

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE SIG POUR IDENTIFIER LES ZONES
POTENTIELLES DE REFROIDISSEMENT SUR LES RIVIÈRES À SAUMON :
ANALYSE SPATIALE APPLIQUÉE À LA RIVIÈRE OUELLE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

KAROLANE-GEMMA TREMBLAY-CHACON

MAI 2025

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.12-2023). 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 souhaite remercier mon directeur de maîtrise, Olivier Caron, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour avoir accepté de me guider dans cette aventure. Il a été un mentor exceptionnel, tant sur le plan académique que professionnel. Sa générosité et son soutien lors des moments les plus difficiles de mon parcours ont été essentiels à l'achèvement de mes études. Je lui suis profondément reconnaissante pour n'avoir jamais abandonné, même lorsque j'étais perdue, et pour avoir cru en moi, même lorsque j'avais du mal à le faire. Grâce à son encadrement et à ses encouragements, ma confiance en moi s'est renforcée. J'apprécie également les opportunités professionnelles qu'il m'a offertes et qui continuent d'enrichir mon parcours. Il a su me transmettre sa passion pour la géomatique, ce qui m'a permis de trouver ma voie en tant que géographe. Je suis extrêmement fière de tout ce que nous avons accompli ensemble.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, Claude Tremblay et Patricia Chacon Tremblay, sans qui je n'aurais pas pu franchir cette étape. Leur soutien constant et leur confiance en moi m'ont permis de surmonter cette épreuve. Mon père et meilleur ami, qui m'a initiée aux sciences géographiques dès mon enfance en explorant le monde avec lui, a toujours été là pour me donner des conseils, m'écouter et me soutenir. Les petites marches et nos sorties cafés, où il m'a accompagnée pendant la rédaction, ont été des moments précieux. Sa présence a été l'un des plus beaux cadeaux, et travailler à ses côtés a toujours été l'un de mes plus grands rêves. Et puis tu avais raison, « La route sera ensoleillée ». Ma mère et meilleure amie, qui a toujours été un exemple de courage et de persévérance, m'a appris l'importance de poursuivre mes études malgré les obstacles. Qu'elle soit proche ou éloignée, elle a toujours trouvé un moyen pour être présente et m'appuyer. L'amour qu'ils m'ont donné a été un pilier pour renforcer ma confiance en moi et surmonter tous les obstacles rencontrés. Leur esprit curieux et aventurier, ainsi que leurs accomplissements, ont été ma plus grande source de d'inspiration pour aller au bout de cette étape.

Un grand merci à mon petit chat géographe, Cookie, qui a été le meilleur compagnon durant les longues nuits d'étude. Il a été ma principale source de motivation à commencer la maîtrise, pour lui offrir les meilleures croquettes sur le marché. Il a également été une merveilleuse compagnie pendant les périodes de stress. Je suis certaine qu'il est fier de notre diplôme et qu'il l'aurait aimé pour prendre de longues siestes! Un autre grand merci à ma petite minette Esmeraldita, qui a aussi été un précieux soutien pendant les longues nuits de travail.

Je suis également reconnaissante envers mon grand ami et grand frère Pierre, ma belle-soeur Ludmila et ma chère amie Ana pour leurs encouragements, leur amour et leur présence constante tout au long de ce parcours.

Quiero agradecerle a Smith, mi persona favorita, por haber sido un pilar en este capítulo de mi vida. Su apoyo incondicional, desde ayudarme con mis cursos de hidrología hasta acompañarme en las noches más largas, ha sido esencial. Su presencia constante, su paciencia y su amor me dieron fuerzas en cada paso que dí. Gracias por estar en mi vida.

Je souhaite rendre hommage à mes grands-parents, Lucette Bédard, Mauril Tremblay, Isolina et Augusto Chacon, pour leurs sacrifices qui ont permis à mes parents de poursuivre leurs études. Leurs efforts ont tracé un chemin que j'ai la chance de suivre, m'offrant ainsi l'opportunité et le privilège d'étudier. [Quiero rendir homenaje a mis abuelos, Lucette Bédard, Mauril Tremblay, Isolina y Augusto Chacon, por sus sacrificios para que mis padres pudieran continuar sus estudios. Sus esfuerzos allanaron el camino que hoy tengo la oportunidad y el privilegio de seguir].

También quiero agradecer a las personas que me inspiraron a seguir adelante y a dar los últimos pasos hacia la meta final. A mi mejor amiga y hermana Claudia, y a mis queridas amigas Carolina y Melina, por su amistad incondicional, su amor y su energía.

