurées sur les tributaires sont toutes plus faibles que celle retrouvée sur le tronçon principal de la rivière, à l'exception du tributaire T. Curieusement, les CE les plus faibles sont associées aux activités ^{222}Rn les plus élevées et inversement. Dans le cas du tributaire T, l'activité ^{222}Rn ainsi que la CE sont très élevées, ce qui pointe vers un apport d'eau souterraine à ce tributaire.

Les variations de CE sur le ruisseau Lanthier sont également minimales et ne semblent pas suivre de tendances avec les autres traceurs naturels de l'eau souterraine (Figure 30d). La CE de l'eau souterraine du bassin versant varie entre 96 et 216 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 156 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que celle de l'eau du ruisseau Lanthier est de 124 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sachant que l'incertitude liée à l'appareil de mesure de la CE est de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$, il est possible que des apports d'eau souterraine soient présents sur le ruisseau, mais qu'ils ne soient pas représentés par une variation marquée de la CE. Les CE retrouvées sur les tributaires E et H font exception et sont très élevées par rapport à celles retrouvées sur les autres tributaires et sur le tronçon principal du ruisseau. Ces stations coïncident avec des activités ^{222}Rn plus élevées (Figure 28d) et des compositions isotopiques plus appauvries (Figure 32d et 33d), ce qui indique un apport d'eau souterraine. Les tributaires A, C, F, G et J ont des CE qui varient autour de la moyenne de CE observée sur le ruisseau. Les CE mesurées sur ces tributaires ne suivent pas de tendance avec les activités ^{222}Rn retrouvées.

5.2.4 Isotopes stables de l'eau

La conservation des échantillons peut avoir un impact direct sur les compositions isotopiques retrouvées si un échange se produit entre l'échantillon et l'air ambiant. Des erreurs

d'échantillonnage sont également possibles si de l'air est présent dans la bouteille de l'échantillon. Dans ces deux cas, un biais dans les valeurs retrouvées pourrait être introduit et les compositions isotopiques de l'eau seraient faussement enrichies. Une incertitude associée au résultat analytique de chaque échantillon est définie par le laboratoire à l'aide des écarts-types de huit répliques d'analyse de chaque échantillon. Les incertitudes analytiques totales de la méthode sont inférieures à $\pm 0,2 \text{ ‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$) et $\pm 1,0 \text{ ‰}$ ($\delta^2\text{H}$).

Les compositions isotopiques des précipitations de la station d'Arundel sont plus enrichies que celles de la station de Ferme-Neuve. Il est donc plausible que cet effet latitudinal se reflète également dans les compositions isotopiques de l'eau souterraine de la région (Figure 48). Ainsi, la composition isotopique de l'eau souterraine retrouvée au nord des Laurentides serait plus appauvrie que celle de l'eau souterraine retrouvée au sud. Il est important de rappeler que les compositions isotopiques de l'eau souterraine et des précipitations de la région ont été échantillonnées au cours de l'année 2019 tandis que la campagne d'échantillonnage des cours d'eau de ce mémoire a été réalisée à l'été 2021.

Les compositions isotopiques des eaux de surface mesurées sur les bassins versants Simon et Vases sont plus enrichies que celles des bassins versants Saguay et Vases (Figure 48). Sachant que l'eau souterraine a une composition appauvrie par rapport à celle de l'eau de surface qui provient majoritairement des précipitations estivales, les compositions isotopiques de l'eau des bassins versants Saguay et Lanthier se rapprochent plus des compositions isotopiques de l'eau souterraine que de la composition associée aux précipitations du mois de juillet mesurée à la station de Ferme-Neuve. Les compositions isotopiques de l'eau des bassins versants Simon et Vases varient entre la composition isotopique de l'eau souterraine et celle des précipitations du mois de juillet mesurées à la station d'Arundel.

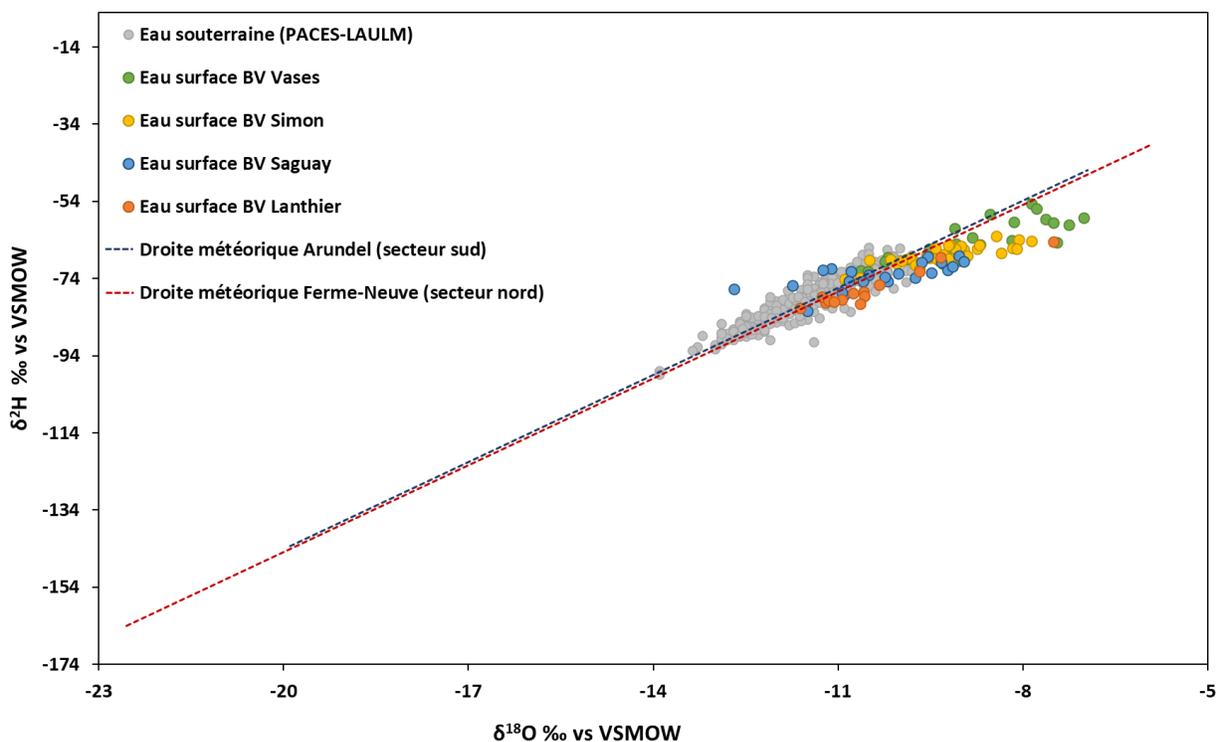


Figure 48 : Compositions isotopiques des eaux de surface des quatre bassins versants étudiés comparées aux droites météoriques locales et à l'eau souterraine de la région.

Sur le ruisseau des Vases, un enrichissement du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^2\text{H}$ est observé sur la portion amont du cours d'eau entre les stations 1 et 3 (Figure 32a et 33a). Ce segment coïncide avec une pente de 1 % et des dépôts de tills minces et continus (Figure 3). L'enrichissement est probablement dû à l'apport des eaux de ruissellement. Un important appauvrissement du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^2\text{H}$ est observé sur le segment du cours d'eau entre les stations 3 et 5. Ce segment est caractérisé par une pente importante, des dépôts perméables (Tm et Tc) ainsi qu'une augmentation du débit (Figure 26). Cet appauvrissement observé sur le segment du ruisseau entre les stations 3 et 5 est engendré par une émergence d'eau souterraine à la composition appauvrie. Le débit s'accroît de manière assez marquée dans ce secteur (Figure 26a), mais ceci ne se reflète pas dans des activités ^{222}Rn élevées (Figure 28a), possiblement en raison du dégazage. Un enrichissement important du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^2\text{H}$ est observé sur le segment du cours d'eau entre les stations 5 et 6. Cet enrichissement n'est pas expliqué par l'apport du tributaire A qui présente une composition isotopique appauvrie. La cause la plus probable de l'enrichissement entre les stations 5 et 6 est probablement liée à l'apport des eaux de ruissellement et de drainage des champs retrouvés à cette hauteur du ruisseau. Un

appauvrissement est aussi observé entre les stations 6 et 7 et coïncide avec le segment de ruisseau qui a été perturbé par le glissement de terrain ainsi qu'avec une augmentation importante du débit et indique donc la présence d'une émergence de l'eau souterraine. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$ mesurées sur les tributaires O, E, B et C sont plus enrichies que la composition isotopique mesurée sur le ruisseau des Vases. À l'inverse, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$ mesurées sur les tributaires A et D sont plus appauvries. Aucun lien n'est observé entre les compositions isotopiques et les activités ^{222}Rn sur les tributaires du ruisseau des Vases.

Sur la rivière à Simon, un important appauvrissement de la composition isotopique est observé sur le segment du cours d'eau entre les stations 26 et 25 (Figure 32b et 33b). Comme sur le ruisseau des Vases, ce segment est caractérisé par une pente importante ainsi que des dépôts de tills minces et continus (Figure 5). Il est donc possible qu'il y ait émergence d'eau souterraine sur ce segment de rivière. Une augmentation de débit y est observée (Figure 26b), mais l'activité ^{222}Rn ne reflète pas cette émergence (Figure 28b), peut-être en raison du dégazage engendré par la pente abrupte. Sur la portion plus en aval du tronçon principal, les compositions isotopiques varient fortement, probablement en raison des variations de la largeur et de la profondeur de la rivière (Figure 71 en annexe) et donc du taux d'évaporation variable, de la présence de lacs et/ou milieux humides (Figure 16), et d'apports d'eau souterraine. Les compositions isotopiques appauvries du tronçon principal de la rivière des stations 22 et 8,5 correspondent à des stations de pics d'activité ^{222}Rn élevées ainsi que d'augmentation du débit. De manière générale, les compositions isotopiques des tributaires de la rivière à Simon varient selon la même amplitude que celles retrouvées sur le tronçon principal. Les tributaires Z et U ont une composition fortement appauvrie et sont tous les deux retrouvés sur un territoire bordé de milieux humides (Figure 16). Ces tributaires pourraient donc être affectés par un apport d'eau souterraine, ou par une évaporation plus importante. Le tributaire O se démarque également par une composition isotopique enrichie et est alimenté par un petit lac (Figure 16). Cet enrichissement est probablement dû à l'évaporation du lac amont.

Les compositions isotopiques retrouvées sur le tronçon principal de la rivière Sagouay sont plus appauvries aux endroits où les activités ^{222}Rn sont plus grandes et qui coïncident avec des augmentations du débit. Ces zones d'appauvrissement du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^2\text{H}$ (Figure 32c et 33c), d'activité ^{222}Rn élevées (Figure 28c) et d'augmentation du débit (Figure 26c) indiquent des zones d'apport d'eau souterraine. La relation inverse est également observée. Celle-ci peut être expliquée

par un apport d'eau de ruissellement plus important, ou encore de zones de perte d'eau vers la nappe. Il est important de noter que certaines variations sont très subtiles et pourraient donc être attribuables aux incertitudes liées aux différentes valeurs. La même tendance est observée entre les compositions isotopiques et les activités ^{222}Rn mesurées sur les tributaires de la rivière Saguay, à l'exception des tributaires U et Q qui présentent une composition isotopique appauvrie, mais des activités ^{222}Rn plutôt faibles.

Dans le cas du ruisseau Lanthier, l'appauvrissement de la composition isotopique de l'eau observé sur la portion amont du ruisseau Lanthier entre les stations 1 et 4 (Figure 32d et 33d) coïncide avec les augmentations du débit (Figure 26d) et de l'activité ^{222}Rn observés sur le même segment (Figure 28d). Ces valeurs retrouvées sur une pente abrupte et des dépôts perméables (Figure 8) indiquent la présence d'une émergence d'eau souterraine. L'appauvrissement léger observé entre les stations 4 et 6 coïncide avec une diminution du débit et de l'activité ^{222}Rn . Une augmentation de la largeur et de la profondeur du tronçon principal est également observée (Figure 73 en annexe) sur ce segment composé de dépôts argileux imperméables. L'enrichissement de la composition isotopique de l'eau à la station 8 correspond avec le pic d'augmentation du débit, ce qui renforce l'hypothèse que le tributaire non mesuré provenant d'un lac contribue fortement au débit à l'exutoire du ruisseau Lanthier (Figure 22). Les tributaires E et H, qui ont montré les activités ^{222}Rn les plus élevées parmi les tributaires, présentent les compositions isotopiques les plus appauvries. Ces tributaires sont probablement soutenus par un apport d'eau souterraine.

5.2.5 Pertinence des traceurs d'eau souterraine testés

Dans ce projet, la CE s'est avérée être le traceur d'eau souterraine testé le moins précis puisque plusieurs phénomènes peuvent affecter la CE d'une station. Les pentes ainsi que la superficie du bassin de drainage associées au segment mesuré pour sa CE doivent également être prises en compte étant donné que la teneur en ions dissous s'accumule d'amont en aval sur le cours d'eau. Les précipitations causent une diminution de la conductivité électrique tandis que l'évaporation l'augmente. Si les mesures de CE ne sont pas faites sur l'ensemble d'un bassin versant en une seule journée et sans précipitations, des différences notables peuvent s'ajouter entre les stations (Vogt et al., 2010). Il a également été observé que la CE est très variable dans l'eau souterraine d'une même région et ne représente pas un pôle d'eau souterraine clairement défini.

Les isotopes stables de l'eau sont reconnus pour être de bons traceurs de l'eau souterraine (Tetzlaff et Soulsby, 2008; Peralta-Tapia et al., 2015), même si des incertitudes sont aussi liées à cette méthode. L'incertitude analytique totale de la méthode d'analyse utilisée dans le cadre du présent rapport est inférieure à $\pm 0,2$ ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$, alors qu'elle est inférieure à $\pm 1,0$ ‰ le $\delta^2\text{H}$. Afin de comparer les compositions isotopiques de l'eau provenant de différentes régions, il faut tenir compte de la variabilité latitudinale qui a un impact sur les compositions retrouvées. Les effets de dilution et de concentration de la composition isotopique de l'eau de surface sont également à prendre en compte pour les segments de cours d'eau en contact avec des lacs ou milieux humides.

L'activité ^{222}Rn est également un bon traceur de l'eau souterraine qui a souvent été utilisé afin d'évaluer les émergences d'eau souterraine sur l'eau de surface (Beisner et al., 2018; Adyasari et al., 2023). La présence du ^{222}Rn dans l'eau de surface indique nécessairement la présence d'eau souterraine. Toutefois, une absence d'activité ^{222}Rn dans l'eau de surface n'est pas synonyme d'absence d'eau souterraine étant donné que plusieurs facteurs peuvent causer le dégazage du ^{222}Rn . La profondeur et la largeur d'un segment de cours d'eau, ainsi que les remous engendrés par une pente abrupte ou la présence d'obstacles dans le lit du cours d'eau, peuvent avoir un impact significatif sur l'évaporation et sur le taux de dégazage du ^{222}Rn . La production de ^{222}Rn dans les zones hyporhéiques pourrait également biaiser les résultats d'activités ^{222}Rn obtenus à une station d'échantillonnage (Peel et al., 2022). Toutefois, cet effet est probablement négligeable dans les petits cours d'eau, en comparaison avec la production *in situ* du ^{222}Rn dans les lacs ou les milieux humides (Rodellas et al., 2021).

Chaque traceur a ses avantages et inconvénients, il est donc pertinent d'en combiner plusieurs afin d'avoir une vision d'ensemble sur les différents paramètres qui entrent en jeu dans l'évaluation des zones d'émergence de l'eau souterraine sur les cours d'eau.

5.3 Émergence d'eau souterraine par bilan de masse avec le calculateur Radin14

5.3.1 Émergences amont aval simulées et observées dans les rivières étudiées et validité des bilans

La calibration du débit simulé sur la rivière à Simon est jugée convenable, sachant que beaucoup de variations rapides ont été mesurées. La calibration des débits simulés sur des Vases, Saguay et

Lanthier sont très satisfaisantes étant donné que les RMSE sont très faibles et entrent dans l'ordre de grandeur de l'incertitude liée aux appareils de mesure et que les R^2 des régressions linéaires sont satisfaisants.

La calibration des CE simulées est très satisfaisante pour le ruisseau des Vases et la rivière Saguy. Les RMSE sont très basses, d'un ordre de grandeur inférieures à l'incertitude liée à l'appareil de mesure et les R^2 se rapprochent de 1. La calibration des CE simulées sur la rivière à Simon et sur le ruisseau Lanthier est moins satisfaisante avec des RMSE d'un ordre de grandeur supérieures à l'incertitude liée à l'appareil de mesure. La calibration de la CE simulée sur le ruisseau Lanthier est meilleure que celle de la rivière à Simon, avec des R^2 respectifs de 0,84 et 0,33.

La calibration des activités ^{222}Rn simulées est très satisfaisante sur l'ensemble des bassins versants. Les valeurs des RMSE sont très faibles et dans l'ordre de grandeur de l'incertitude associée à l'analyse qui a été réalisée par scintillation liquide. Les R^2 sont très satisfaisants pour les bilans de masse des bassins Vases, Simon et Saguy, alors que celui du ruisseau Lanthier est jugé acceptable.

Les résultats des RMSE issues de la calibration du bilan de masse du ruisseau des Vases sont toutes très basses et les R^2 des régressions linéaires du débit et des traceurs d'eau souterraine sont toutes proches de 1 (Tableau 14). Sur le ruisseau des Vases, trois importantes zones d'émergence d'eau souterraine ont été simulées (Figure 34a). La première se situe entre 0 et 3 km de l'amont du ruisseau et est responsable d'une augmentation du débit de $0,004 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette zone coïncide avec la zone d'émergence identifiée à l'aide de l'augmentation de débit (Figure 26a) et de l'activité ^{222}Rn (Figure 28a). La deuxième zone d'émergence se situe entre 3 et 5 km de l'amont du ruisseau, avec un apport d'eau souterraine qui de $0,2 \text{ m}^3/\text{j/m}$. Cette zone d'émergence est observée à l'aide de l'augmentation du débit et de la composition isotopique appauvrie (Figure 32a et 33a). Sa contribution au débit total de la rivière est de $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$. Une petite émergence d'eau souterraine est simulée entre les 6^e et 7^e km du ruisseau et contribue au débit de $0,45 \text{ m}^3/\text{j/m}$. Elle coïncide avec une émergence d'eau souterraine selon les débits mesurés et les résultats des valeurs de composition isotopique appauvrie. L'émergence d'eau souterraine simulée par le bilan de masse est de $527 \text{ m}^3/\text{jour}$ sur le ruisseau des Vases. Cet apport d'eau souterraine représente 3,5 % du débit de base du ruisseau.