En memoria de mi tía Indiana, quien fue como una segunda madre: me ofreció su cariño y apoyo incondicionales, y siempre creyó en mí. A mis primas Isolina y Lupe, y a mi tía Mayra por su cariño y apoyo, ¡y por prepararme el mejor pinolillo motivacional!

A Iván y Francisco, por sus consejos, por compartirme sus historias y por sus palabras que me motivaron para terminar esta maestría.

Je remercie mes collègues de la FQSA pour leurs encouragements, en particulier Myriam Bergeron, qui m'a soutenue non seulement en tant qu'employeuse, mais aussi en tant que grande sœur. Ses encouragements et sa flexibilité ont été essentiels pour me permettre de terminer mes études. Elle m'a fait découvrir le monde de la « salmosphère », ce qui m'a permis d'explorer de nouvelles passions. Je tiens également à remercier Christophe Jourdain-Bonneau, qui, au-delà d'un simple collègue, est devenu un ami très cher. Son appui inconditionnel a été précieux pour renforcer ma confiance en moi. Je lui suis reconnaissante pour toutes les fois où il s'est surchargé de travail pour me permettre de terminer mon mémoire, pour ses discussions et conseils, ainsi que pour être devenu mon mentor en tant que chargée de projets.

Je suis reconnaissante envers mes amies Valérie et Ariane pour m'avoir accompagnée dans les moments difficiles, ainsi que pour leur motivation, leur amour et leurs encouragements. Merci d'être dans ma vie.

Merci aux SIG, grâce auxquels j'ai pu rencontrer mes étudiants préférés et de nouveaux amis : Eva, Camille, Madeleine, Étienne, Laurianne, Soltane et Djallil. Leur présence a illuminé ma dernière année de maîtrise ainsi que ma dernière session en tant qu'auxiliaire ! Un grand merci également à Louis pour son assistance sur le terrain, ses encouragements et son agréable compagnie au Géolab.

Je remercie aussi Hans Asnong, Mourad Djaballah et Chantal Leclerc, qui ont été incroyables tout au long de mes études au département de géographie. Un grand merci également à mes professeures de géographie au cégep, Estelle Dricot et Marie-Pier Blanchard, qui m'ont encouragée à poursuivre mes études dans ce domaine! Je suis aussi reconnaissante envers mes anciens employeurs chez BMO, Pickinson Adams et David Ortenzi pour leur compréhension et leur flexibilité, qui m'ont permis de jongler entre le travail et les études.

DÉDICACE

How important it is in life
not necessarily to be strong,
but to feel strong,
To measure yourself at least once

Happiness [is] only real when shared

- Christopher McCandless/ Jon Krakauer

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FORMULES	xxiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxv
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xxvi
RÉSUMÉ.....	xxvii
ABSTRACT	xxviii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE	6
1.1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
1.1.1 Contexte environnemental et défis du bassin versant de la rivière Ouelle	6
1.1.2 Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques.....	18
1.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	25
1.2.1 Présentation de la problématique.....	25
1.2.2 Présentation de la question de recherche.....	26
1.2.3 Présentation des objectifs de recherche	26
1.2.3.1 Présentation de la question de recherche.....	28
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	29
2.1 ZONE D'ÉTUDE	30
2.1.1 Justification du secteur modélisé	30
2.1.2 Caractéristiques spécifiques du secteur	34
2.2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE	44
2.2.1 Présentation de l'approche analyse multicritères pondérée (AMCP).....	44
2.2.2 Description des données sources.....	48
2.3 REFUGES THERMIQUES ET ZONES DE REFROIDISSEMENT.....	54
2.4 MODÉLISATION DES FACTEURS PHYSIQUES	64
2.4.1 Hydrographique.....	66

2.4.1.1	Tributaires froids et plumes de confluence	71
2.4.1.2	Potentiel d'accumulation d'eau et milieux humides	75
2.4.2	Hydrogéologique	77
2.4.2.1	Résurgences d'eau souterraine	78
2.4.2.1.1	Cartographie de l'élévation du substrat rocheux	86
2.4.2.1.2	Cartographie du niveau piézométrique.....	87
2.4.3	Géologie du Quaternaire	88
2.4.3.1	Hydrofaciès : classification des dépôts meubles	89
2.4.3.2	Épaisseur des dépôts meubles	90
2.4.4	Géomorphologique	93
2.4.4.1	Gradient de pente du cours d'eau	96
2.4.4.1.1	Calcul du gradient de pente	97
2.4.5	Forestier	102
2.4.5.1	Réflectance de chlorophylle de la couverture végétale.....	106
2.4.5.2	Densité de la couverture forestière.....	107
2.4.5.2.1	Étape 1 : Calcul des indices spectraux	110
2.4.5.2.2	Étape 2 : Préparation des composantes de l'indice Forest Canopy Density (FCD)	118
2.4.5.2.3	Étape 3 : Calcul de l'indice Forest Canopy Density (FCD)	120
2.4.5.3	Ombrage riverain.....	121
2.4.6	Atmosphérique	128
2.4.6.1	Insolation solaire surfacique.....	130
2.5	ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE (AMCP)	133
2.5.1	Pondération des facteurs et des variables	133
2.5.2	Méthodologie d'agrégation	139
CHAPITRE 3 RÉSULTATS		142
3.1	SOUS-OBJECTIF 1.1: DÉVELOPPER DES MODÈLES POUR REPRÉSENTER CHAQUE FACTEUR PHYSIQUE CONTRIBUANT AUX PROCESSUS DE REFROIDISSEMENT DE L'EAU, EN IDENTIFIANT ET QUANTIFIANT LES INDICATEURS	144
3.1.1	Hydrographique	144
3.1.1.1	Anneaux de distance des plumes de confluence	144
3.1.1.2	Topographic Wetness Index (TWI).....	146
3.1.2	Hydrogéologique	148
3.1.2.1	Résurgences d'eau souterraine : carte piézométrique	148
3.1.2.2	Résurgences d'eau souterraine : carte de la topographie du substrat rocheux	150
3.1.3	Géologie du Quaternaire	152
3.1.3.1	Hydrofaciès: classification des dépôts meubles	152
3.1.3.2	Carte isopaque : épaisseur des dépôts meubles	154
3.1.4	Géomorphologique	156
3.1.4.1	Gradient de pente du cours d'eau	156
3.1.5	Forestier	158
3.1.5.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	158
3.1.5.2	Forest Canopy Density (FCD).....	160
3.1.5.2.1	Advanced Vegetation Index (AVI)	160
3.1.5.2.2	Bare Soil Index (BSI)	162

3.1.5.2.3	Vegetation Density (VD).....	164
3.1.5.2.4	Scaled Shadow Index (SSI).....	166
3.1.5.2.5	Résultat de l'indice Forest Canopy Density (FCD).....	168
3.1.5.3	Ombrage de canopée sur le cours d'eau.....	171
3.1.6	Atmosphérique	173
3.1.6.1	Solar radiation area.....	173
3.2	SOUS-OBJECTIF 1.2 (AGRÉGER TOUS LES INDICATEURS MODÉLISÉS AFIN DE PRODUIRE LA REPRÉSENTATION SPATIALE DU POTENTIEL DE REFROIDISSEMENT DU COURS D'EAU) ET SOUS-OBJECTIF 2.1 (IDENTIFIER ET CARTOGRAPHIER LES ZONES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT EN FONCTION DE LEUR IMPORTANCE SELON L'ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE).	175
3.3	SOUS-OBJECTIF 2.2 : VALIDER LA CARTOGRAPHIE EN COMPARANT LES ZONES IDENTIFIÉES AVEC LES REFUGES THERMIQUES GÉOLOCALISÉS.	178
3.4	SOUS-OBJECTIF 2.3 : VALIDER LA CARTOGRAPHIE DES ZONES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT SUR LE TERRAIN	183
3.4.1	Analyse de sensibilité des paramètres.....	183
3.4.2	Campagne terrain.....	187
CHAPITRE 4 DISCUSSION.....		199
4.1	RÉSULTATS DES FACTEURS HYDROGRAPHIQUES	199
4.2	RÉSULTATS DES FACTEURS GÉOMORPHOLOGIQUES	201
4.3	RÉSULTATS DES FACTEURS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES	202
4.4	RÉSULTATS DES FACTEURS FORESTIERS	204
4.5	RÉSULTATS DES FACTEURS ATMOSPHÉRIQUES	207
4.6	ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES	207
4.7	RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE (AMCP)	209
CONCLUSION.....		211
ANNEXE A CARTE TERRAIN.....		214
ANNEXE B CARTE DES DÉPÔTS MEUBLES – CARTE ÉCOFORESTIÈRE DU MRNF (2017).....		215
RÉFÉRENCES.....		216
BIBLIOGRAPHIE.....		240