Pour le bilan de masse de la rivière à Simon, les RMSE obtenues pour les débits et les traceurs d'eau souterraine sont plus élevées que celles des autres bassins versants étudiés, mais sont tout de même jugées satisfaisantes. Les R^2 des régressions linéaires des valeurs de débit et d'activité ^{222}Rn sont plutôt bons (Tableau 14). La calibration du bilan de masse de la rivière à Simon est jugée satisfaisante. Sur la rivière à Simon, une première zone d'émergence de $0,8 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ est calculée à l'amont de la rivière (Figure 35a). Cette zone d'émergence a été observée à l'aide d'une augmentation du débit (Figure 34b) ainsi qu'une composition isotopique appauvrie (Figure 32b et 33b). Une seconde émergence d'eau souterraine de $1 \text{ à } 3 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ est calculée entre le 5^e et le 8^e km. La zone d'émergence calculée sur ce segment de rivière correspond à une activité ^{222}Rn élevée (Figure 28b) et à une composition isotopique enrichie, mais correspond à une augmentation du débit relativement faible. Il est possible qu'une émergence d'eau souterraine se produise réellement sur ce segment de la rivière, mais qu'elle soit trop ponctuelle pour représenter un apport important d'eau souterraine au cours d'eau. Le calculateur Radin14 génère un pic d'apport d'eau souterraine de $17 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ émergeant à la hauteur du 10^e km. Cet apport important a été observé à l'aide d'une activité ^{222}Rn très élevée, d'une composition isotopique appauvrie, ainsi qu'une augmentation du débit (station 22). Cependant, le calculateur n'est pas en mesure de reproduire la baisse très rapide de ^{222}Rn qui a été mesurée juste en aval du pic (station 6,5). Entre les kilomètres 13 et 22, une émergence de $1 \text{ à } 4 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ d'eau souterraine est calculée. L'émergence d'eau souterraine simulée est de $28\,989 \text{ m}^3/\text{j}$ ce qui représente 28,4 % du débit de base mesuré à l'exutoire de la rivière.

Les RMSE issues de la calibration du bilan de masse de la rivière Saguay sont toutes très basses et les R^2 des régressions linéaires du débit et des traceurs d'eau souterraine sont toutes proches de 1 (Tableau 14). La calibration du bilan de masse de la rivière Saguay est jugée très satisfaisante. Deux importantes zones d'émergence d'eau souterraine simulées sont observées sur la rivière Saguay (Figure 36a). La première représente $8 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$ d'apport d'eau souterraine et se situe entre 0 et 2,2 km. Cette émergence d'eau souterraine a été observée par une augmentation du débit (Figure 26c), une légère augmentation de l'activité ^{222}Rn (Figure 28c) et une composition isotopique appauvrie (Figure 32c et 33c). La deuxième se situe entre 6,4 et 7,5 km avec un apport d'eau souterraine qui varie entre 5 et $5,5 \text{ m}^3/\text{j}/\text{m}$. Une émergence d'eau souterraine a été observée à la station 10 à 6 km de l'amont, à l'aide d'une activité ^{222}Rn très élevée, une augmentation du débit, ainsi qu'un appauvrissement de la composition isotopique. La zone d'émergence calculée

est donc décalée en aval d'environ 1 km par rapport aux valeurs mesurées, ce qui est une erreur relativement faible. Deux petites zones d'émergences simulées sont également observées entre 4 et 5 km, ainsi qu'entre 7,5 et 8,5 km. La première de ces zones n'a pas été observée à l'aide des valeurs de débits et de traceurs de l'eau souterraine. La seconde coïncide avec une augmentation du débit, mais n'est pas observée sur les valeurs des traceurs d'eau souterraine. La contribution de l'eau souterraine simulée sur la rivière Saguy est de 7456 m³/j, ce qui représente 11,5 % du débit de base de la rivière.

Les RMSE obtenues lors du calage du bilan de masse du ruisseau Lanthier (Tableau 14) sont jugées fiables et les R² associés aux régressions linéaires du débit et des traceurs d'eau souterraine se rapprochent de 1, ainsi la calibration du bilan de masse du ruisseau Lanthier est jugée satisfaisante. Deux zones d'émergences simulées sont observées dans la portion amont du ruisseau Lanthier (Figure 37a). La première se situe entre 0 et 1 km de l'amont, avec une décharge de 2 m³/j/m, alors que la seconde se situe entre le 3^e et le 4^e km et contribue à une augmentation du débit de 0,045 m³/s sur le ruisseau. La première zone d'émergence est observée à l'aide d'une augmentation du débit (Figure 26d), ainsi que d'un appauvrissement de la composition isotopique (Figure 32d et 33d). L'activité ²²²Rn associée à ce segment diminue (Figure 28d), mais ceci pourrait être expliqué par un taux de dégazage plus élevé, ou par une zone d'apport ²²²Rn qui aurait été manquée lors de l'échantillonnage. La seconde zone d'émergence simulée coïncide avec une forte augmentation du débit, une activité ²²²Rn élevée, ainsi qu'un important appauvrissement de la composition isotopique. De petites émergences d'eau souterraine simulées sont retrouvées à l'aval de la rivière, mais ne sont pas très réalistes d'après les résultats associés aux traceurs naturels de l'eau souterraine mesurés sur ce segment du ruisseau, considérant que d'importantes épaisseurs de dépôts argileux s'y trouvent. Le bilan de masse du ruisseau Lanthier a été calibré avec succès selon les statistiques de calage, les zones d'émergences d'eau souterraine simulées à l'amont du ruisseau Lanthier sont donc réalistes. L'émergence d'eau souterraine simulée sur le ruisseau Lanthier est de 3419 m³/j, ce qui représente 28 % du débit retrouvé à l'exutoire du ruisseau.

5.3.2 Validité et limitations de la méthode

Les analyses statistiques réalisées à l'aide des données simulées et mesurées des ruisseaux des Vases et Lanthier, ainsi que de la rivière Saguy ont démontré que les bilans de masse réalisés à

l'aide de Radin14 sont fiables. Les zones d'émergences calculées sur ces trois bassins versants ont été comparées avec les débits et les traceurs d'eau souterraine mesurés. Les zones d'émergences simulées sur les trois cours d'eau correspondent avec des paramètres géomorphologiques et des résultats analytiques qui laissent croire que des zones d'émergence sont réellement observées sur ces différents segments.

Dans le cas de la rivière à Simon, les analyses statistiques réalisées à l'aide des données simulées et mesurées ont démontré que le bilan de masse réalisé à l'aide de Radin14 n'est pas aussi fiable que les autres. Les causes de la moins bonne calibration du bilan de masse de la rivière à Simon sont nombreuses. Le tronçon étudié de la rivière à Simon est de 25 km de longueur, soit une distance deux fois supérieure à celle des autres tronçons de cours d'eau étudiés. Les nombreuses variations de débit et de traceurs d'eau souterraine sont retrouvées sur de courtes distances et sont de grande amplitude. La discrétisation spatiale imposée aux bilans de masse était de 500 m pour les bassins versants Vases, Saguay et Lanthier, tandis que celle du bilan de la rivière à Simon était de 1 km étant donné sa longueur plus importante. Cette discrétisation spatiale est trop grande pour reproduire des apports très localisés. Bien qu'il y ait un plus grand nombre de stations de mesures et d'échantillonnage sur la rivière à Simon, celles-ci ne sont pas situées à un intervalle constant sur la rivière et certains segments de plus de 4 km n'ont pas été évalués pour les mesures de débits et l'échantillonnage de traceurs de l'eau souterraine (Figure 20). La géomorphologie de la rivière complique également le calage du bilan de masse de la rivière. Sa largeur et sa profondeur varient grandement tout au long du tronçon principal (Figure 71 en annexe) et celle-ci traverse plusieurs lacs et milieux humides d'amont en aval (Figure 16), ce qui peut compliquer l'interprétation des résultats et engendrer un plus grand taux de dégazage.

Il est possible que les pics d'activités ^{222}Rn retrouvés à la station 8,5 sur la rivière à Simon (Figure 28b), ainsi qu'à la station 10 sur la rivière Saguay (Figure 28c) soient représentatifs d'un apport d'eau souterraine très localisé qui ne serait pas représentatif de l'ensemble du segment de cours d'eau et qui ne pourrait donc pas être reproduit avec le bilan de masse Radin14 (Neupane et al., 2015).

Moreira (2016) a réalisé une analyse de sensibilité de $\pm 30\%$ sur les paramètres associés au bilan de masse Radin14. Ses résultats indiquent que la profondeur de la rivière évaluée ainsi que le taux

d'évaporation sont des paramètres qui ont peu d'impact sur le bilan de masse et sur les résultats simulés. La largeur de la rivière ainsi que l'activité ^{222}Rn attribuée à l'eau souterraine du bilan de masse ont un impact important sur les résultats simulés par le bilan. Moreira (2016) indique également que pour avoir une activité ^{222}Rn de l'eau souterraine représentative de celle qui émerge sur le cours d'eau, les puits échantillonnés doivent être de surface plutôt que profonds dans le roc, doivent être situés à proximité de la rivière étudiée et plusieurs valeurs tout au long du cours d'eau devraient être compilées. Dans le cadre du présent projet, les valeurs d'activité ^{222}Rn et de CE de l'eau souterraine attribuées aux calculs ont majoritairement été mesurés dans des puits de particuliers résidant à moins de 100 m du cours d'eau. La majorité de ces puits étaient profonds dans le roc, à l'exception de quelques puits de surface. Le ^{222}Rn dans l'aquifère est donc un paramètre très incertain pour les bilans de masse des quatre cours d'eau.

Le taux de dégazage du ^{222}Rn est également un paramètre très sensible de Radin14. Selon l'analyse de sensibilité de Moreira (2016), une surestimation du taux de dégazage de 30% entraîne une sous-estimation de l'activité ^{222}Rn de 21%, tandis qu'une sous-estimation de 30% du taux de dégazage entraîne une surestimation de 39% de l'activité ^{222}Rn . Les taux de dégazage des cours d'eau ont été calibrés en fonction du gradient de pente retrouvé sur chacun des cours d'eau, ainsi que par comparaison avec les taux de dégazages retrouvés dans les études de rivières aux contextes hydrogéologiques et géomorphologiques similaires.

Plusieurs paramètres peuvent donc entraîner une surestimation ou une sous-estimation de l'apport d'eau souterraine aux cours d'eau étudiés. Les bilans de masses aux calibrations satisfaisantes permettent néanmoins d'avoir une idée de la contribution d'eau souterraine aux débits retrouvés à l'exutoire des cours d'eau associés. Il est important de noter que la proportion de l'eau souterraine dans le débit total des cours d'eau est probablement à son niveau maximum en période d'étiage. Sur le ruisseau des Vases, la contribution d'eau souterraine calculée est de $527 \text{ m}^3/\text{j}$, ce qui représente de 3,5% du débit retrouvé à l'exutoire du ruisseau. Dans le cas de la rivière à Simon, la contribution d'eau souterraine calculée est de $28\,989 \text{ m}^3/\text{j}$, ce qui représente 28,4% du débit retrouvé à l'exutoire de la rivière. Pour la rivière Saguay, la contribution d'eau souterraine estimée est de $7456 \text{ m}^3/\text{j}$, ce qui représente 11,5% du débit retrouvé à l'exutoire de la rivière, alors que sur le ruisseau Lanthier, la contribution d'eau souterraine estimée est de $3419 \text{ m}^3/\text{j}$, ce qui représente 28% du débit retrouvé à l'exutoire du ruisseau. Ces contributions de l'eau souterraine aux débits

en rivière sont similaires aux intervalles rapportés dans la littérature pour des bassins de tailles et de positions similaires (Gleeson et al., 2018; Isokangas et al., 2019; Waseem et al., 2020).

5.4 Indice de connectivité

5.4.1 Indice de connectivité et émergence d'eau souterraine calculée

Les indices de connectivité les plus élevés du ruisseau des Vases se trouvent sur la portion amont du tronçon principal, de 0 à 1,3 km, ainsi que de 4,2 à 7,8 km de l'amont du ruisseau (Figure 49a). La plupart des zones d'émergence d'eau souterraine calculées sont corrélées avec les indices de connectivité élevés de l'intervalle 21-26. Un indice plus faible de l'intervalle 11-15 est identifié sur le segment du ruisseau situé entre 1,3 et 4,2 km. Ce segment est également associé aux zones d'émergence calculées.

Dans le cas de la rivière à Simon, les indices de connectivité varient fortement de l'amont jusqu'à environ 8 km de l'amont de la rivière (Figure 49b). Les émergences d'eau souterraine calculées sur ce segment de rivière coïncident avec des indices qui varient majoritairement entre 11 et 26. L'émergence d'eau souterraine simulée à la hauteur du 10^e km coïncide avec un indice très élevé de l'intervalle 21 à 26. Le segment de rivière de 13 à 23 km est majoritairement associé à un indice de connectivité élevé de l'intervalle 21 à 26. Ce segment représente aussi une zone d'émergence calculée sur la rivière à Simon.

Sur la rivière Saguy, les zones d'émergence d'eau souterraine simulées coïncident toutes avec des indices de connectivité de l'intervalle 21 à 26, à l'exception de l'émergence simulée à l'amont de la rivière qui est caractérisée par un indice de l'intervalle 16 à 20 (Figure 49c). Seul le segment de rivière situé entre 5,2 et 6,2 km est associé à un indice de connectivité plus faible, mais aucune émergence simulée n'y est retrouvée. Les émergences d'eau souterraine simulées sur la portion amont du ruisseau Lanthier sont caractérisées par un indice de connectivité de l'intervalle 21 à 26 (Figure 49d). Plusieurs segments de la rivière présentent des indices plus faibles de l'intervalle 6 à 10, mais une seule zone d'émergence simulée à l'apport très mineure y est retrouvée, soit à la distance de 10 km de l'amont du ruisseau. Le segment du ruisseau situé entre 7,8 et 9 km est associé à un indice de connectivité 16-20 et coïncide avec une petite zone d'émergence.

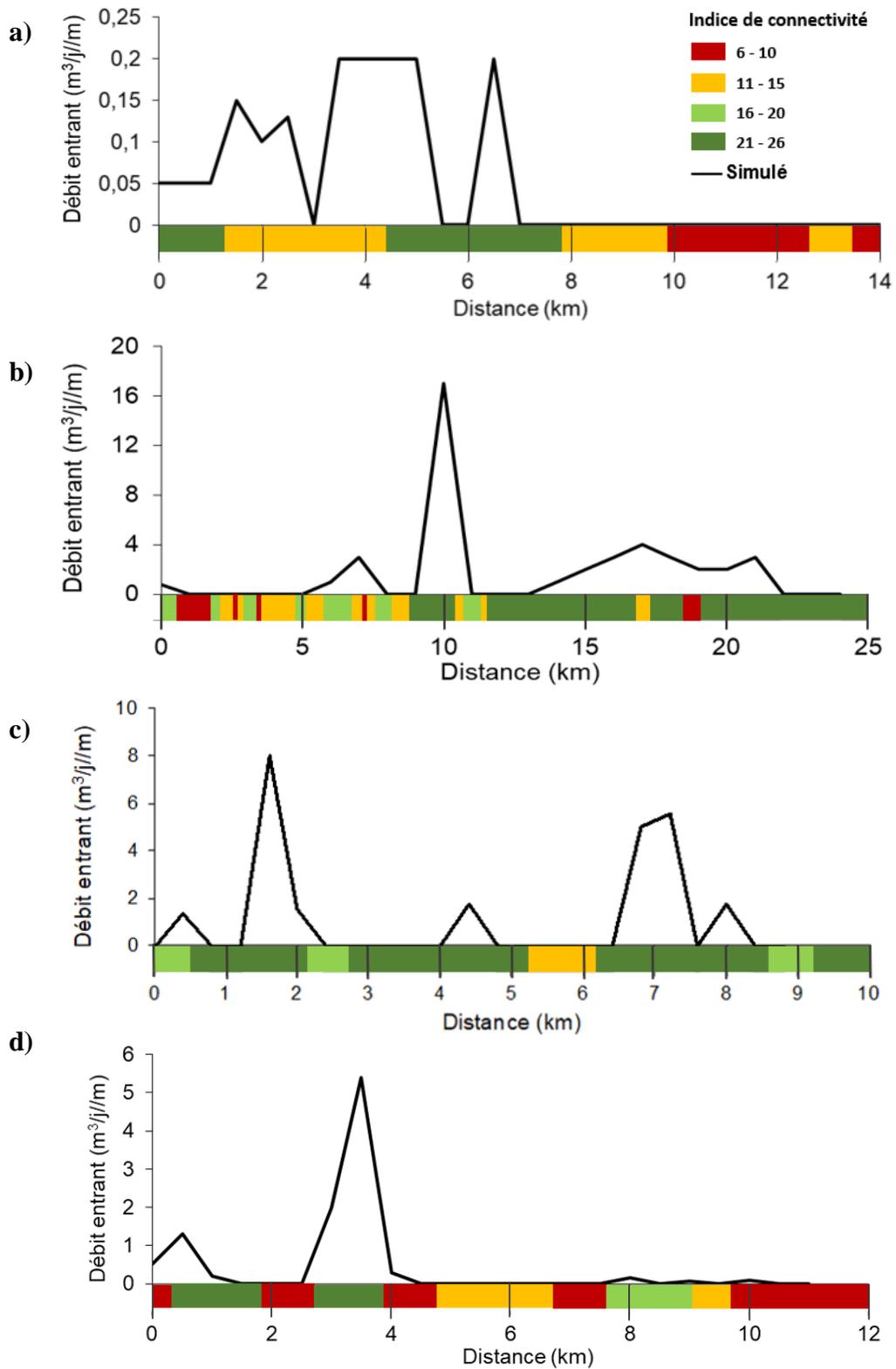


Figure 49 : Comparaison des indices de connectivités et de l'émergence d'eau souterraine simulée à l'aide de Radin14 sur les bassins versants a) Vases, b) Simon, c) Saguay et d) Lanthier.

Dans l'ensemble, les indices de connectivité se comparent relativement bien aux zones d'apport d'eau souterraine calculées avec Radin14. Bien que des limitations et sources d'erreur soient associées aux deux méthodes, les calibrations réalisées sur les bilans ainsi que sur l'indice de connectivité démontrent des résultats satisfaisants. Le fait que la plupart des zones d'émergence d'eau souterraine coïncident pour les deux méthodes renforce l'hypothèse que ces zones sont plausibles sur les quatre bassins versants étudiés.

5.4.2 Indice de connectivité, ^{222}Rn et paramètres géomorphologiques

Vases

Les segments aux indices de connectivités élevés de l'intervalle 21-26 retrouvés sur le ruisseau des Vases (Figure 50) coïncident avec l'amont du tronçon principal, ainsi qu'avec la présence de dépôts de glissement de terrain (Cg). Un segment d'indice 11-15 est également observé à l'amont du tronçon principal qui est caractérisé par de minces épaisseurs de tills, une pente abrupte ainsi qu'un ordre de Strahler de 3.