LISTE DES FIGURES

- Figure 1-1 Carte du bassin versant de la rivière Ouelle, d'une superficie de 841 km². Ce bassin est situé entre le Bas-Saint-Laurent et Chaudière-Appalaches, couvrant les MRC de Kamouraska (amont) et de L'Islet (aval) (Furois, 2016). 7
- Figure 1-2 Évolution du débit mesuré à la station 022704 Ouelle, située à 2,7 km en aval du pont-route près de Saint-Gabriel-de-Kamouraska. Les données, couvrant la période de 1982 à 2024, montrent le débit moyen (ligne rouge), le refoulement estimé (bleu), le maximum (gris), la médiane (vert) et le minimum (rose). L'axe des ordonnées (y) exprime le débit en m³/s, tandis que l'axe des abscisses (x) indique les dates de l'année 2024. En moyenne, la médiane oscille entre 5 et 10 m³/s. Entre les mois de juin et août 2024, le débit varie généralement entre 1 et 10 m³/s, dépassant ponctuellement cette limite. Une seule hausse notable, excédant les 100 m³/s, a été enregistrée à la fin juillet 2024 (CEHQ, 2024). 9
- Figure 1-3 Sommaire de l'exploitation sportive de la rivière Ouelle, couvrant les années 1984 à 2006, met en évidence l'année 1987. Cette année-là, 540 saumons ont été comptabilisés lors de la montaison. Cependant, durant l'été, au moins 250 d'entre eux sont morts en raison de longues périodes de canicules (Thibault et al., 1990; Furois, 2016; MELCCFP, 2024a). 12
- Figure 1-4 Le sommaire de l'exploitation sportive de la rivière Ouelle, couvrant les années 2007 à 2023, met en évidence, en complément de la que le dénombrement des saumons n'a pas été réalisé de manière régulière, avec une période sans comptage entre 1997 et 2018. Entre 2018 et 2020, très peu de saumons ont été comptabilisés. Cette situation s'explique par le fait que les données de montaison ont été estimées à partir de divers indicateurs, tels que le taux d'exploitation ou les inventaires des nids de frai, notamment en 1993, 1994 et 1996. Depuis 2015, les statistiques de pêche concernent exclusivement le secteur contingenté, jusqu'à la fermeture récente de la pêche. 14
- Figure 1-5 Atteinte moyenne du seuil de conservation démographique de 2016 à 2019, depuis la mise en œuvre du Plan de gestion du saumon atlantique. L'axe des ordonnées (Y) représente le pourcentage du seuil de conservation atteint, tandis que l'axe des abscisses (X) affiche les différentes rivières. La ligne verte indique l'objectif idéal de 100 % atteint, et les résultats pour la rivière Ouelle sont soulignés en jaune. La ligne rouge marque la limite de 50 %, servant de référence pour évaluer le pourcentage du seuil de conservation atteint par chaque rivière... 17
- Figure 1-6 Carte des 114 rivières désignées comme rivières à saumon au Québec, réparties en 11 zones salmonicoles (Q1 à Q11). Les zones Q1 à Q4 se trouvent au sud du fleuve Saint-Laurent, tandis que les zones Q5 à Q9 occupent la rive nord. L'île d'Anticosti correspond à la zone Q10, et la région de l'Ungava constitue la zone Q11. À noter, la zone Q4 (région des Appalaches) ne compte aucune rivière à saumon (MELCCFP, 2024a). 19
- Figure 1-7 La figure illustre une équation synthétisant les principaux défis et menaces affectant les populations de saumons. Elle met en évidence que le stress thermique, principal facteur de menace, résulte de la combinaison de l'étiage et des canicules, des phénomènes amplifiés par les changements climatiques et les pressions anthropiques. Cette dynamique souligne l'impact

cumulatif de ces facteurs, montrant que le stress thermique peut, à terme, compromettre la survie des populations de saumons, voire entraîner leur disparition (Heggenes et al., 1993; FQSA-DGR, 2012).....20

Figure 2-1 Carte représentant les refuges thermiques (RT) géolocalisés sur la rivière Ouelle et son principal tributaire, la Grande Rivière (Bergeron et al., 2013). Les RT sont présentés sous forme d'agrégats pour respecter la sensibilité des données. Leur répartition se divise en trois sections : 28 RT à l'embouchure de la rivière (agrégat gris), 116 RT dans la zone d'étude (agrégat turquoise, délimité par le polygone orange), et 140 RT en amont de cette zone (agrégat gris), répartis entre la rivière Ouelle et son principal tributaire.32