La cote qui a été attribuée aux dépôts de tills lors du calage de l'indice est de 2, cependant sachant que la présence d'un cours d'eau remanie le till au fil du temps, ce type de dépôt peut être très perméable lorsqu'il est de faible épaisseur sur le lit de la rivière. L'indice de connectivité 11-15 retrouvé sur le ruisseau des Vases aurait donc dû être plus élevé au regard des zones d'émergences calculées et déduites des débits et des traceurs naturels. La cote associée aux dépôts de tills devrait être testée dans plus de contextes qui incluent des tills afin de mieux représenter les émergences potentielles sur ces zones en tenant mieux compte de l'épaisseur de dépôts meubles.

Les indices de connectivités plus faibles retrouvés à l'aval du ruisseau (6-15) coïncident avec les dépôts imperméables, une pente faible, ainsi qu'un ordre de Strahler de 3, ce qui est un résultat attendu. L'indice de connectivité élevé 21-26 retrouvé à la hauteur du 5^e km du tronçon principal est associé à des dépôts argileux imperméables, ce qui est contre-intuitif. La cause de la surévaluation de l'indice de ce segment relève probablement de la superficie attribuée à la zone tampon autour du segment de cours d'eau lors de l'extraction des données associées aux segments de cours d'eau. L'application de l'indice sur les segments de cours d'eau a été réalisée par l'extraction de la pente, du type de dépôt ainsi que de l'ordre de Strahler associé aux segments sur

une zone tampon de 100 m autour des segments prédéfinis par le jeu de données du réseau hydrique du GRHQ. Lorsqu'un segment se retrouve avec plusieurs valeurs possibles pour un même paramètre, celle qui domine la zone tampon du segment a été associée à ce même segment de cours d'eau.

Dans le cas du segment retrouvé à la hauteur du 5^e km du ruisseau des Vases, le type de dépôt prédominant était le dépôt associé au glissement de terrain (Cg). Ce type de dépôt a été traité comme un dépôt perméable (granulaire) en raison de l'importante déstabilisation du territoire qui a probablement créé des chemins préférentiels qui augmentent sa perméabilité, et dont la cote a été fixée à 5 lors de la calibration de l'indice (Tableau 15). L'indice associé aux zones de dépôts de glissement de terrain est donc plus élevé que ceux associés aux dépôts argileux.

L'indice élevé 21-26 est également retrouvé à la hauteur du 6^e km, ce qui est un résultat attendu étant donné que le dépôt de glissement de terrain d'y trouve réellement. Cette émergence d'eau souterraine a été observée à l'aide des valeurs de débit ainsi que des compositions appauvries de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$.

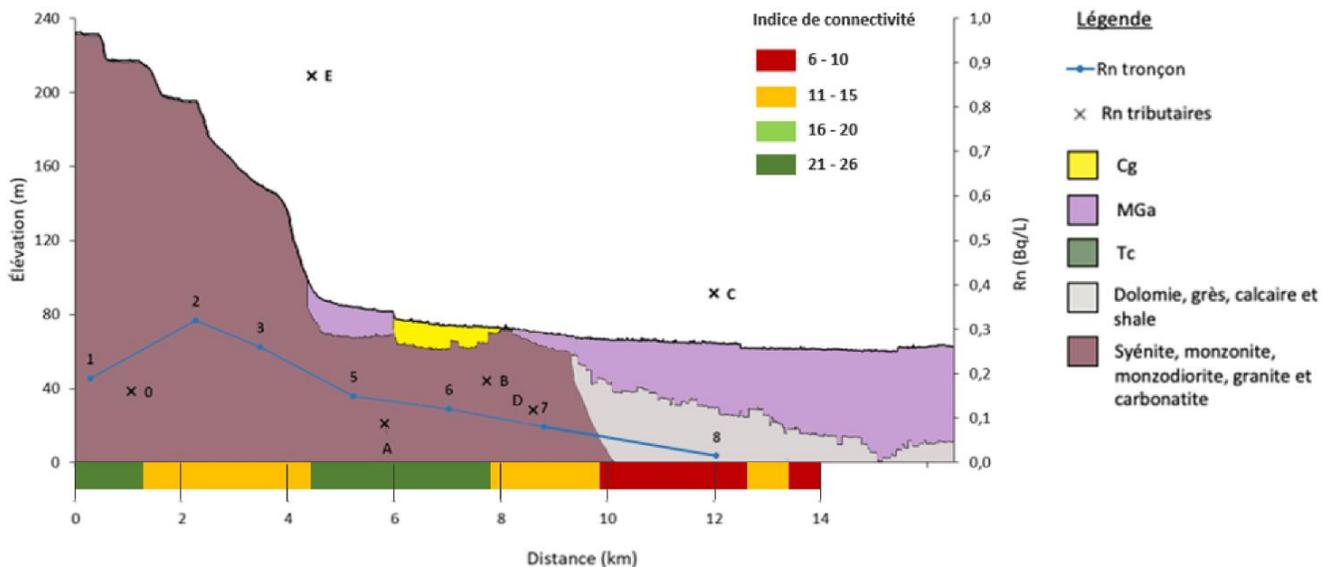


Figure 50 : Coupe géologique du tronçon principal du ruisseau des Vases comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.

Simon

Sur la rivière à Simon, les indices de connectivité plus faibles (6-15) sont retrouvés sur les segments de rivières qui s'écoulent sur un dépôt de tills ou directement sur le roc, conjointement avec des pentes très faibles (Figure 51). Ces segments d'indices plus faibles sont majoritairement retrouvés à l'amont de la rivière dont l'ordre de Strahler est de 3. Les indices de connectivités plus élevés de l'intervalle 16-20 sont également retrouvés à l'amont de la rivière, sur la portion du tronçon principal dont l'ordre de Strahler est également de 3. Cependant, ces segments coïncident avec une pente plus élevée ou la présence de dépôts perméables. Les indices de connectivité très élevés (21-26) sont majoritairement retrouvés plus en aval de la rivière à des segments du tronçon principal dont l'ordre de Strahler est de 4 ou 5, sur des pentes très prononcées, ainsi qu'en présence de dépôts perméables.

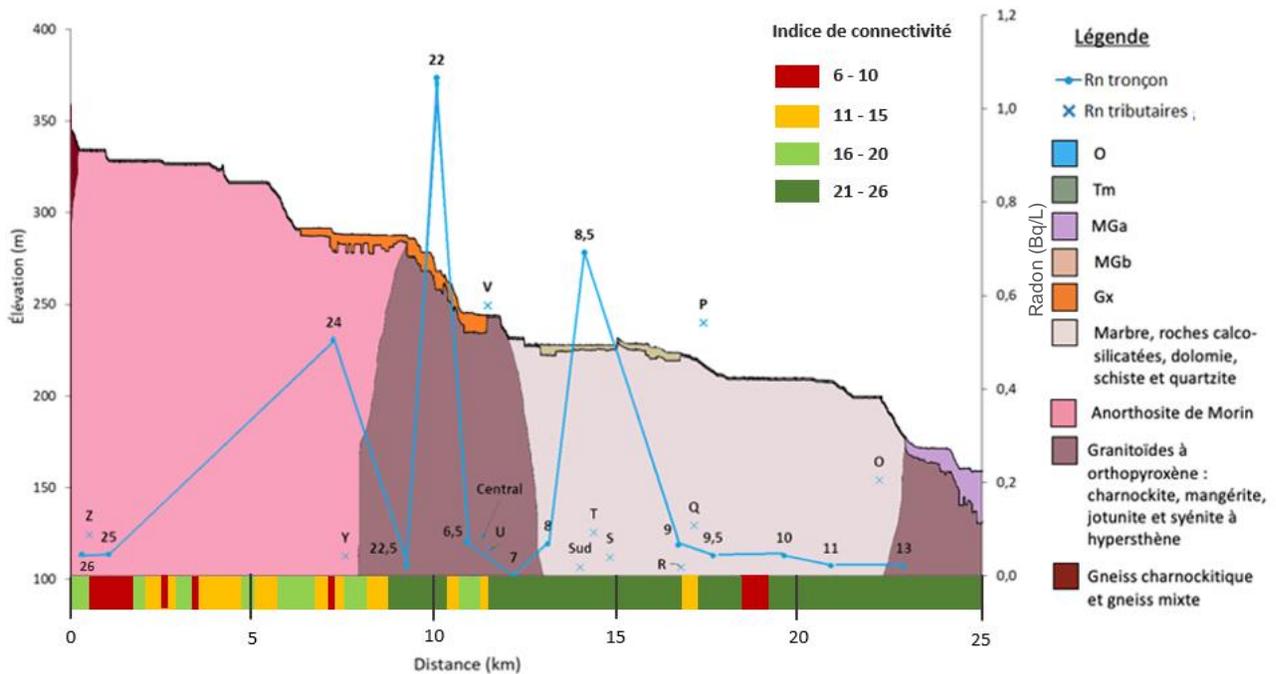


Figure 51 : Coupe géologique du tronçon principal de la rivière à Simon comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.

Saguay

L'ordre de Strahler associé à la portion de la rivière Saguay à l'étude est de 4 sur l'ensemble du tronçon étudié. La pente du territoire ne présente presque aucune grande variation marquée et est relativement faible. Tel que mentionné précédemment, lors de l'extraction des paramètres associés aux segments de cours d'eau prédéfinis par le réseau hydrique du GRHQ, la valeur prédominante d'un paramètre sur la zone tampon du segment est associée à ce même segment. Le bassin versant de la rivière Saguay est dominé par les dépôts perméables granulaires (Figure 6), ce qui explique les indices très élevés retrouvés sur presque l'entièreté du tronçon principal de la rivière (Figure 52). Un indice de connectivité plus faible (11-15) est retrouvé sur un segment de 1 km de long à une distance de 5,2 km de l'amont de la rivière. Le substrat prédominant de ce segment est la matière organique dont la cote a été attribuée à 1 lors du calage de l'indice (Tableau 15). Quelques segments de la rivière sont caractérisés par des indices élevés de l'intervalle 16-20. Le substrat prédominant sur ces segments est probablement le roc, dont la cote a été définie à 2 lors de la calibration de l'indice.

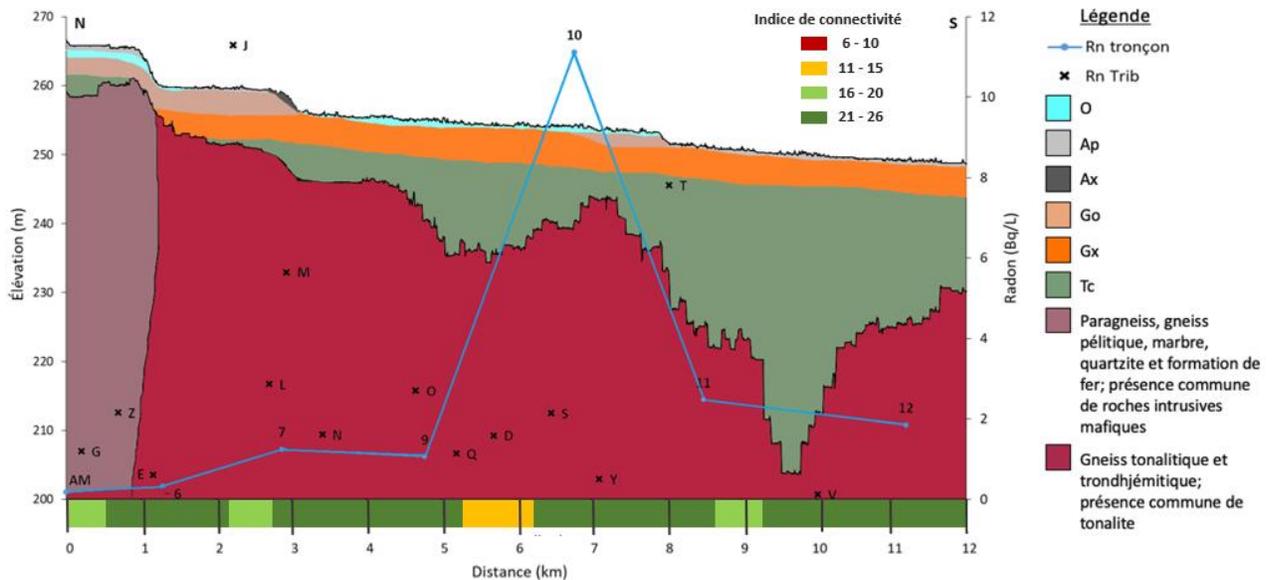


Figure 52 : Coupe géologique du tronçon principal de la rivière Saguay comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.

Lanthier

La pente associée au tronçon principal du ruisseau des Vases est élevée et assez constante tout au long du cours d'eau (Figure 53). L'amont du ruisseau est caractérisé par des dépôts perméables granulaires (Gx), alors que sa portion aval est caractérisée par des dépôts perméables argileux (LGa). L'ordre de Strahler de l'amont du tronçon principal jusqu'à environ 9 km de l'amont est de 2, de 3 sur le segment du ruisseau situé environ entre 9 et 9,8 km de distance de l'amont et de 4 sur le segment retrouvé à l'aval de la distance de 9,8 km et ce, jusqu'à l'exutoire. Un indice très élevé (21-26) est donc attendu sur le segment du ruisseau situé entre 0 et près de 4 km de l'amont, mais certaines portions de ce segment ont un indice très faible de l'intervalle 6-10. À l'inverse, un indice faible ou très faible (6-15) est attendu sur la section aval du ruisseau Lanthier. Pourtant, un segment de rivière à l'indice élevé (16-20) est retrouvé à la hauteur du 8^e km du ruisseau.

Les segments amont du ruisseau aux indices anormalement faibles sont retrouvés sur des secteurs où le substrat prédominant des zones tampons est probablement le till ou le roc (Figure 8). Dans le cas du segment aval du ruisseau à l'indice anormalement élevé, le substrat prédominant de la zone tampon autour du segment est probablement le roc (Figure 8).

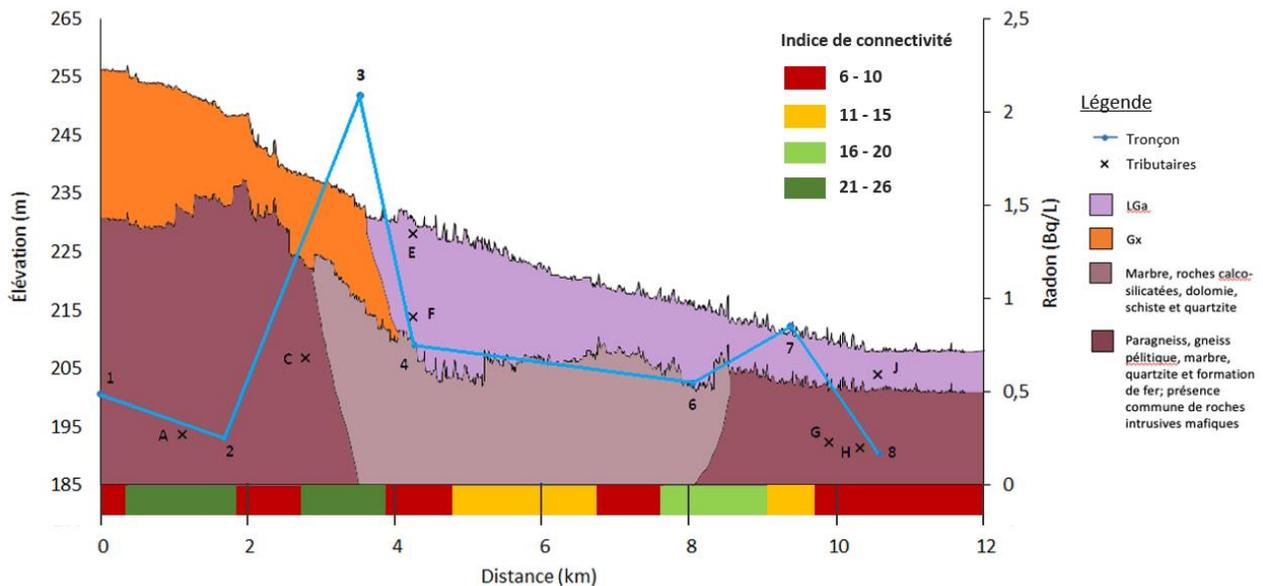


Figure 53 : Coupe géologique du tronçon principal du ruisseau Lanthier comparée à l'activité ^{222}Rn et à l'indice de connectivité.

Rivière du Nord

L'analyse des indices à l'échelle de tout le bassin de la rivière du Nord montre beaucoup plus de variabilité au niveau des indices retrouvés dans les portions amont des sous-bassins bassins versants. Le tronçon principal de la rivière du Nord lui-même ne présente pas de grande variabilité d'indice de connectivité (Figure 47), la majorité des indices étant très élevés (21-26). Cette différence peut être dû au fait que l'indice actuel ne tient compte que de trois paramètres, soit la pente, l'ordre de Strahler ainsi que le type de dépôt retrouvé à proximité du segment de cours d'eau. Dans le cas d'une très grande rivière comme la rivière du Nord, l'ordre de Strahler est très élevé et la rivière est retrouvée dans les vallées où les pentes sont moins importantes (Figure 62 en annexe). Le paramètre majeur qui peut avoir un impact sur l'indice des grands cours d'eau est donc le type de dépôts le long du cours d'eau.

5.4.3 Limitations de l'indice

L'indice de connectivité développé dans le cadre de ce mémoire est un outil très simple basé sur seulement quelques paramètres dont les poids et les cotes ont été attribuées par calibration manuelle. Cette calibration a été basée sur une comparaison des indices obtenus avec les variations de débits entre deux stations, ainsi qu'avec les valeurs de traceurs d'eau souterraine obtenues à chacune des stations. L'indice obtenu n'est pas corrélé aux compositions isotopiques des bassins versants Vases, Simon et Lanthier et il ne permet pas de reproduire les variations de la CE sur les quatre bassins versants étudiés.

Il est également possible que des pics d'activités ^{222}Rn tels que retrouvés sur les rivières à Simon, et Saguay soient représentatifs d'un apport d'eau souterraine très localisé qui ne serait pas représentatif de l'ensemble du segment de cours d'eau et qui ne pourrait donc pas être reproduit avec le bilan de masse Radin14 (Neupane et al., 2015). Ces activités anormalement élevées sont représentatives de l'hétérogénéité de l'eau sur les segments de rivières et il est possible que des erreurs se soient glissées lors de la calibration de l'indice.