Figure 2-2 Captures d'écran : Image (A) : Cartographie de la localisation des thermographes sur le site RivTemp : on retrouve 49 thermographes déployés sur la rivière Ouelle (RivTemp, 2024) et leurs séries temporelles de collecte des données. La légende indique la durée de collecte pour chaque thermographe. Dans ce bassin, la majorité des thermographes ont une série temporelle de 1 à 4 ans, tandis que les séries les plus longues couvrent une période de 10 à 15 ans; Image (B) : Cartographie de la localisation des forages : on retrouve 1223 forages (représentés par des croix) dans le bassin versant de la rivière Ouelle (SIH, 2024). On note une faible présence de forages à l'embouchure du cours d'eau, tandis que la majorité est concentrée à l'amont du bassin. Par ailleurs, la répartition des forages est très inégale sur le territoire.33

Figure 2-3 Localisation de la zone d'étude (polygone orange) et de la rivière Ouelle, située entre les municipalités de Saint-Pacôme et de Saint-Gabriel-Lalemant, à proximité de la municipalité Rivière-Ouelle. La délimitation de la zone d'étude a été tracée à partir du polygone du bassin versant. Le découpage des limites amont et aval a ensuite été réalisé en fonction de la répartition des données sur le territoire, notamment celle des forages disponibles dans le Système d'information hydrogéologique (SIH).....35

Figure 2-4 Carte illustrant la réinterprétation des hillshades de la zone d'étude, utilisée pour cartographier la composition des dépôts meubles du site. Les résultats mettent en évidence une prédominance de dépôts de type glaciaire. Ces dépôts ont également été classés en fonction de leur perméabilité, permettant d'identifier les sites potentiels de résurgences d'eau souterraine.39

Figure 2-5 Répartition des dépôts meubles par niveau de perméabilité dans la zone d'étude, mettant en évidence la prédominance des dépôts peu perméables.....40

Figure 2-6 Distribution des dépôts meubles dans la zone d'étude en pourcentages. La composition des dépôts meubles est majoritairement dominée par les dépôts glaciaires, suivis par les dépôts littoraux marins en eau peu profonde, puis ceux en eau profonde. Les dépôts fluviaux et alluviaux, bien que minoritaires, revêtent une importance particulière dans le contexte de cette étude.40

Figure 2-7 Distribution des dépôts meubles selon leur niveau de perméabilité. Il apparaît que les dépôts peu perméables sont principalement constitués des dépôts glaciaires, suivis des dépôts littoraux marins d'eau profonde, puis de ceux d'eau peu profonde. En revanche, les dépôts