L'indice de connectivité a été développé dans le but de refléter l'effet de paramètres géomorphologiques simples et disponibles sur l'émergence d'eau souterraine. Malgré la simplicité

de l'approche, la plupart des indices attribués aux sections de cours d'eau coïncident avec les zones d'émergences simulées, ainsi qu'avec les zones d'émergence déduites des données terrain.

Dans certains contextes, il a été remarqué que des indices ont été surévalués ou sous-évalués. Ces valeurs aberrantes sont dues en partie à la simplicité de l'indice et à l'absence de prise en compte de certains facteurs, mais aussi à la méthode d'extraction des paramètres géomorphologiques associés aux segments prédéfinis du réseau hydrographique (GRHQ, 2021). En effet, lorsqu'un segment se retrouve avec plusieurs valeurs possibles pour un même paramètre, celle qui domine la zone tampon du segment a été associée à ce même segment de cours d'eau. Il serait donc intéressant de calibrer la superficie de la zone tampon à prendre en compte en fonction de la longueur des différents segments utilisés. En ayant une superficie de zone tampon adaptée à l'extraction des paramètres géomorphologiques associés aux longueurs de segments de cours d'eau, moins de données aberrantes seraient retrouvées. Il sera tout de même important de vérifier la validité de cette calibration, surtout dans un contexte où l'indice servirait à définir des zones de potentiel d'émergence de l'eau souterraine à plus grande échelle. Dans un tel cas, il serait alors irréaliste de vérifier manuellement la validité de tous les indices de connectivité associés aux segments de cours d'eau.

Dans d'autres contextes, l'indice ne varie pas assez et a probablement été surévalué pour certains segments. Un indice tenant compte de plus de paramètres permettrait d'obtenir des valeurs plus variées et plus représentatives de chacun des milieux. Il pourrait être possible d'améliorer l'indice, notamment en prenant compte de la présence de lacs et de milieux humides, de l'occupation du territoire, de l'épaisseur et de la nature des dépôts meubles, de la nature des sols et des niveaux piézométriques. Par exemple, l'occupation du territoire pourrait permettre de refléter la possibilité d'un abaissement de la nappe lorsqu'un grand nombre de puits se trouvent au même endroit. Également, si des sablières sont présentes sur le territoire, il y a de fortes chances de retrouver d'importantes épaisseurs de dépôts meubles perméables. Cette activité pourrait indiquer une bonne connectivité nappe-rivière ou encore signifier qu'un rabattement de la nappe est possible dans ce secteur s'il y a un pompage qui est impliqué afin d'extraire les dépôts. Les régions forestières sont généralement retrouvées sur les dépôts de tills minces et continus, ainsi que sur les dépôts granulaires perméables, ce qui peut faciliter à la fois la recharge et l'émergence de l'eau souterraine en cours d'eau. La présence d'agriculture est fréquente sur les dépôts argileux et peut entraîner des

baisses de niveau de nappe par pompage, deux facteurs qui peuvent contribuer à une réduction des interactions nappe-rivière.

Les résultats de ce mémoire ont démontré qu'il est possible de développer un tel indice de connectivité et qu'une fois calibré, il est très facile d'appliquer l'indice à des échelles locales (Figure 43, 44, 45 et 46), ou plus régionales, tel que pour le bassin versant de la rivière du Nord (Figure 47). Des travaux futurs devraient s'attarder à calibrer l'indice de connectivité en fonction d'un plus grand nombre de paramètres géomorphologiques, et à le comparer avec des données mesurées sur des bassins versants aux zones d'émergences bien identifiées. Il faudrait également réviser la démarche pour calibrer la superficie d'une zone tampon en fonction des longueurs de segments de cours d'eau. Il devrait alors être relativement simple de construire des cartes de zones d'émergence de l'eau souterraine sur les cours d'eau à l'échelle régionale.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Le but de ce projet de maîtrise était de mieux comprendre l'émergence de l'eau souterraine dans les portions amont des cours d'eau. Les objectifs spécifiques étaient 1) d'identifier *in situ* les zones d'émergence sur quatre sous-bassins amont, 2) de quantifier par bilan de masse l'apport d'eau souterraine en étiage à ces cours d'eau et 3) de lier l'émergence d'eau souterraine à des facteurs géomorphologiques. Quatre sous-bassins versants ont été étudiés, soit ceux de la rivière à Simon, du ruisseau des Vases, de la rivière Saguy et du ruisseau Lanthier, tous situés dans la région des Laurentides. Au cours de l'été 2021, 98 stations ont été échantillonnées sur les tronçons principaux des quatre rivières à l'étude ainsi que sur leurs principaux tributaires afin de mesurer les débits et les traceurs d'eau souterraine sélectionnés dans le cadre de ce projet, soit l'activité ^{222}Rn , la conductivité électrique ainsi que la composition isotopique de l'eau. Les évolutions amont aval des débits et des traceurs d'eau souterraine ont été comparés et des bilans de masse de l'activité ^{222}Rn retrouvée sur les cours d'eau et leurs tributaires ont permis de calculer les apports d'eau souterraine aux quatre bassins versants. La calibration de tous les bilans de masse a été jugée satisfaisante. Un indicateur simple reliant l'émergence de l'eau souterraine en cours d'eau et des paramètres géomorphologiques facilement disponibles a été développé.

Ce projet a permis d'identifier des zones d'émergence d'eau souterraine sur le ruisseau des Vases et sur la rivière Saguy. Sur ces deux bassins versants, les zones d'émergence identifiées à l'aide des résultats de mesures de débits et des traceurs de l'eau souterraine coïncident avec les zones d'émergence simulées par les bilans de masse, ainsi qu'avec les zones d'émergences identifiées à l'aide de l'indice de connectivité. Les zones d'émergences identifiées sur le ruisseau des Vases sont retrouvées à l'amont du bassin versant. Cette contribution d'eau souterraine estimée à l'aide du bilan de masse est de $527 \text{ m}^3/\text{j}$ (3,5 % du débit à l'exutoire). Les zones d'émergence retrouvées sur la rivière Saguy indiquent que plusieurs segments du tronçon de la rivière sont soutenus par une contribution d'eau souterraine. Estimée à l'aide du bilan de masse, cette contribution d'eau souterraine est de $7456 \text{ m}^3/\text{j}$ (11,5 % du débit à l'exutoire). Des zones d'émergences d'eau souterraine ont été identifiées à l'amont du ruisseau Lanthier et cette contribution d'eau souterraine est estimée à $3419 \text{ m}^3/\text{j}$ (28 % du débit à l'exutoire). Des zones d'émergence de l'eau souterraine

ont été identifiées sur la rivière à Simon, et la contribution d'eau souterraine estimée à l'aide du bilan de masse est de 28 989 m³/j (28,4 % du débit à l'exutoire).

Les traceurs naturels utilisés se sont avérés utiles pour quantifier les apports d'eau souterraine aux quatre cours d'eau étudiés. Pris individuellement, les traceurs ont chacun des limites et des avantages. Par exemple, la conductivité électrique peut être affectée par les effets de dilutions liés aux précipitations ainsi qu'à la présence de lacs, ainsi que les effets de concentration liés à l'évaporation et à la présence de milieux humides. Les isotopes stables de l'eau sont influencés par la variabilité latitudinale, les appauvrissements de la composition isotopiques liés à la température, les enrichissements de la composition isotopiques liés aux précipitations, ainsi que la présence de lacs et de milieux humides qui peuvent créer un effet réservoir et affecter les compositions isotopiques. Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'imprécision des activités ²²²Rn, notamment ceux qui induisent un dégazage du ²²²Rn, tels que la géomorphologie du cours d'eau, la présence d'obstacles dans le lit du cours d'eau et ceux qui peuvent surestimer l'activité de ce traceur, notamment la production de ²²²Rn dans les zones hyporhéiques des cours d'eau. Il semble pertinent de combiner plusieurs traceurs afin d'avoir une vision d'ensemble sur les différents paramètres qui entrent en jeu dans l'évaluation des zones d'émergence de l'eau souterraine sur les cours d'eau.

L'indice de connectivité développé tient compte de l'ordre de Strahler, de la pente et du type de dépôts associés aux segments de cours d'eau. Il s'agit d'un indice simple d'utilisation qui permet d'identifier aisément les zones d'émergence de l'eau souterraine sur les cours d'eau. L'indice n'est pas parfait et certaines valeurs aberrantes ont été mises en évidence lors de la comparaison avec les mesures *in situ*. Malgré quelques limitations associées au petit nombre de caractéristiques des tronçons prises en compte ou à la méthodologie de calibration des paramètres de l'indice, les résultats montrent que l'indice permet d'identifier relativement bien les zones d'émergence de l'eau souterraine à des échelles locales. Il peut facilement être déployé sur d'autres bassins versants ou à des échelles plus grandes.

La méthode pourrait être utilisée dans d'autres contextes, cependant le choix des traceurs de l'eau souterraine devrait être fait en fonction du territoire étudié et du contexte géoclimatique propre à la région étudiée. L'indice a été développé en fonction du contexte géomorphologique et du climat retrouvé au Québec, ce qui implique des années hydrogéologiques différentes d'ailleurs dans le

monde, des sols jeunes ainsi qu'une présence importante de dépôts quaternaires. L'indice serait donc applicable sur tous les bassins versants amont des Laurentides. Afin d'être appliqué dans d'autres contextes géoclimatiques, il serait important de tester l'indice avec des traceurs d'eau souterraine adaptés à ces régions, surtout pour les régions nordiques, désertiques, tropicales ou côtières. Cependant, l'indice actuel pourrait être utilisé dans des contextes similaires à celui du Québec dans les bassins versants amont retrouvés en territoire boréal.

RÉFÉRENCES

Abrinord. 2018. Plan d'action de cours d'eau pour la rivière à Simon, carte interactive. Récupérée de <https://abrinord.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=0d4b1dfb35ac4acb8a48f2f578f4ed39>.

Adyasari, D., Dimova, N., Dulai, H., Gilfedder, B., Cartwright, I., McKenzie, T. et Fuleky P. 2023. Radon-222 as a groundwater discharge tracer to surface waters, *Earth Science Reviews*, vol. 238, 10432, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104321>.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J. et Petty, R. 1987. DRASTIC: Standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, Washington D.C, États-Unis. 622 p.

Beaulieu, J., Shuster, W. et Rebholz, J. 2012. Controls on gas transfer velocities in a large river, *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, G02007, doi:10.1029/2011JG001794.

Beisner K., Gardner, P. et Hunt, A. 2018. Geochemical characterization and modeling of regional groundwater contributing to the Verde River, Arizona between Mormon Pocket and the USGS Clarkdale gage. *Journal of Hydrology*, vol. 564, 99-114.

Bergeron, E. 2018. Gigantesque glissement de terrain à Brownsburg-Chatham. *Journal L'Argenteuil*, Lachute. Récupéré en ligne <https://online.flippingbook.com/view/369412/4/#zoom=true>.

Boretti, A. et Rosa, L. 2019. Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water* vol.2, 15, <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>.

Botter, G., Carozzani, A., Peruzzo, P. et Durighetto, N. 2022. Steps dominate gas evasion from a mountain headwater stream. *Nature Communications*, vol. 13, 7803, doi.org/10.1038/s41467-022-35552-3.

Cartwright, I., Hofmann, H., Sirianos, M., Weaver, T. et Simmons, C. 2011. Geochemical and ²²²Rn constraints on baseflow to the Murray River, Australia, and timescales for the decay of low-salinity groundwater lenses. *Journal of Hydrology*, vol. 405, 333-343.

CETRAHE (Cellule R&D d'Expertise et de Transfert en Tracés Appliqués à l'Hydrogéologie et à l'Environnement) et BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). 2019. Tracés hydrogéologiques – Historique, application, principaux traceurs. Récupéré de <https://sigescen.brgm.fr/Historique-applications-principaux-traceurs.html>.

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>.

Cook, P., Favreau, G., Dighton, J.C. et Tickell, S. 2003. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. *Journal of Hydrology*, vol. 277, 74-88. doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00087-8.

Cook, P., Lamontagne, S., Derhane, D., et Clark, J. 2006. Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers ^{222}Rn and SF_6 . *Water Resources Research*, vol. 42, 10411, doi:10.1029/2006WR004921.

Cook, P. 2012. Estimating groundwater discharge to rivers from river chemistry surveys. *Hydrological Processes*, vol. 27, 3694-3707.

Corriveau L., Rivard, B. et Van Breemen. O. 1998. Rheological controls on Grenvillian intrusive suites: implications for tectonic analysis. *Journal of Structural Geology*, vol. 20, 1191-1204.

Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, vol. 16 (4), 436-468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>.

DEH (Direction de l'expertise hydrique). 2021. Atlas hydroclimatique du Québec méridional, stations hydrométriques. Récupéré de <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/stations-hydrometriques/index.html>.

Döll, P. et Fielder, K. 2008. Global-scale modelling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol.12, 863-885, doi:10.5194/hess-12-863-2008.

Dubois, F. et Larocque, M. 2021, 16-18 mars. *Groundwater discharge in the rivers of the Laurentides region* [Résumé]. Congrès des Étudiants du Geotop 2021, en ligne. <https://www.geotop.ca/index.php/fr/formation/congres-etudiants-2021>.

Dubois, F., Larocque, M. et Gagné, S. 2022, 5-6 mai. *Indicateurs d'émergence des eaux souterraines dans les cours d'eau – Exemple de quatre bassins versants amont de la région des Laurentides* [Résumé]. Congrès RHQ22 - La recherche hydrologique au Québec – 4e édition - « Imaginer l'hydrologie de demain », Québec. <https://centreau.org/evenements-actualites/evenements/congres-rhq22-la-recherche-hydrologique-au-quebec-4e-edition-imaginer-lhydrologie-de-demain/>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada). 2017. Prélèvement et consommation d'eau par secteur. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/prelevement-consommation-eau-secteur.html>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada). 2021. Données climatiques d'Environnement et Changement climatique Canada – Visualiseur de données climatiques. Récupéré de <https://visualiseur-climatique.canada.ca/cartes-climatiques.html#/?t=annual&v=monthly&d=normal&z=2>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada). 2023a. Bulletin des tendances et des variations climatiques — Été 2021. Récupéré de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/recherche-donnees/tendances-variabilite-climatiques/tendances-variations/bulletin-ete-2021.html>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada). 2023b. Rapport de données quotidiennes – Station Arundel. Récupéré de [Rapport de données quotidiennes pour août 2021 - Climat - Environnement et Changement climatique Canada \(meteo.gc.ca\)](https://www.meteo.gc.ca/rapports/rapport-de-donnees-quotidiennes-pour-août-2021-climat-environnement-et-changement-climatique-canada).

Elsinger, R. J. et Moore, W.S. 1983. Gas exchange in the Pee Dee River based on ^{222}Rn evasion. *Geophysical Research Letters*, vol. 10, 443-446.

Ferlatte, M. 2011. Quantification des flux d'eau souterraine dans la rivière Bécancour à partir des concentrations en ^{222}Rn à l'aide du modèle Radin14. Rapport de méthode analytique, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada. 24 p.

Frei, S. et Gilfedder, B.S. 2015. FINIFLUX: An implicit finite element model for quantification of groundwater fluxes and hyporheic exchange in streams and rivers using radon. *Water Resources Research*, vol. 51, 6776-6786.

Gagné, S., M. Larocque, A. Morard, M. Roux. 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.

Gleeson, T., Novakowski, K., Cook, P. et Kyser, T. 2009. Constraining groundwater discharge in a large watershed: Integrated isotopic, hydraulic and thermal data from the Canadian shield. *Water Resources Research*, vol. 45 (8). doi:10.1029/2008wr007622.

Gleeson, T., Manning, A., Popp, A., Zane, M. et Clark, J. 2018. The suitability of using dissolved gases to determine groundwater discharge to high gradient streams. *Journal of Hydrology*, vol. 577, 651-572.

GRHQ (Géobase du Réseau Hydrographique du Québec). 2021. Réseau hydrographique du Québec. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq>.

Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H.X., Gosling, S., Grillakis, M., Koutroulis, A., Leonard, M., Liu, J., Schmied, H., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X. et Zhao, F. 2021. Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, vol. 371, 1159-1162, doi:10.1126/science.aba3996.

Hartman, B. et Harnmond, D. E. 1984. Gas exchange rates across the sediment-water and air water interfaces in south San Francisco Bay. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 89, 3593-3603.

Isokangas, E., Ronkanen, A-K., Rossi, P., Marttila, H. et Klove, B. 2019. A tracer-based method for classifying groundwater dependence in boreal T headwater streams. *Journal of Hydrology*, vol. 577, 123762. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.029.

Kaule, R. et Gilfedder, B. 2021. Groundwater dominates water fluxes in a headwater catchment during drought. *Frontiers in Water*, vol.3, 14p. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.706932>.

Kelleher, C., Wagener, T. et McGlynn, B. 2015. Model-based analysis of the influence of catchment properties on hydrologic partitioning across five mountain headwater subcatchments. *Water Resources Research*, vol. 51, 4109-4136, <https://doi.org/10.1002/2014WR016147>

Lefebvre, K. 2011. Développement de la méthode de mesure de ^{222}Rn dans les eaux- application sur le site de l'Hallue. Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada. 68 p.

Lefebvre, K., Barbecot, F., Ghaleb, B., Larocque, M. et Gagné, S. 2013. Full range determination of ^{222}Rn at the watershed scale by liquid scintillation counting. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 75, 71-76.

Lefebvre, K., Barbecot, F., Ghaleb, B., Larocque, M. et Gagné, S. 2015. Combining isotopic tracers (^{222}Rn and $\delta^{13}\text{C}$) for improved modelling of groundwater discharge to small rivers. *Hydrological Processes* vol. 29, 2814–2822, doi: 10.1002/hyp.10405.

Lefebvre, K. 2015 Diagnostic et quantification des flux nappe - rivière : modélisations hydrodynamique et géochimique du bassin versant de l'Yvette amont (France). Sciences de la Terre. Université Paris Saclay (COMUE); Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada. 315p. NNT : 2015SACLS152.

Leibundgut, C. et Seibert, J. 2011. Tracer Hydrology. In: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science*, vol. 2, 215–236, Oxford: Academic Press.

McDowell, M. et Johnson, M. 2018. Gas Transfer Velocities Evaluated Using Carbon Dioxide as a Tracer Show High Streamflow to Be a Major Driver of Total CO₂ Evasion Flux for a Headwater Stream. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 123, no. 7, 2183-2197, doi.org/10.1029/2018JG004388.

MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs). 2017. Portrait des stations municipales de production d'eau potable approvisionnées en eau de surface au Québec. Récupéré de https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/expl_mun/surface_200703.pdf.

MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs). 2020. Jeux de données – Milieux humides potentiels et détaillés. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/organization/developpement-durable-environnement-et-lutte-contre-les-changements-climatiques>.

MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs). 2021. Données climatiques – Observations quotidiennes. Récupéré de <https://environnement.gouv.qc.ca/climat/donnees/OQcarte.asp>.

MELCCFP (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs). 2023. Normales climatiques du Québec 1981-2010, Sommaire, Station Arundel. Récupéré de <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/sommaire.asp?cle=7030310>.

MRNF (Ministère des ressources naturelles et des forêts). 2021. Géologie du Quaternaire. Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/geologie-du-quaternaire>.

MRNF. 2021b. Jeux de données – LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente). Récupéré de <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>.

Messenger, M.L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamoureux, N., Pella, H., Snelder, D., Tockner, T., Trautmann, T., Watt, C. et Datry, T. 2021. Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature*, vol.594, 391–397, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5>.

Miller, M., Buto, S., Susong, D. et Rumsey, A. 2016. The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin. *Water Resources Research*, vol. 52, 3547–3562, doi:10.1002/2015WR017963.

Moreira, F. 2016. Estimation de la décharge des eaux souterraines dans deux rivières du Québec par le traçage du ^{222}Rn et de l'argon. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en Sciences de la Terre, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 122 p.

Neupane, R., White, J., Allen, P. et Dworkin, S. 2015. Sub-surface water contribution to recession flow in a mountain headwater stream system based on single monitoring campaign. *Hydrological Processes*, vol. 30, 899-913, doi: 10.1002/hyp.10678.

Ntona, M., Busico, G., Mastrocicco, M. et Kazakis, N. 2022. Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of The Total Environment*, vol. 846, 157355, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355>.

Occhietti, S. et Richard, P. J. H. 2003 Effet réservoir sur les âges ^{14}C de la Mer de Champlain à la transition Pléistocène-Holocène : Révision de la chronologie de la déglaciation au Québec méridional. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 57, 115-136. doi.org/10.7202/011308ar.

Olivier, A., Pierrefeu, G., Scotti, M. et Blanquart, B. 2008. Incertitudes des mesures de débit réalisées à l'ADCP. *Journées de l'hydraulique - Mesures hydrologiques et incertitudes en hydrométrie et qualité de l'eau*. vol. 30, 7 p.

Peel, M., Kipfer, R., Hunkeler, D. et Brunner, P. 2022. Variable ^{222}Rn emanation rates in an alluvial aquifer: Limits on using ^{222}Rn as a tracer of surface water – Groundwater interactions. *Chemical Geology*, vol. 599m 120829.

Peralta-Tapia, A., Sponseller, R., Agren, A., Tetzlaff, D., Soulsby, C. et Laudon, H. 2015. Scale-dependent groundwater contributions influence patterns of winter baseflow stream chemistry in boreal catchments. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 120, 847-858, doi:10.1002/2014JG002878.

Perkin, J., Gido, K., Falke, J., Fausch, K., Crockett, H., Jonhson, E. et Sanderson, J. 2017. Groundwater declines are linked to changes in Great Plains stream fish assemblages. *PNAS*, vol. 114, no.28, 7373-7378, <https://doi.org/10.1073/pnas.1618936114>.

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

Raymond, P., Zappa, C., Butman, D., Bott, T., Potter, J., Mulholland, P., Laursen, A., McDowell, W. et Newbold, D. 2012. Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, vol. 2, 41-53, doi.org/10.1215/21573689-1597669.

Rodellas, V., Stieglitz, T., Tamborski, J., van Beek, P., Andrisoa, A et Cook, P. 2021. Conceptual uncertainties in groundwater and porewater fluxes estimated by radon and radium mass balances. *Limnology and Oceanography*, vol. 66 (4), 1237-1255, doi.org/10.1002/lno.11678.

RPEP (Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection). 2018. 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>.

Schubert, M., Knoeller, K., Mueller, C. et Gilgedder, B. 2020. Investigating river water/groundwater interaction along a rivulet section by ^{222}Rn mass balancing. *Water*. vol. 12 (11), 3027, <https://doi.org/10.3390/w12113027>.

Stellato L., Petrella, E., Terrasi, F., Belloni, P., Belli, M., Sansone, U. et Celico, F. 2008. Some limitations in using ^{222}Rn to assess river-groundwater interactions: the case of Castel di Sangro alluvial plain (central Italy). *Hydrogeology Journal*, vol. 16, 701-712.

Tanner, A. B. 1980 Radon migration in the ground: a supplementary review; 1980; Book chapter; 51; Federal Government Series; Natural radiation environment III: proceedings of a symposium held at Houston, Texas. DOE Symposium Series 51, vol. 1, 23-28.

Tetzlaff, D. et Soulsby, C. 2008. Sources of baseflow in larger catchments – Using tracers to develop a holistic understanding of runoff generation. *Journal of Hydrology*, vol. 359, 287-302.

Tobias, C. R., Bohlke, J. K., Harvey, J. W. et Busenberg, E. 2009. A simple technique for continuous measurement of time-variable gas transfer in surface waters. *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 7, 185-195.

Tucker, D. 2005. Orographic Precipitation. In: Oliver, J.E. (eds) *Encyclopedia of World Climatology*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_153.

Ulseth, A., Hall, R., Boix Canadell, M., Madinger, H., Niayifar, A. et Battin, T. 2019. Distinct air–water gas exchange regimes in low- and high-energy streams. *Nature Geosciences*, vol. 12, 259–263, doi.org/10.1038/s41561-019-0324-8.

Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, P., Freund, A., Schirmer, M. et Cirpka, O. 2010. Fluctuations of electrical conductivity as a natural tracer for bank filtration in a losing stream. *Advances in Water Resources*, vol. 33, p.1296-1308, doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.02.00.

Vreca, P et Kern, Z. 2020 Use of water isotopes in hydrological processes. *Water*, vol.12, 2227, [doi:10.3390/w12082227](https://doi.org/10.3390/w12082227)

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., et Wiberg, D. 2016. Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WfS) initiative and its approaches, *Geoscientific Model Development*, vol.9, 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>.

Wang, J., Bombardelli, F. et Dong, X. 2021. Physically Based Scaling Models to Predict Gas Transfer Velocity in Streams and Rivers. *Water Resources Research*, vol. 57 (3), doi.org/10.1029/2020WR028757.

Wanninkhof, R. 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal Geophysical Research*. vol. 97, 7373-7382.

Waseem, M., Kachholz, F., Klehr, F. et Tränckner, J. 2020. Suitability of a Coupled Hydrologic and Hydraulic Model to Simulate Surface Water and Groundwater Hydrology in a Typical North-Eastern Germany Lowland Catchment. *Applied Sciences* 2020. Vol. 10, 1281, <https://doi.org/10.3390/app10041281>.

Yang, J., Yu, Z., Yi, P., Frape, S., Gong, M. et Zhang, Y. 2020. Evaluation of surface water and groundwater interactions in the upstream of Kui river and Yunlong Lake, Xuzhou, China. *Journal of Hydrology*, vol. 583, 124-149, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124549>.

Zappa, C., Raymond, P., Terray, E. et McGillis, W. 2003. Variation in surface turbulence and the gas transfer velocity over a tidal cycle in a macro-tidal estuary. *Estuaries*, vol. 26, no. 6, 1401-1413.

Zappa C., McGillis, W., Raymond, P., Edson, P., Hints, E., Zemmelen, H., Dacey, J. et Ho, D. 2007. Environmental turbulent mixing controls on air-water gas exchange in marine and aquatic systems. *Geophysical Research Letters*, vol. 34, 10601. <https://doi.org/10.1029/2006GL028790>.

ANNEXE A

CARTES RÉGIONALES

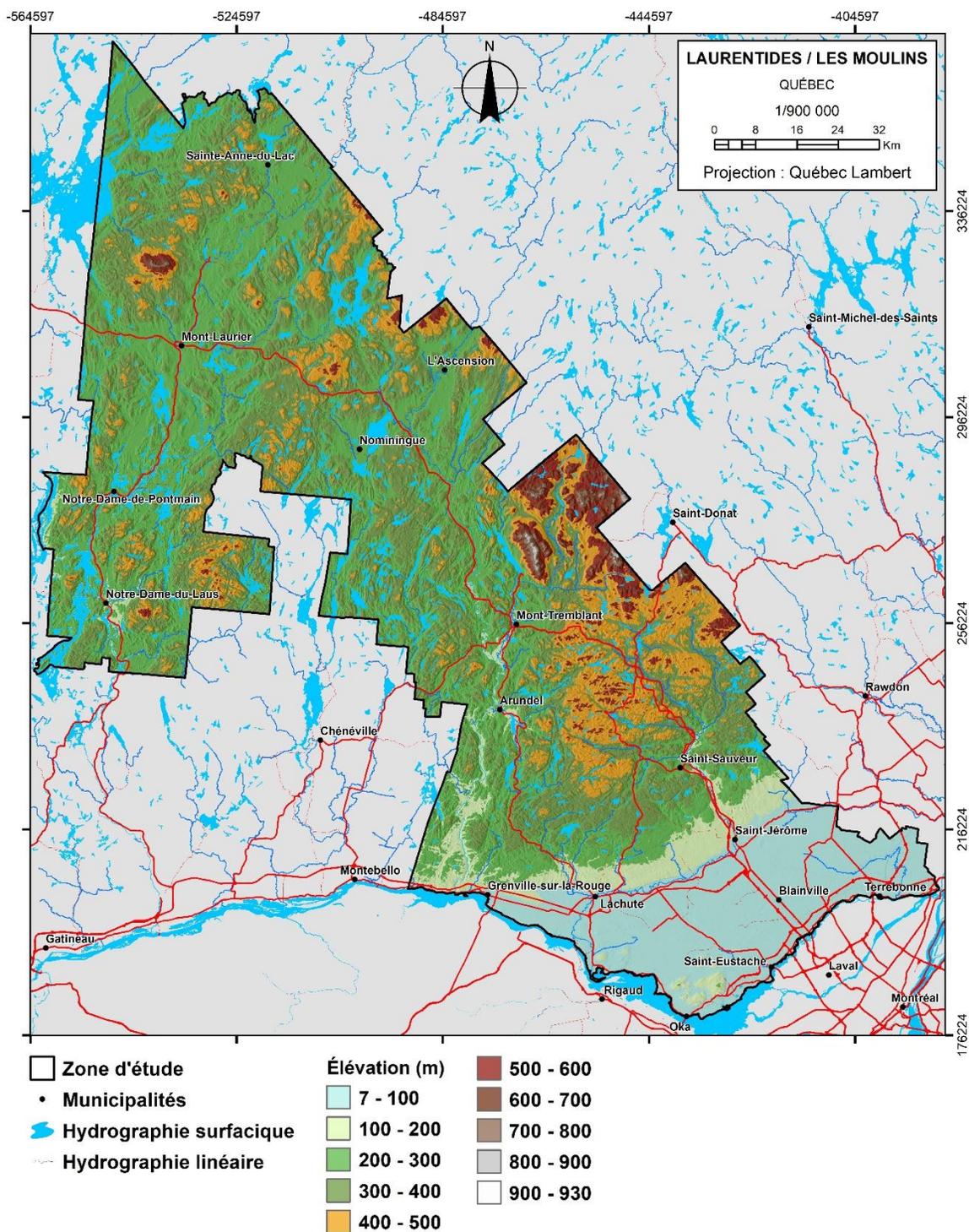


Figure 54 : Topographie de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

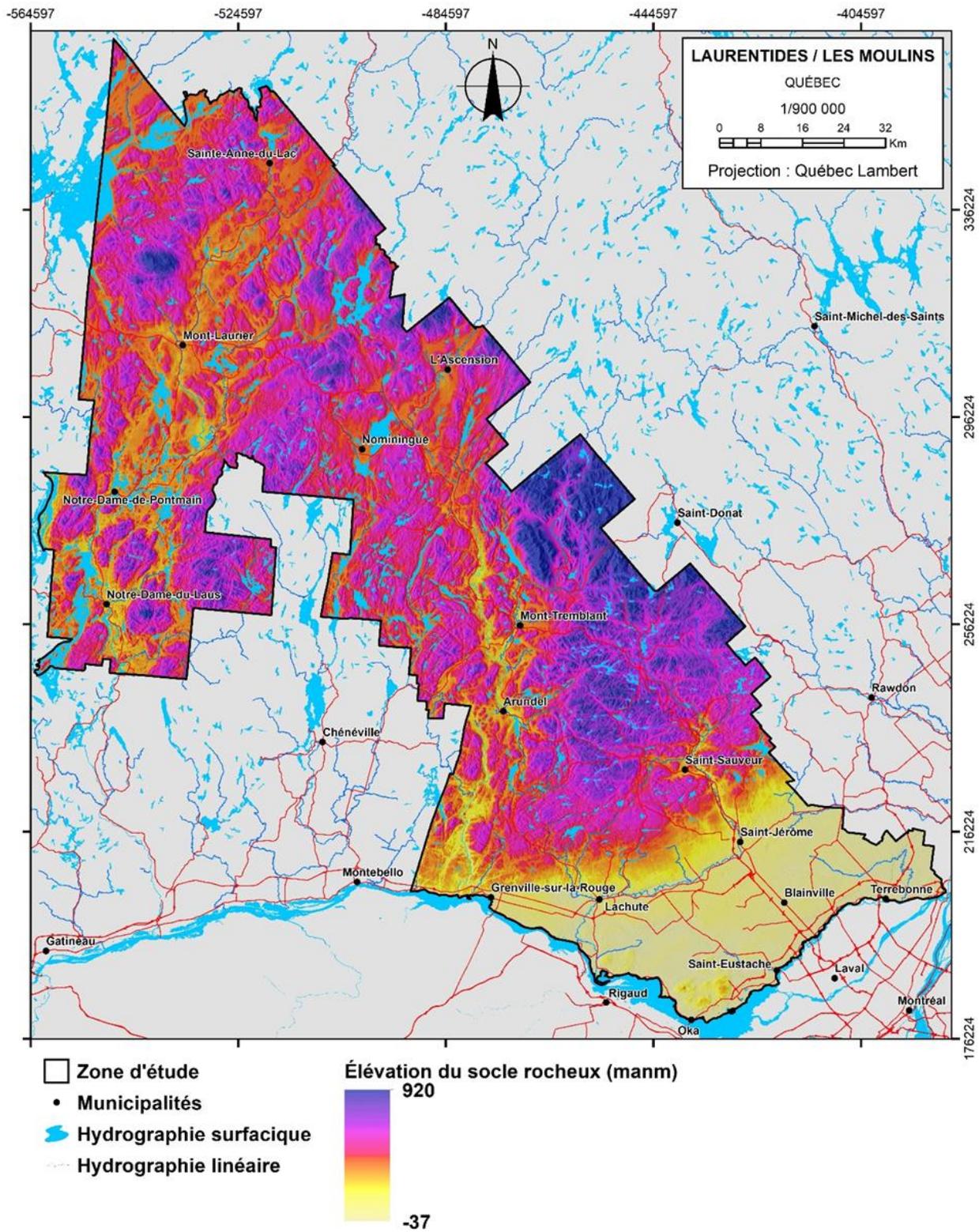


Figure 55 : Topographie du socle rocheux de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