perméables sont majoritairement composés des dépôts fluviatiles, suivis des alluvions/terrasses.	40
Figure 2-8 Dans la zone d'étude, les RT se répartissent principalement en trois types. La majorité des RT, soit 50 % (58 des 116 RT identifiés), correspondent à des suintements latéraux, associés aux eaux souterraines. Viennent ensuite les effluents de versant de vallée, représentant 13,8 % (16 des 116 RT), également liés aux eaux souterraines. Enfin, les panaches ou confluences de tributaires, représentant également 13,8 % (16 des 116 RT), associés aux eaux de surface et au ruissellement.	42
Figure 2-9 La répartition des sources d'eau alimentant les RT dans la zone d'étude révèle que la majorité provient des eaux souterraines (84 RT sur 116 identifiés), tandis qu'une proportion plus faible est issue des eaux de surface (32 RT sur 116).	42
Figure 2-10 Sur les 84 RT alimentés par des eaux souterraines dans la zone d'étude, la majorité étant des refuges de suintement latéral, représentant 69 % (soit 58 RT), suivis des résurgences hyporhéiques, qui constituent 16,7 % (soit 14 RT).	43
Figure 2-11 Les 32 RT alimentés par des eaux de surface dans la zone d'étude sont répartis de manière égale entre les RT de type effluent de versant de vallée et ceux associés aux panaches ou confluences de tributaires.	43
Figure 2-12 Schématisation des facteurs physiques et variables identifiés influençant les zones de refroidissement, répartis en six grandes familles pour l'AMCp : hydrographique (tributaires froids, potentiel d'accumulation d'eau), hydrogéologique (résurgence d'eau souterraine), géologique (dépôts meubles, épaisseur des dépôts meubles), géomorphologique (pente du cours d'eau, orientation de la pente), forestier (réflectance de chlorophylle de la végétation, densité de la couverture forestière, ombrage riverain) et atmosphérique (insolation surfacique). Certaines catégories, comme les milieux humides (MH) et l'orientation de la pente, sont indiquées en cases pointillées. Cela signifie qu'elles sont prises en compte, mais ne seront pas modélisées, car elles sont intégrées dans d'autres variables (par exemple, les MH dans le potentiel d'accumulation d'eau et l'orientation de la pente dans l'insolation solaire). De plus, des flèches relient certains facteurs ayant des liens plus étroits. Bien que tous les facteurs soient interconnectés, certains sont particulièrement associés, comme les facteurs hydrogéologique et géologique, ou encore forestier et atmosphérique.	46
Figure 2-13 Les retours du laser LiDAR sont enregistrés à chaque contact avec un point, où le laser rebondit et retourne vers le capteur. L'image montre quatre retours : le premier représente la hauteur de la canopée ou des bâtiments, le dernier correspond au sol, et les retours intermédiaires permettent de reconstruire les éléments analysés (Wasser, 2024).	49
Figure 2-14 Le fonctionnement du capteur LiDAR et ses limitations. Dans la partie (A), on observe comment les bâtiments entravent la capture des données, à la fois du point de vue frontal et du dessus. Le laser capte certaines zones, mais des obstacles créent des données manquantes. En revanche, dans la partie (B), le capteur réussit à capturer toute la canopée, offrant ainsi une couverture complète (Yan, 2023).	49

- Figure 2-15 Exemple de « laser dropouts » ou trous sur les plans d'eau, illustrant la difficulté du capteur LiDAR à enregistrer correctement les surfaces aquatiques (Yan, 2023). A : Résultat des dropouts sur un cours d'eau. B : Algorithmes d'identification et de comblement des trous. C : Correction du modèle numérique de terrain (MNT) en fonction des corps d'eau. D et E : Visualisation 3D du MNT issu du LiDAR, montrant le cours d'eau avant et après correction.50
- Figure 2-16 Cette figure présente la classification des différents types de refuges thermiques, accompagnée de croquis illustratifs. Elle comprend également une image satellite et une image thermique pour montrer visuellement à quoi ressemblent ces refuges thermiques dans des contextes réels (Dugdale, et al., 2013).58
- À la lumière des mécanismes physiques associés aux RT, expliqués par Dugdale et al. (2013), Sullivan et al. (2021), Fakhari et al. (2022), ainsi que des facteurs physiques influençant la température de l'eau identifiés par Caissie (2006) et Bergeron et al. (2020) (Figure 2-17), il apparaît que la dynamique des régimes thermiques et l'interconnectivité entre ces facteurs sont extrêmement complexes. Cette complexité se manifeste notamment par l'interaction entre ces facteurs, qui influencent les variations de température à différentes échelles temporelles et territoriales (Figure 2-18). Figure 2-17 Illustration des différents types de facteurs physiques identifiés ayant un effet sur la température de l'eau (Cassie, 2006).60
- Figure 2-18 Interaction entre les différents facteurs physiques identifiés dans la littérature, notamment par Caissie (2006). Ce graphique présente la dynamique de ces facteurs et les positionne selon les échelles spatio-temporelles. L'axe des ordonnées (Y) représente l'échelle spatiale, allant de local à global, tandis que l'axe des abscisses (X) indique l'échelle temporelle, du court au long terme. (Marteau, et al., 2023).61
- Figure 2-19 Interaction des différents types d'outils et de données liés aux fluctuations de la température de l'eau, mettant en évidence leur complémentarité à l'échelle spatio-temporelle. L'axe des ordonnées (Y) représente l'échelle spatiale, allant de local à global, tandis que l'axe des abscisses (X) indique l'échelle temporelle, du court au long terme (Marteau, et al., 2023).62
- Figure 2-20 Schématisation des facteurs physiques, variables et indicateurs identifiés pour la formule de l'AMC pondérée. Les cases blanches représentent les éléments qui seront modélisés pour représenter les variables associées à chaque facteur physique.65
- Figure 2-21 Le réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Ouelle est représenté par des lignes bleu pâle, tandis qu'un polygone orange marque les limites du bassin versant. La zone d'étude, quant à elle, est identifiée par des contours noirs. En amont de cette zone, le réseau hydrographique affiche une densité élevée. Cependant, dans la zone d'étude et vers l'embouchure, le réseau devient nettement moins dense, étant majoritairement composé de lignes de drainage issues des champs agricoles. Un encadré blanc permet un agrandissement précis de cette zone, offrant une meilleure visualisation du réseau hydrographique à l'embouchure.67
- Figure 2-22 Distribution des thermographes (points rouges) placés aux confluences entre le cours d'eau principal (polygone bleu) et ses tributaires (lignes bleues). Le thermographe situé sur le