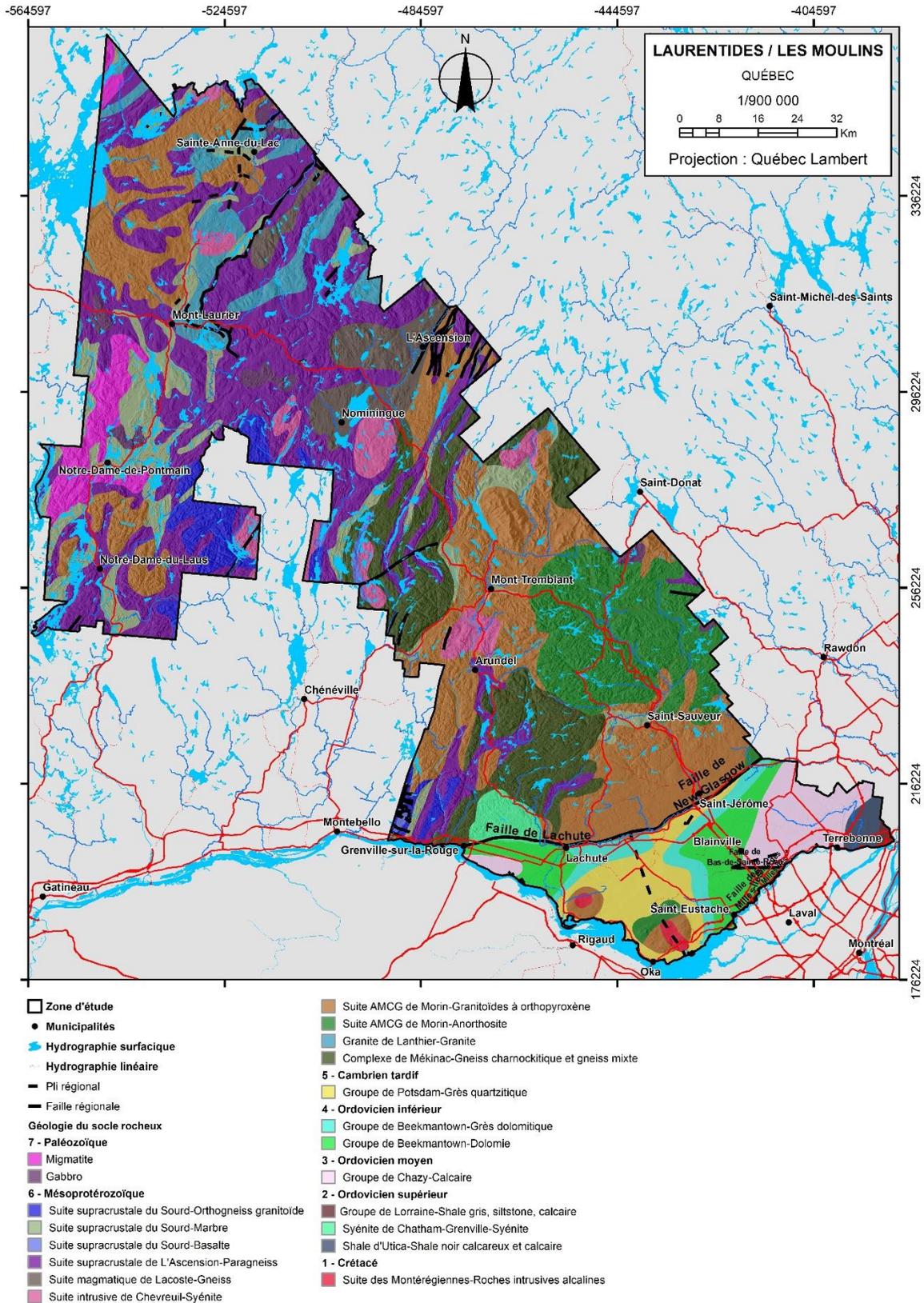


Figure 56 : Géologie de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

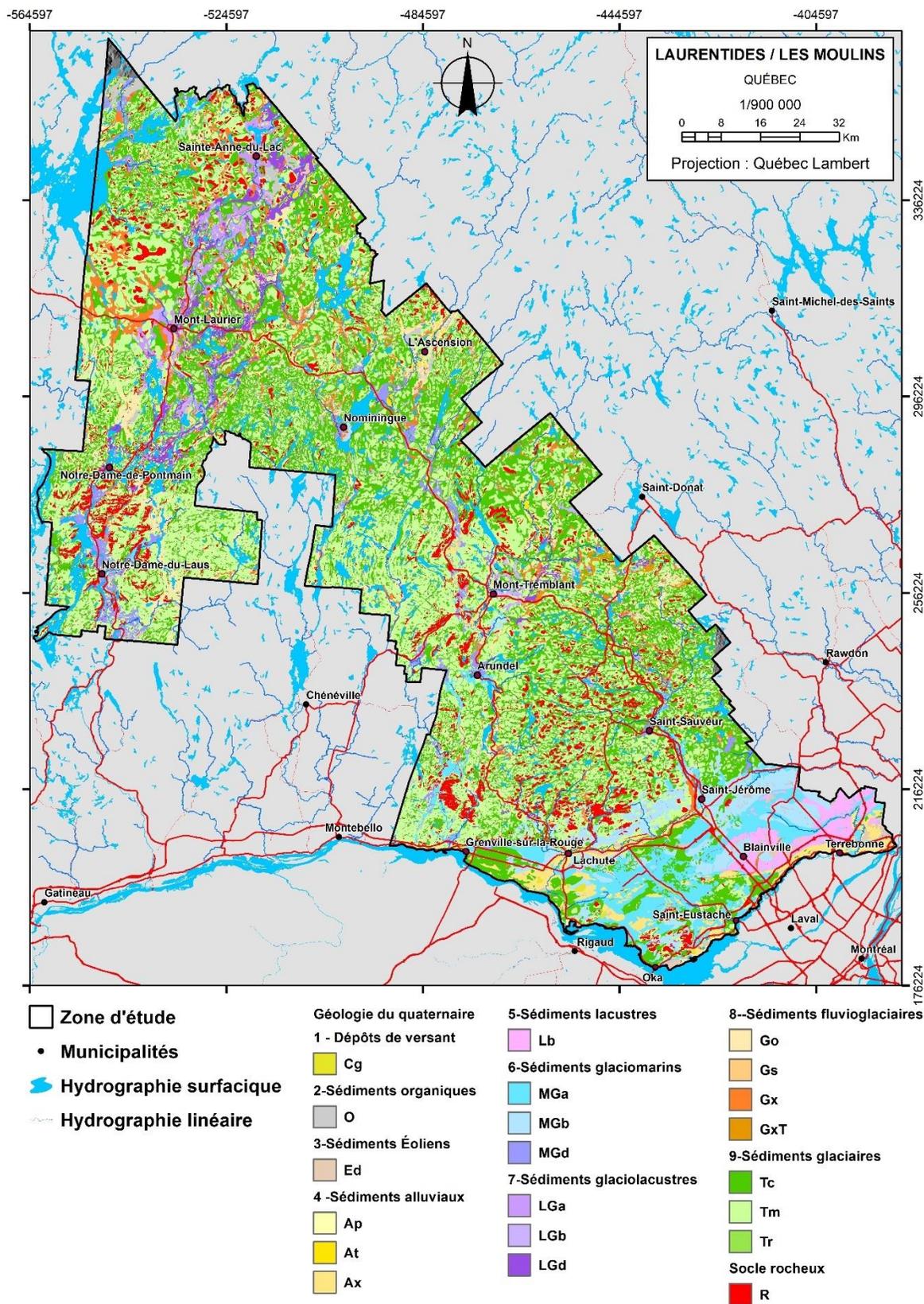


Figure 57 : Dépôts quaternaires de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

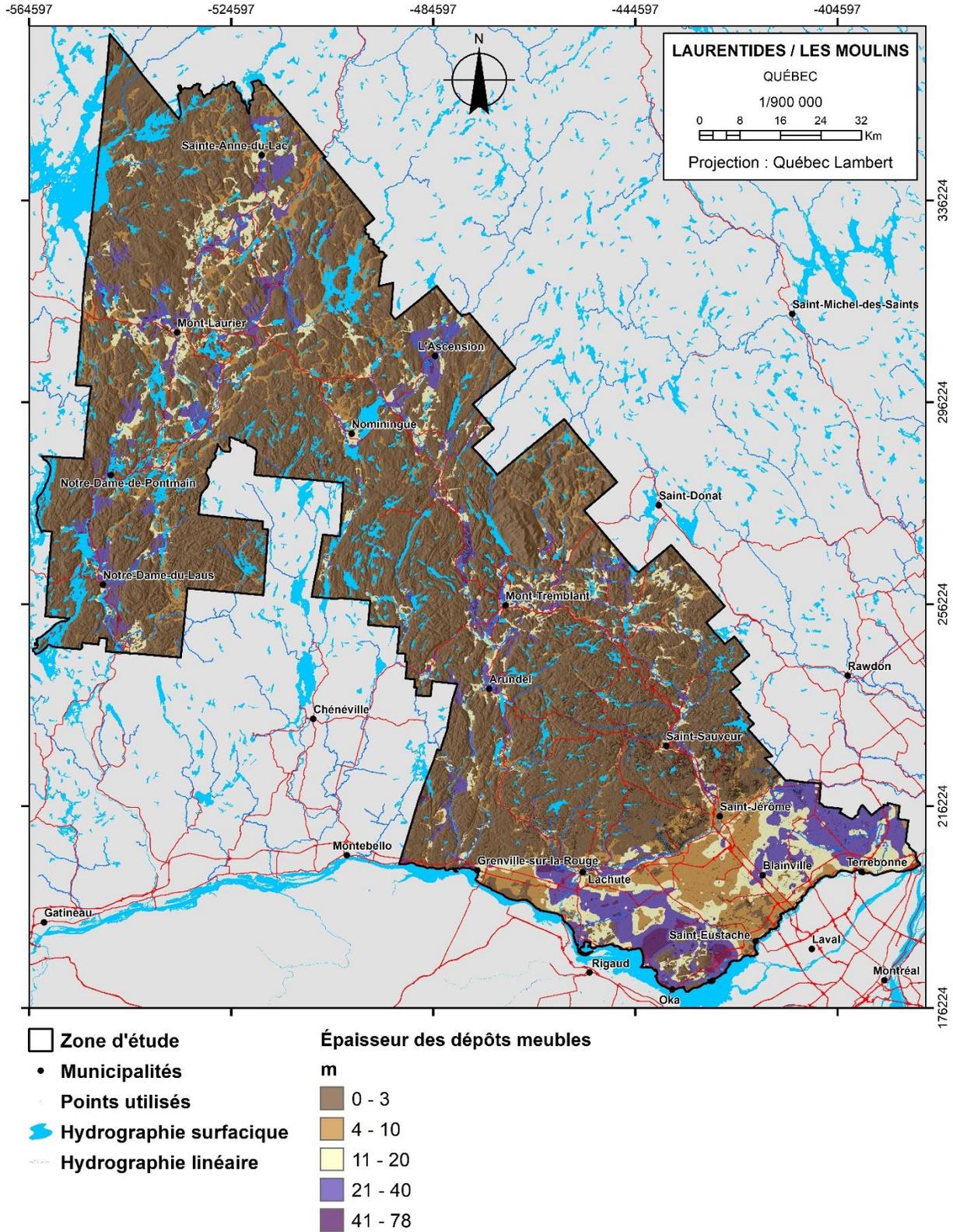


Figure 58 : Épaisseur des dépôts meubles de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

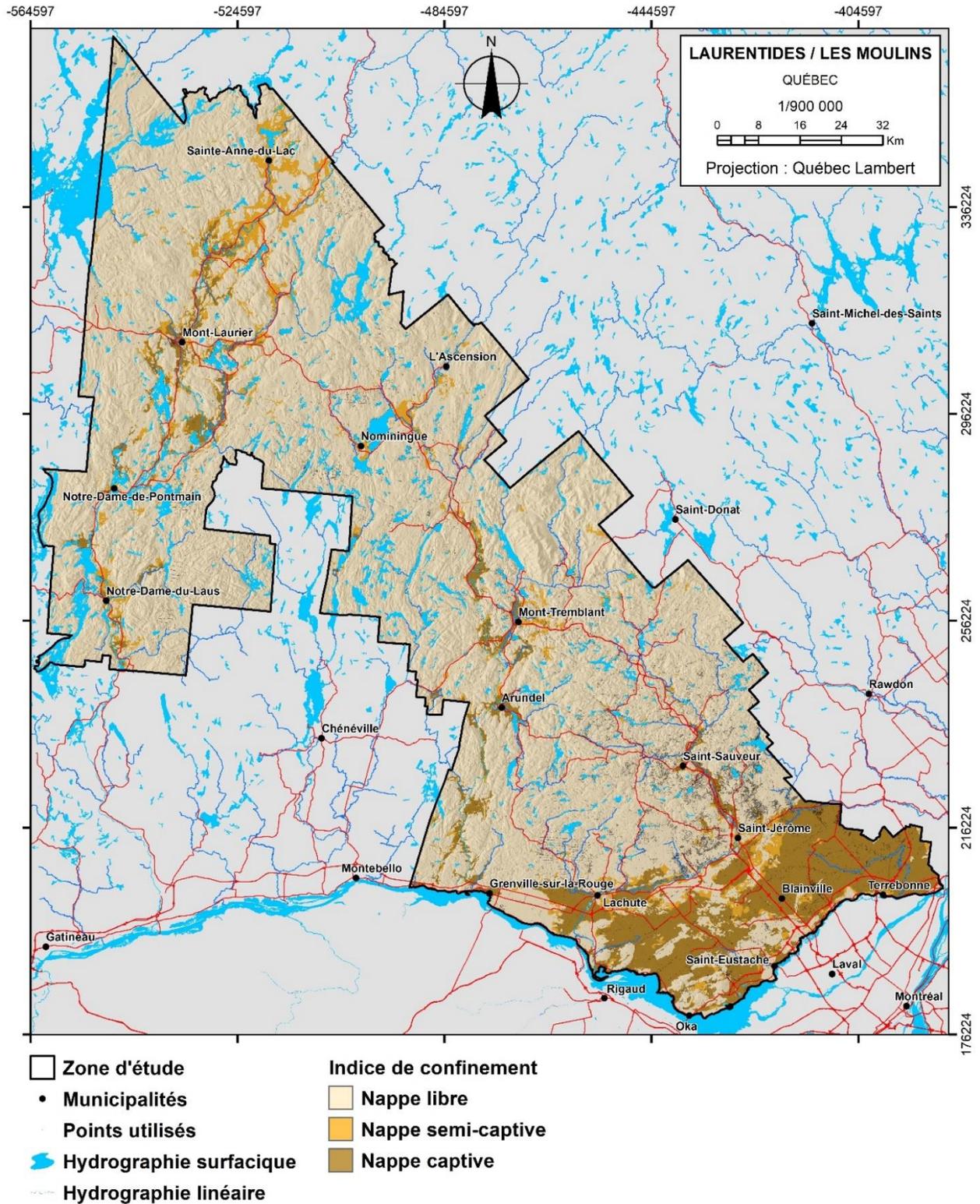


Figure 59 : Indice de confinement de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

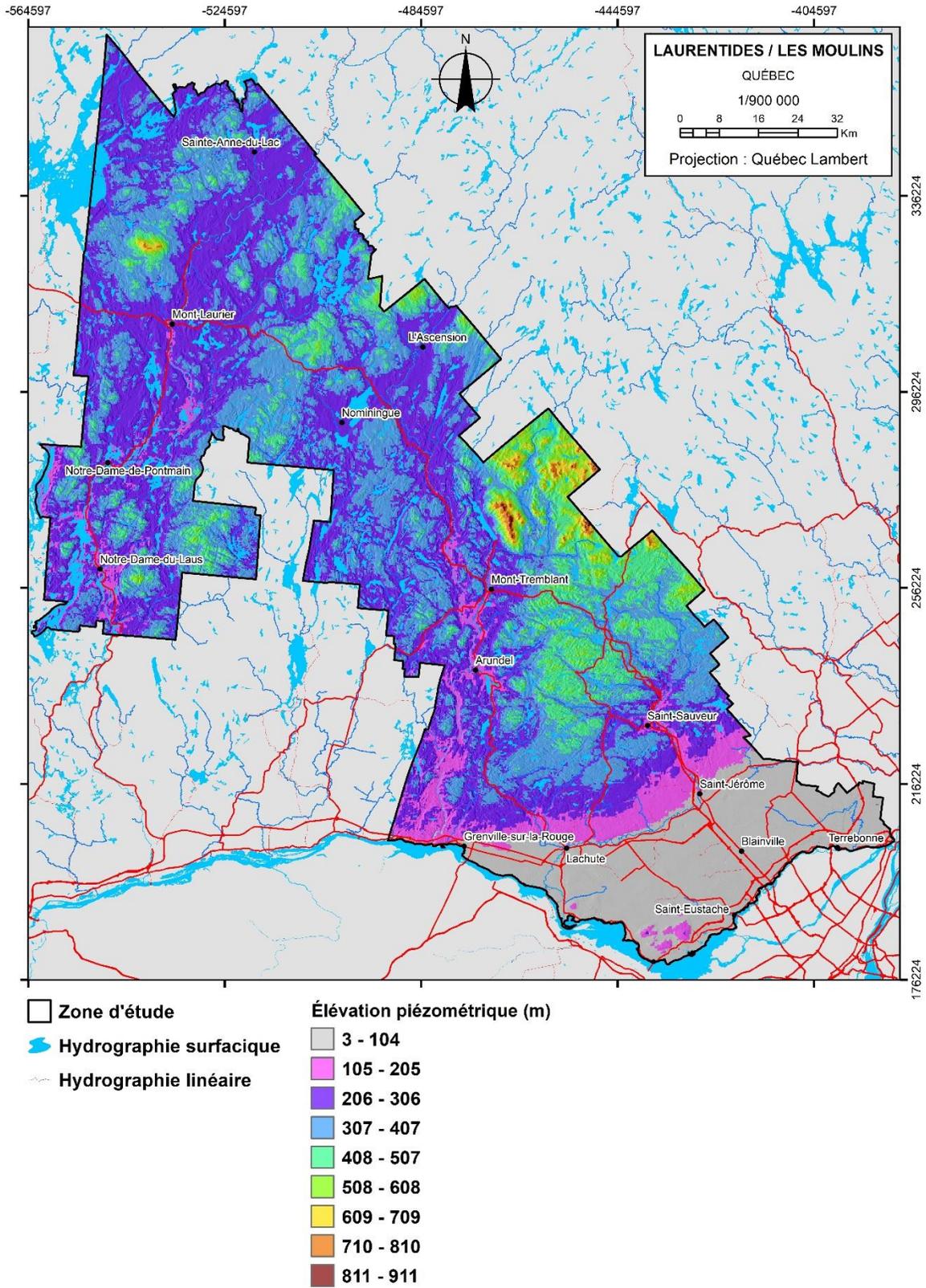


Figure 60 : Piézométrie de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

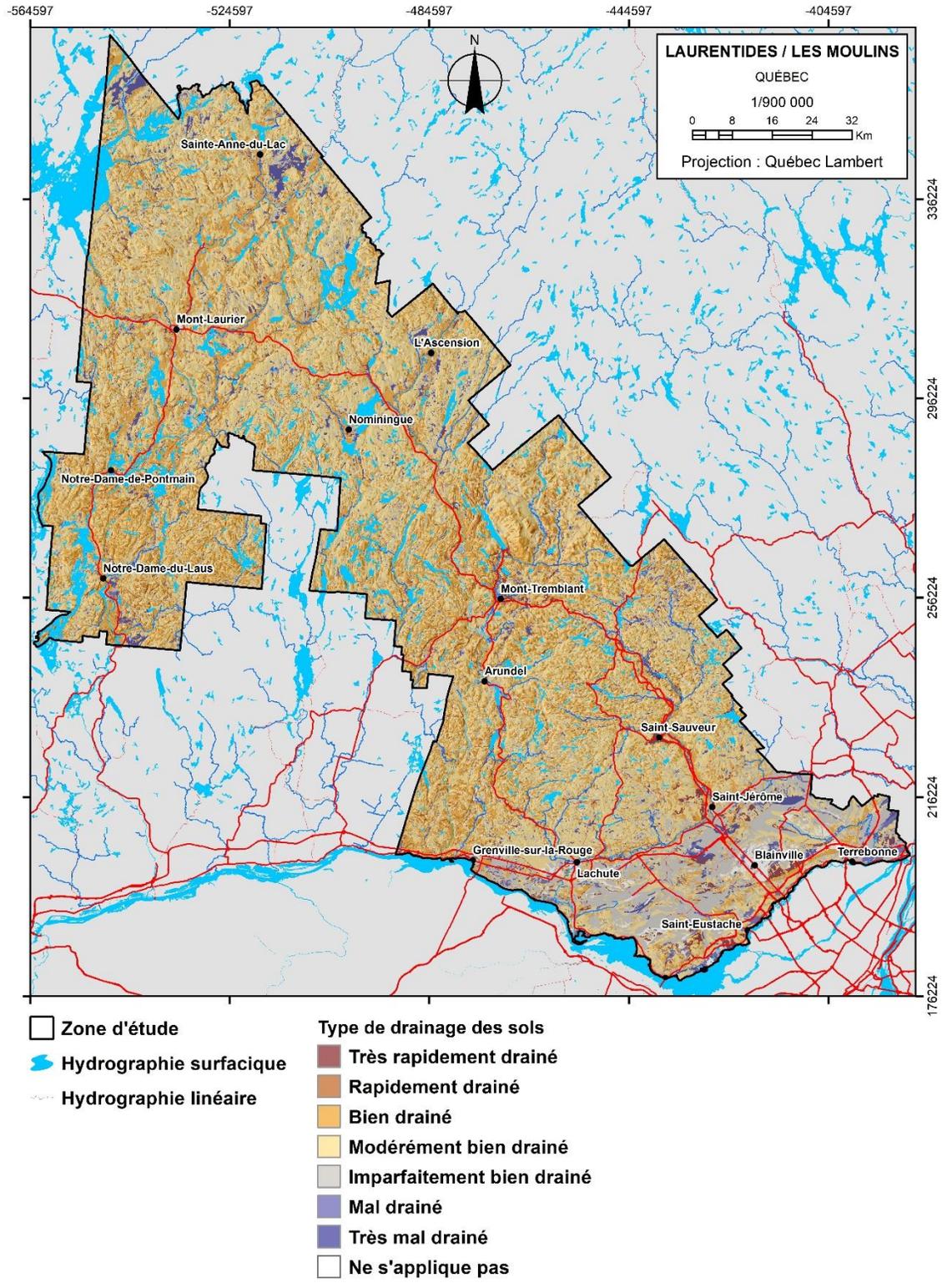


Figure 61 : Drainage des sols de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

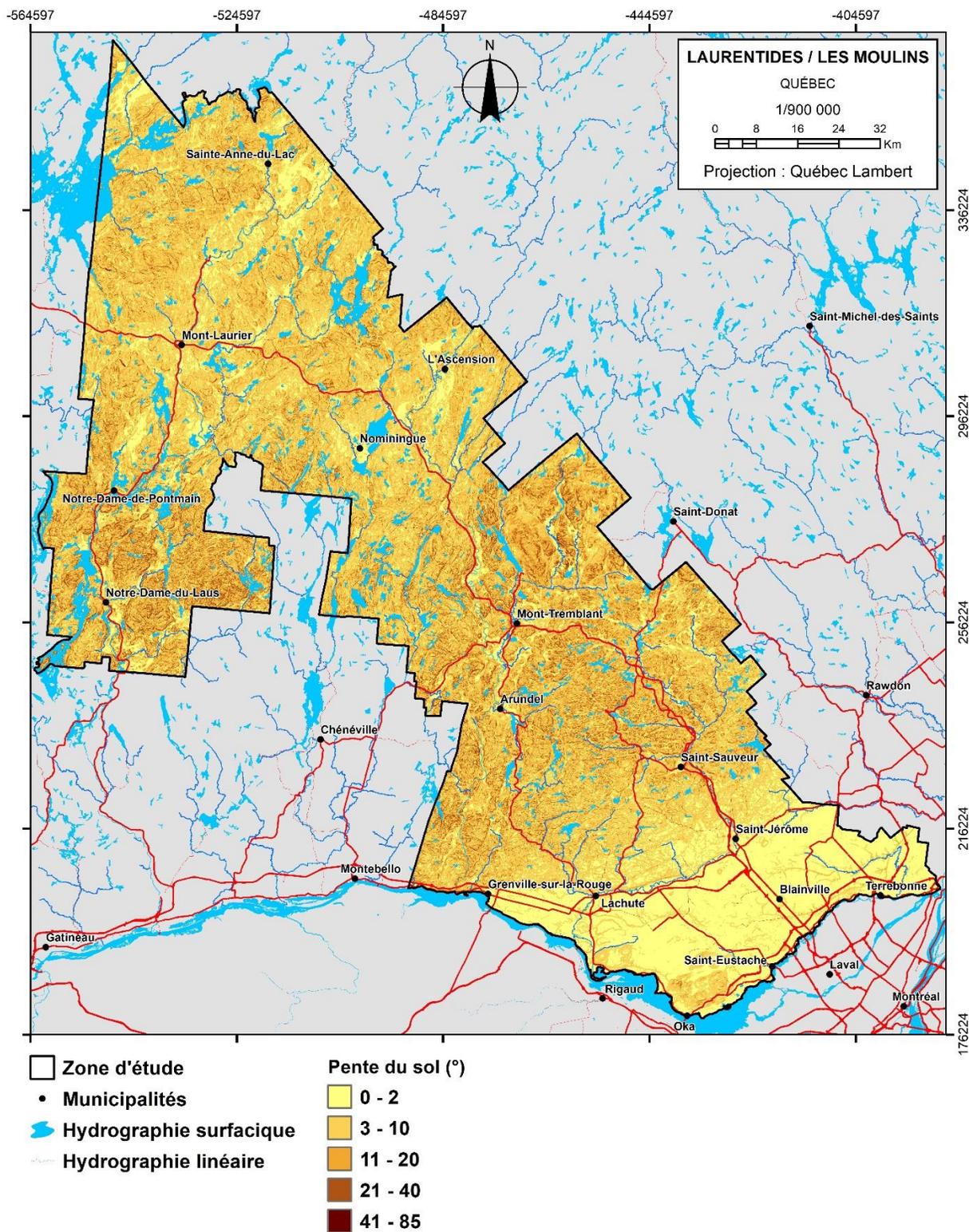


Figure 62 : Pente des sols de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

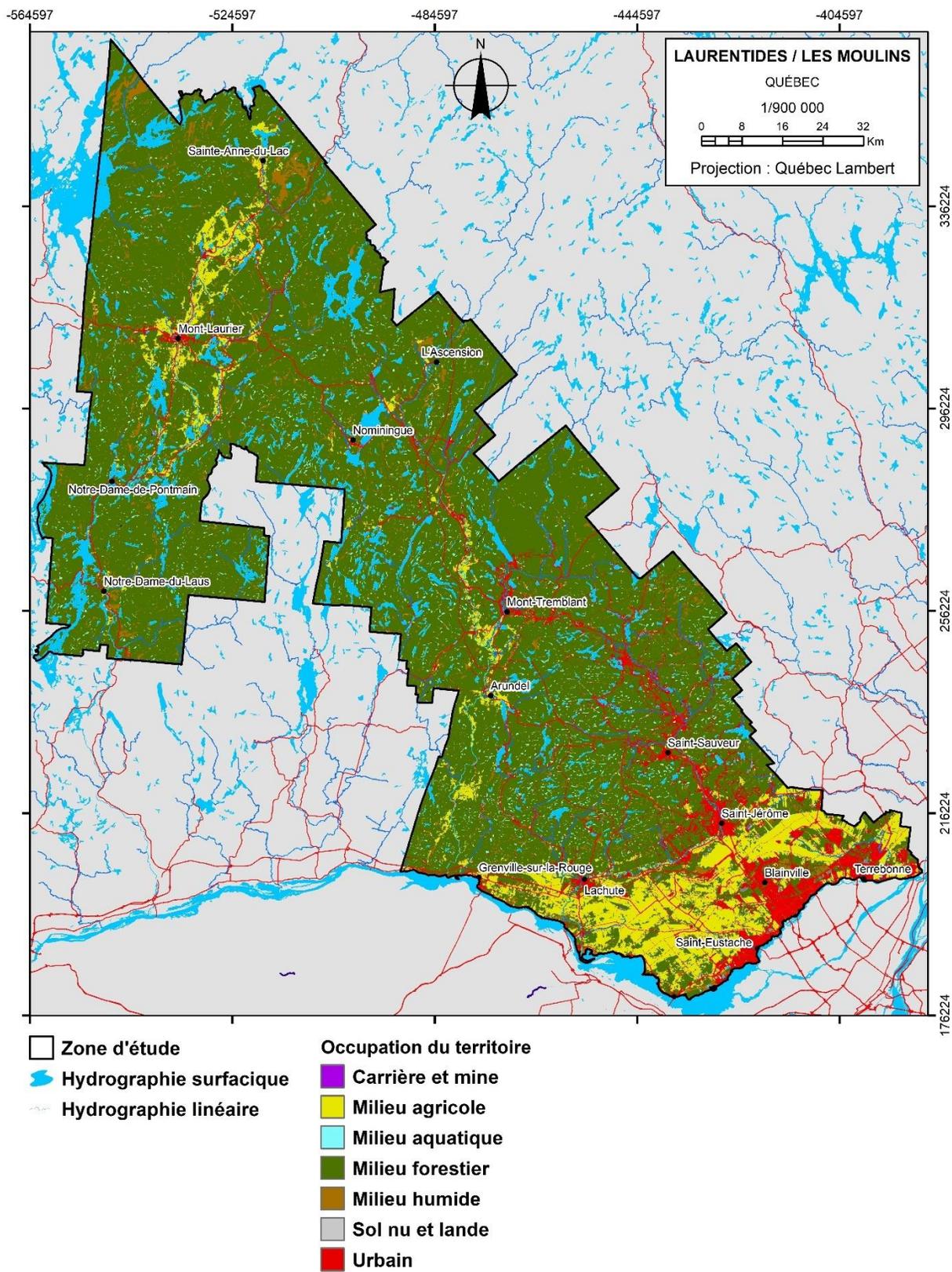


Figure 63 : Occupation du territoire de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

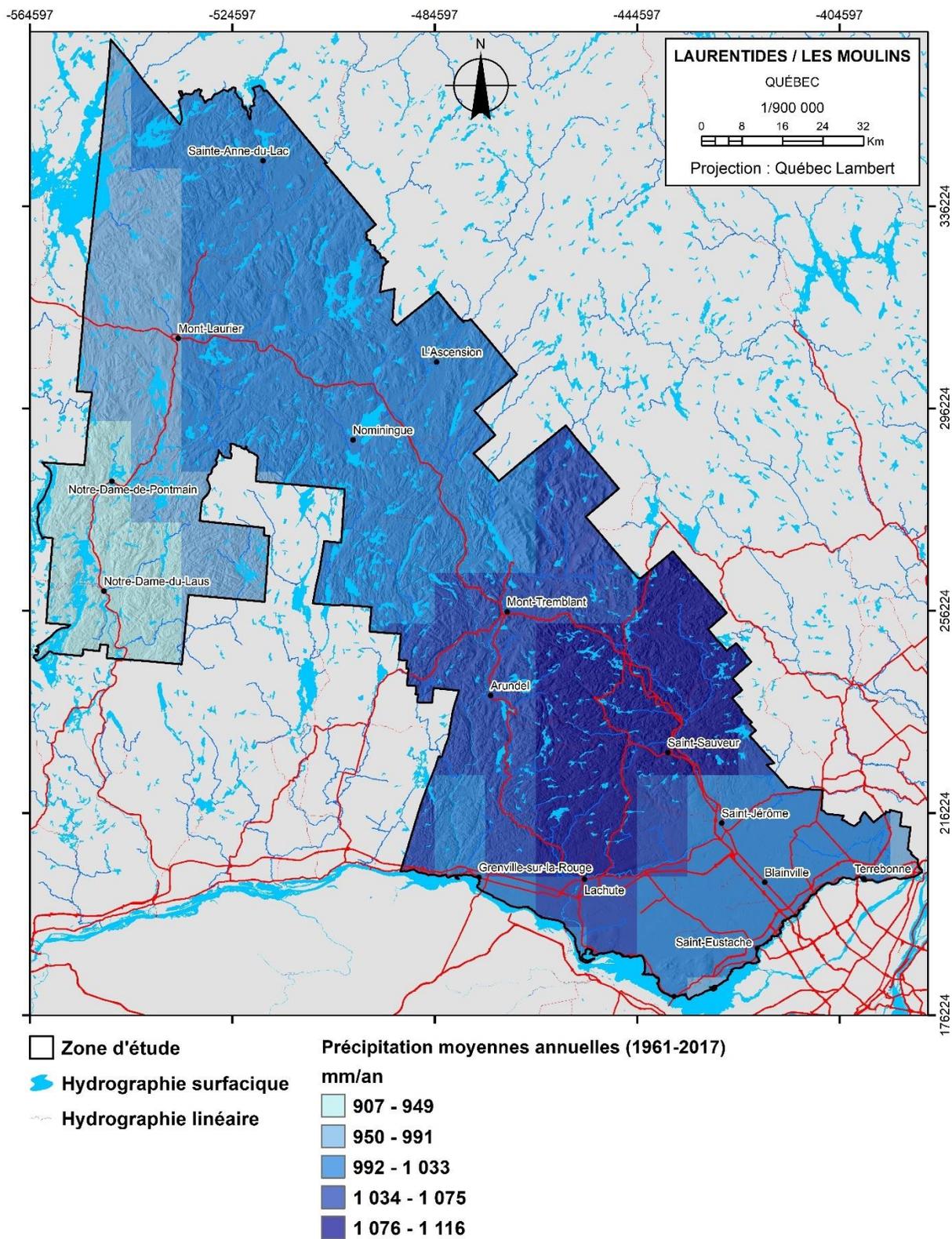


Figure 64 : Précipitations moyennes annuelles de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

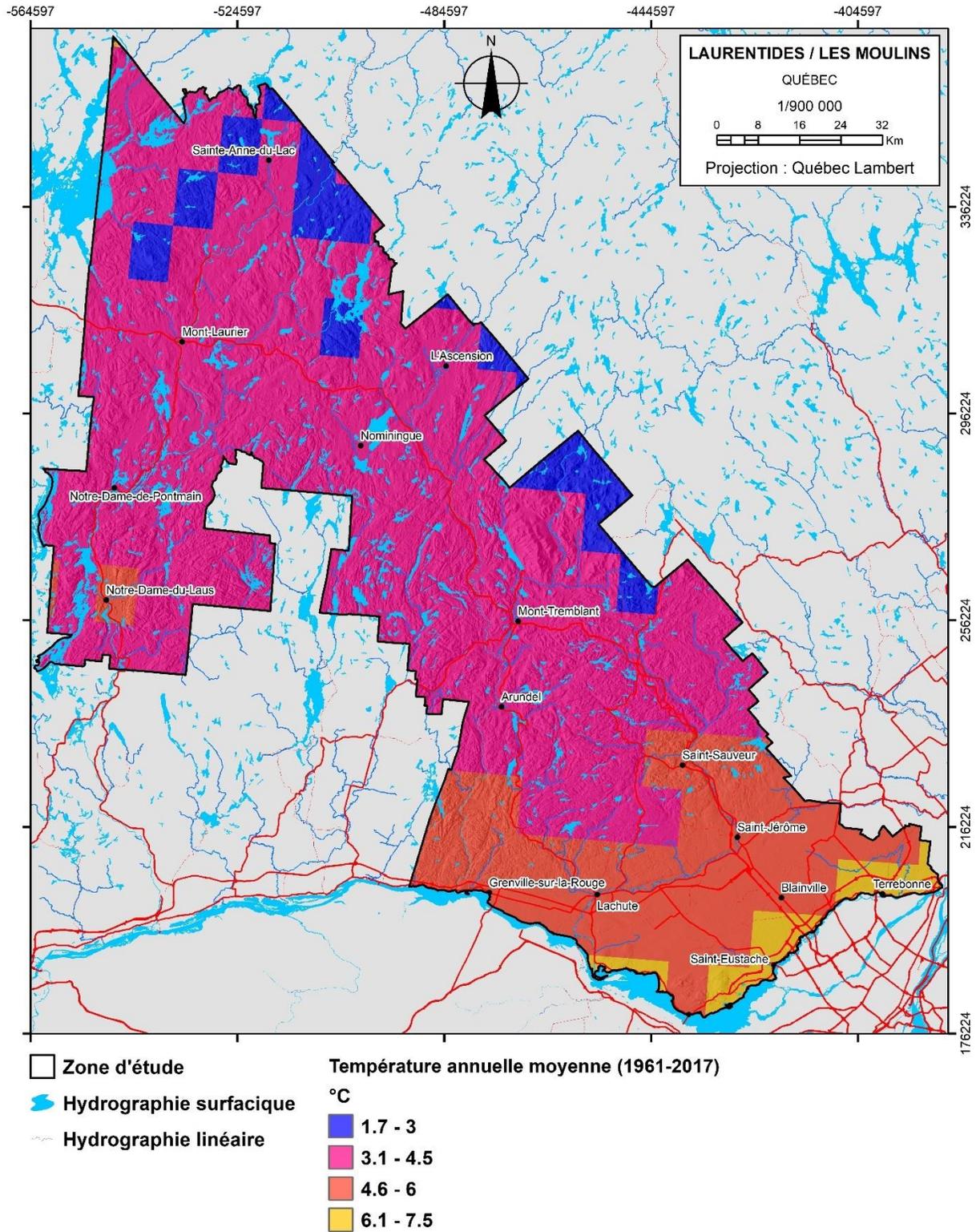
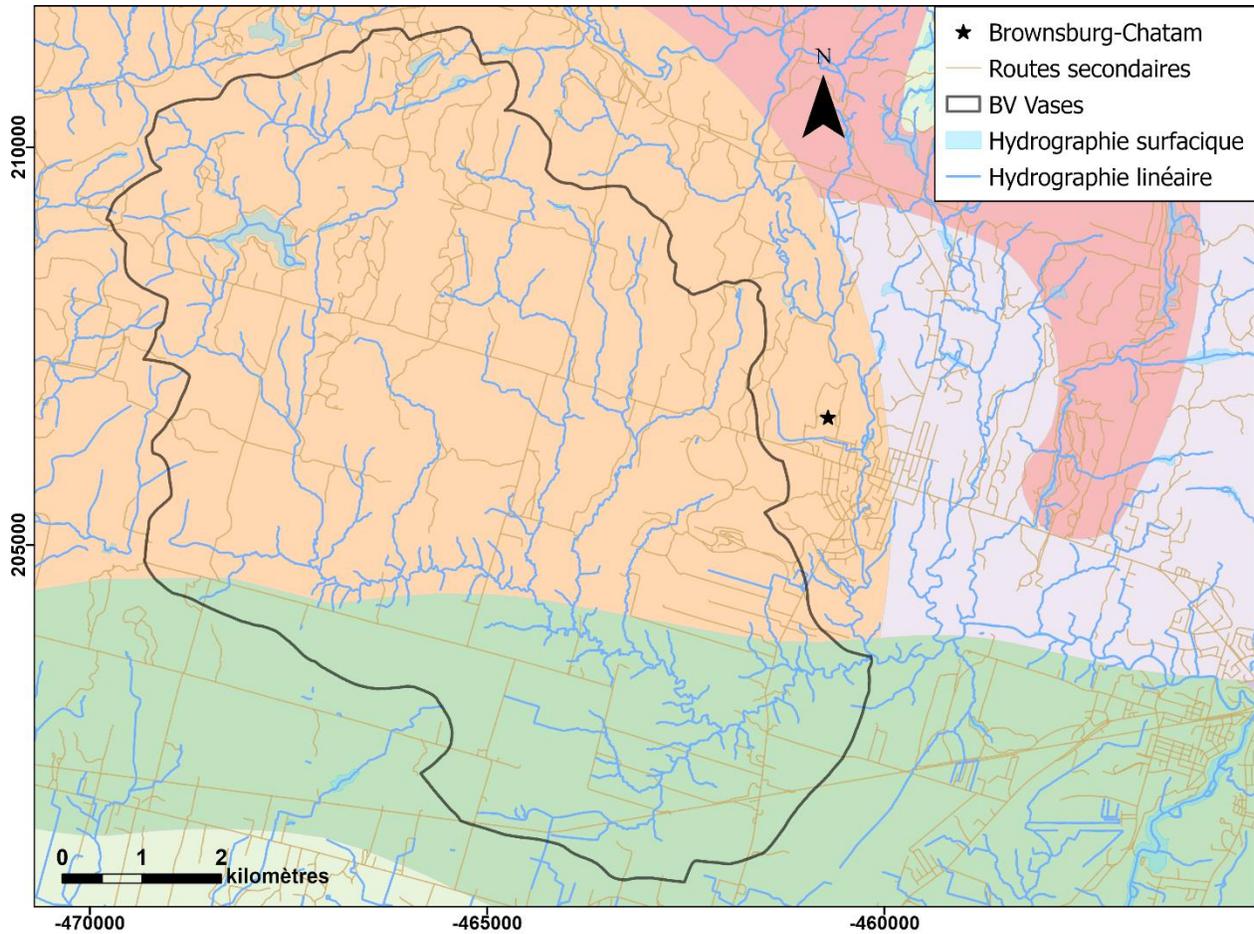


Figure 65 : Température annuelle moyenne de la zone d'étude (Gagné et al., 2022).