cours d'eau principal est correctement positionné, tandis que celui proche du tributaire devrait être placé directement à la confluence ou légèrement en aval, afin de mieux observer les éventuelles variations de température et l'effet du tributaire sur le cours d'eau principal.....72

Figure 2-23 Représentation des grilles aux confluences entre le cours d'eau principal et ses tributaires, illustrant le nombre de poissons recensés par grille en fonction de la température enregistrée à différentes heures de la journée. On observe que la majorité des poissons se concentrent principalement au début de la confluence, même si ces grilles ne sont pas toujours les plus froides. Les grilles affichant des températures plus fraîches sont ensuite les plus fréquentées, tandis que celles dépassant les 22 °C sont très peu occupées (Wang et al., 2020).74

Figure 2-24 L'image (A) montre une image satellitaire hivernale où une fine distinction apparaît entre la berge et le cours d'eau, visible sous forme de petites ranures noires, tandis que la couverture de glace est blanche. L'image (B) représente une image thermique où les zones en rouge foncé correspondent aux résurgences d'eaux souterraines, qui sont généralement plus chaudes en hiver. L'image (C) compare les deux résultats, montrant que le niveau de précision entre les deux est comparable. L'image (A) semble plus précise, car elle identifie clairement les zones sans glace, suggérant ainsi des résurgences potentielles (O'Sullivan, et al., 2019a).80

Figure 2-25 Comparaison des résultats entre les images TIR et les images satellites hivernales pour l'identification des plumes de résurgences d'eaux souterraines (O'Sullivan et al., 2019a). ...81

Figure 2-26 Dans cette figure, différentes identifications des plumes de résurgences d'eaux souterraines en été sont présentées dans la première colonne, comparée à des images prises au même endroit dans la deuxième colonne à l'aide de TIR. La troisième colonne montre des images satellites hivernales. Ces trois colonnes permettent de comparer les résultats d'identification des plumes de résurgences d'eaux souterraines. On observe qu'il y a peu de différence entre les résultats obtenus à partir des TIR et des images satellites hivernales (O'Sullivan, et al., 2019a).82

Figure 2-27 Projets PACES déjà réalisés, représentés par des polygones orange, tandis que les polygones rouges indiquent ceux qui sont en cours. Cependant, il est à noter que la carte n'a pas été mise à jour depuis sa date de publication (Gouvernement du Québec, 2018).84

Figure 2-28 Exemple du sens de l'écoulement des eaux souterraines (flèches) par rapport aux lignes équipotentielles (lignes noires), définies à partir des points de forage (points bleus) (Wondzell et al, 2013).85

Figure 2-29 Exemple de la table créée pour l'interpolation des valeurs de profondeur (en mètres) de forage touchant le roc. On y identifie la colonne « num_ligne », permettant de suivre de manière précise le transfert des données originales des feuilles du SIH vers la nouvelle table créée. On y retrouve également les coordonnées x et y, l'identifiant unique du puits, la profondeur du puits, ainsi que la colonne « roc », qui indique si le puits touche ou non le roc.87

Figure 2-30 Exemple de la table créée pour l'interpolation des valeurs de profondeur (en mètres) de forage qui atteignait de l'eau souterraine. On y identifie la colonne « num_ligne », permettant de suivre de manière précise le transfert des données originales des feuilles du SIH vers la nouvelle table créée. On y retrouve également les coordonnées x et y, l'identifiant unique du puits, la profondeur du puits, ainsi que la colonne « eau », qui indique si le puits atteint l'eau ou non.88

Figure 2-31 Exemple de la table créée pour l'interpolation des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles montre plusieurs éléments clés. On y trouve la colonne « num_ligne », qui permet de suivre avec précision le transfert des données originales des feuilles du SIH vers la nouvelle table. Cette table contient également les coordonnées x et y, l'identifiant unique du puits, ainsi que les épaisseurs des dépôts mesurées du début à la fin, spécifiées dans les colonnes « Top_m » et « Bottom_m » en mètres. Enfin, une colonne description est incluse pour fournir des informations complémentaires sur chaque ligne.....91