ANNEXE B

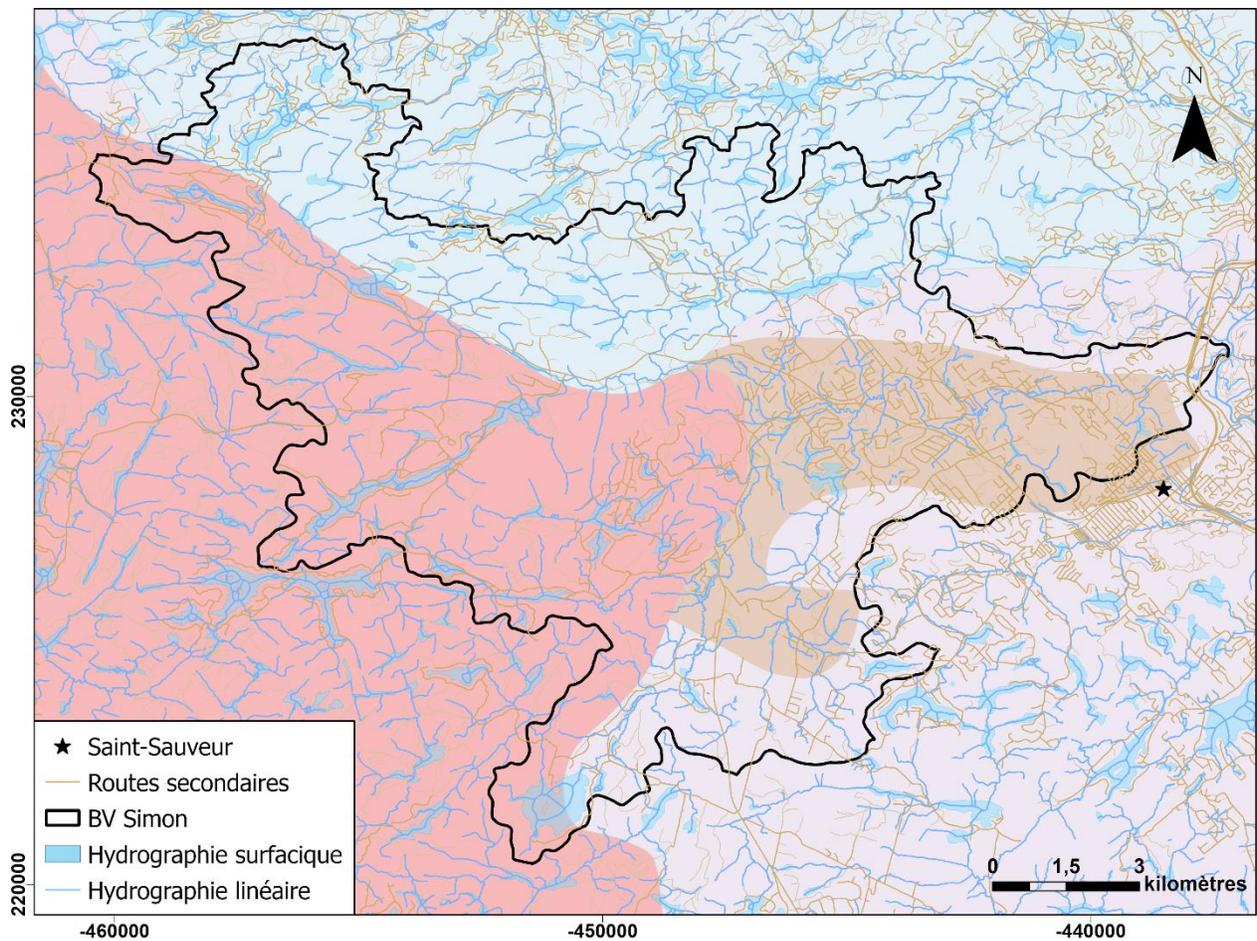
GÉOLOGIE LOCALE



Zone géologique

- Calcaire, shale, dolomie et grès
- Dolomie, grès, calcaire et shale
- Gneiss charnockitique et gneiss mixte
- Granitoïdes à orthopyroxène : charnockite, mangérite, jotunite et syénite à hypersthène
- Grès dolomitique, grès quartzitique et dolomie
- Paragneiss, gneiss pélitique, marbre, quartzite et formation de fer; présence commune de roches intrusives mafiques
- Syénite, monzonite, monzodiorite, granite et carbonatite

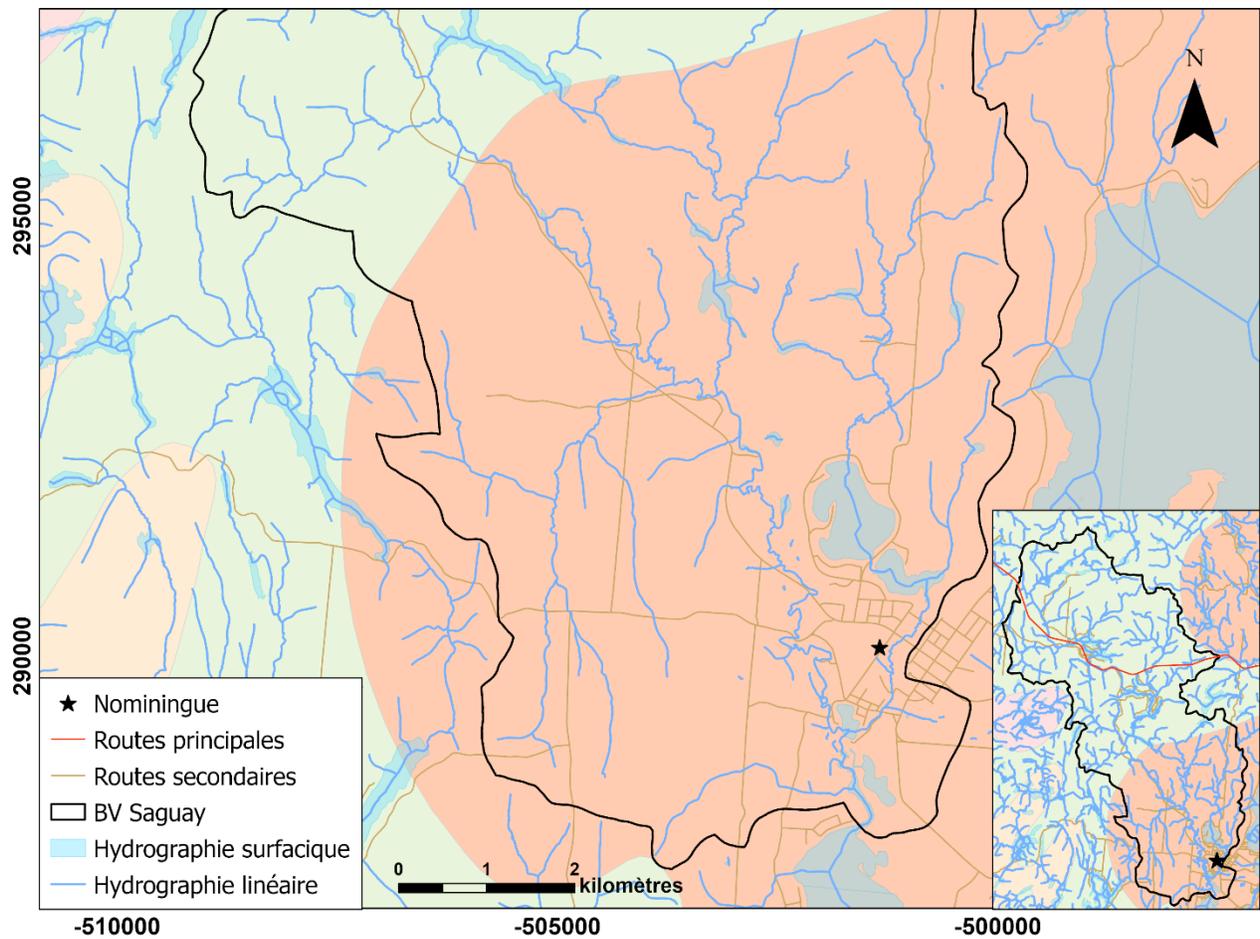
Figure 66 : Géologie du bassin versant du ruisseau des Vases.



Géologie du socle

- Anorthosite, leucogabbro, leuconorite, leucotroctolite et nelsonite
- Gneiss charnockitique et gneiss mixte
- Granitoïdes à orthopyroxène : charnockite, mangérite, jotunite et syénite à hypersthène
- Marbre, roches calco-silicatées, dolomie, schiste et quartzite

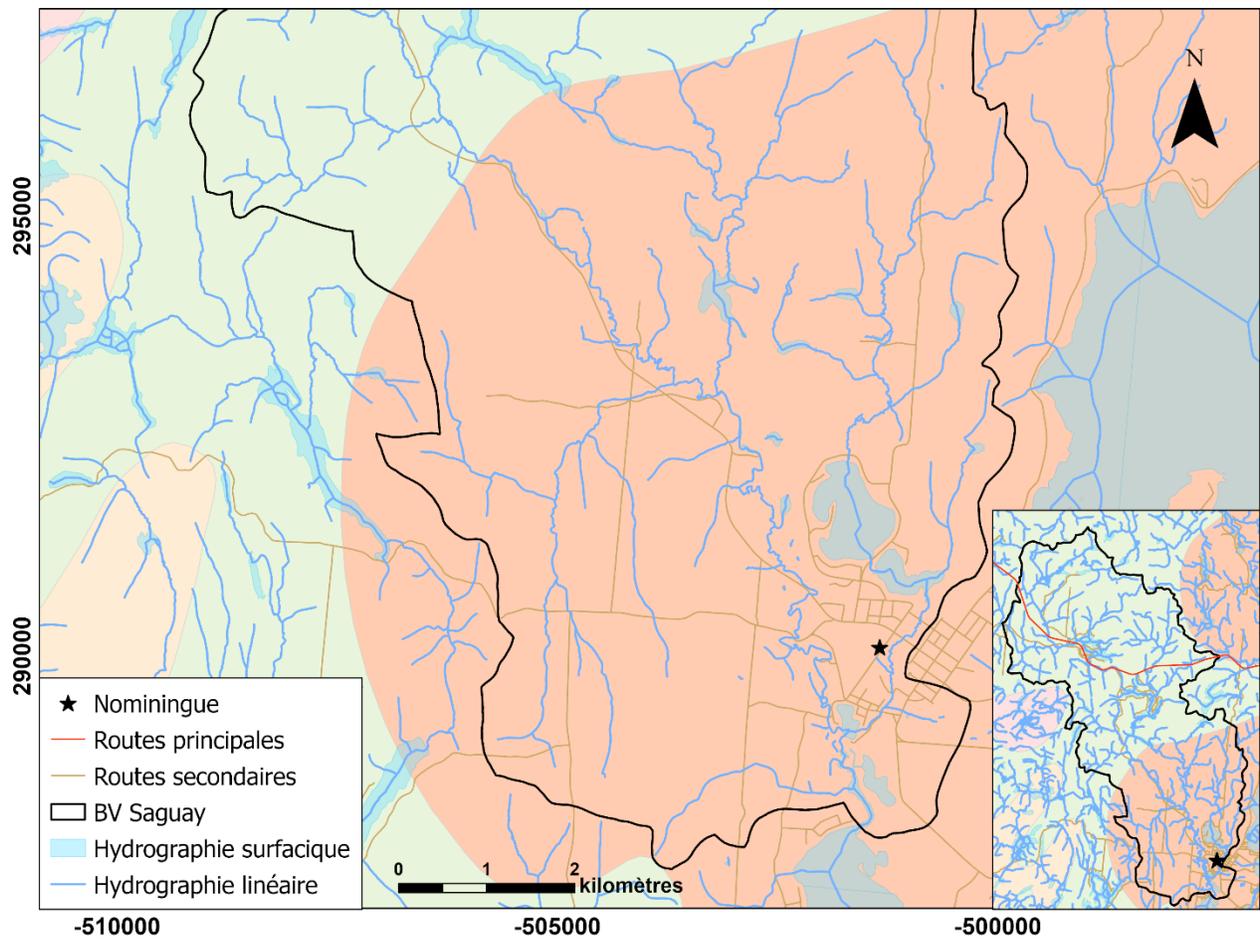
Figure 67 : Géologie du bassin versant de la rivière à Simon.



Géologie du socle

- Gabbro, norite, gabbronorite, diorite, troctolite, pyroxénite et péridotite; quantité mineure d'anorthosite
- Gneiss tonalitique et trondhjémitique; présence commune de tonalite
- Paragneiss, gneiss pélitique, marbre, quartzite et formation de fer; présence commune de roches intrusives mafiques
- Syénite, monzonite, monzodiorite et autres intrusions alcalines associées

Figure 68 : Géologie du bassin versant de la rivière Sagway.



Géologie du socle

Granite, monzonite quartzifère, syénite quartzifère et pegmatite

Marbre, roches calco-silicatées, dolomie, schiste et quartzite

Migmatite

Paragneiss, gneiss pélitique, marbre, quartzite et formation de fer; présence commune de roches intrusives mafiques

Figure 69 : Géologie du bassin versant du ruisseau Lanthier.

ANNEXE C

DIMENSIONS DES SECTIONS AUX STATIONS DES TRONÇONS PRINCIPAUX

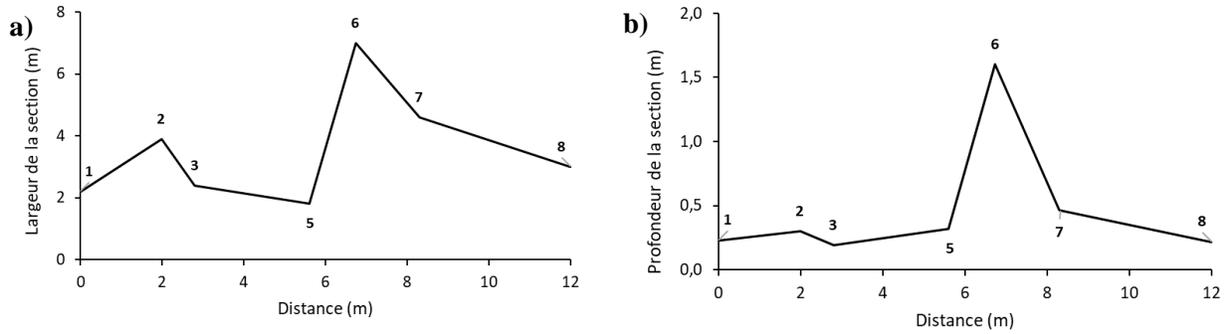


Figure 70 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations du ruisseau des Vases a) largeur et b) profondeur.

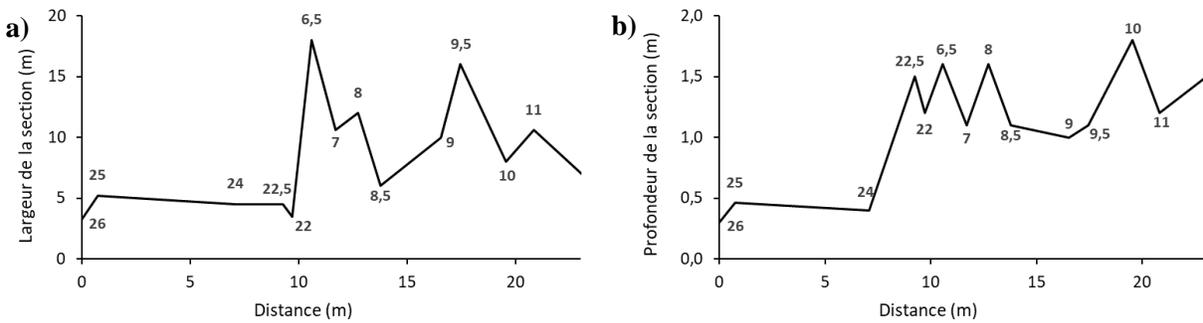


Figure 71 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations de la rivière à Simon a) largeur et b) profondeur.

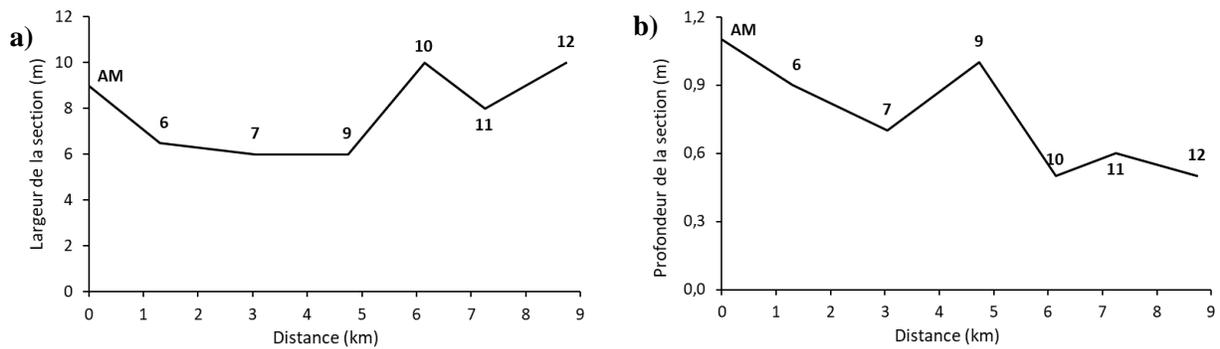


Figure 72 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations de la rivière Saguay a) largeur et b) profondeur.

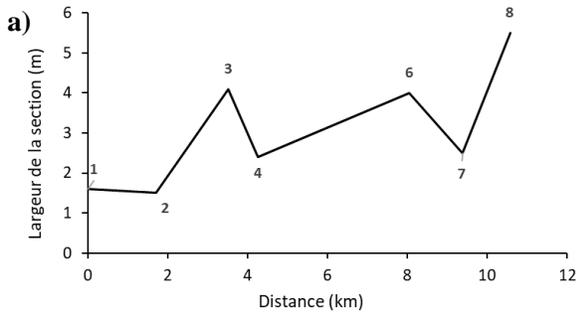


Figure 73 : Dimensions des sections de cours d'eau aux stations du ruisseau Lanthier a) largeur et b) profondeur.