Figure 2-32 Distribution des forages pour l'interpolation des épaisseurs de dépôts et les contraintes identifiées pour assurer la logique de la distribution des valeurs. Ces contraintes permettent de minimiser les erreurs dues à une distribution inégale des forages.92

Figure 2-33 (Graphique a) la répartition des différents types de canaux le long d'un ruisseau en montagne, en fonction du gradient de pente, et (b) comment les processus hydrostatiques et hydrodynamiques influencent l'échange d'eau entre le lit du ruisseau et la zone hyporhéique, en fonction du type de canal (Wondzell, et al., 2013).....95

Figure 2-34 Image (A): Segmentation du cours d'eau selon les points de confluence entre le cours d'eau principal et ses tributaires, représenté par une ligne blanche. Les segments présentent des variations de longueur, ce qui peut compliquer leur comparaison. Les points rouges marquent les limites amont et aval de chaque segment, certaines assumant un double rôle en délimitant à la fois la fin d'un segment et le début du suivant. La rivière Ouelle (polygone bleu pâle) et ses tributaires (lignes bleu pâle) sont également identifiés; Image (B): Segmentation du cours d'eau réalisée tous les 500 m, permettant une comparaison aisée entre les segments selon les valeurs de pente qui leur seront attribuées, mais aussi en fonction des liens établis avec d'autres facteurs physiques. Les limites des segments sont représentées par des triangles rouges, jouant également un rôle double en marquant à la fois la fin d'un segment et le début du suivant. La distribution des tributaires par segment, déjà observée précédemment, est également mise en évidence.98

Figure 2-35 Image (A): Points A (P1) et B (P2) du segment A : La ligne violette correspond au segment A, la ligne rouge au segment B et la ligne jaune au segment C. Les délimitations de ces segments sont marquées par des points de la même couleur que le segment correspondant : les points violets indiquent les limites amont et aval du segment A, tandis qu'un point rouge marque la fin du segment B et un point jaune celle du segment C. Image (B): Points B (P1) et C (P2) du segment B : Ici, on observe que le point aval du segment A, initialement violet, devient un point rouge, marquant ainsi la délimitation amont du segment B. Ce processus de transition des points est appliqué systématiquement à chaque segment identifié, assurant une continuité logique entre les segments successifs..... 100

- Figure 2-36 Représentation spatiale des entités à joindre par clé, où le point blanc (X) représente le point amont du segment A. Ce point a été identifié de manière distincte, car il est le seul à ne pas comporter de valeurs cumulatives pour le calcul du gradient de pente et ne marque pas la fin d'un segment précédent. Nous avons décidé que le point aval contiendrait les informations nécessaires pour le calcul du gradient de pente du segment correspondant, c'est pourquoi le nom du segment a été attribué au point aval délimitant la fin du segment. Cela a également facilité les jointures par clé en assurant leur logique. Ainsi, on observe que le point contenant l'information sur le gradient de pente du segment A (en violet) se situe en aval du segment A, et de même pour le segment B (en rouge) et son point respectif. 101
- Figure 2-37 Illustration démontrant que, pour protéger un cours d'eau des rayons solaires (représentés par des lignes), la présence de canopée sur les rives est essentielle, mais son efficacité dépend également de l'angle d'inclinaison et de la pente de la topographie. La simple disponibilité de la canopée ne suffit pas : elle doit être située à proximité et orientée à des angles spécifiques pour limiter efficacement le réchauffement de l'eau par l'insolation surfacique (Rutherford, 1997). 103
- Figure 2-38 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Les données utilisées (bandes rouge B04 et proche infrarouge B08) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte. 107
- Figure 2-39 Processus opérationnel pour le calcul de l'indice FCD (Forest Canopy Density). Étape 1: calcul des indices AVI (*Advanced Vegetation Index*, rectangle vert pâle), BI (*Bare Soil Index*, rectangle orange), et SI (*Shadow Index*, rectangle bleu). Étape 2: prépare les composantes VD (*Vegetation Density*, rectangle jaune) via une PCA (Principal Component Analysis) et une normalisation, et SSI (rectangle bleu) par une normalisation. Étape 3: calcul de l'indice FCD final en utilisant les paramètres issus de l'étape 2, c'est-à-dire le VD normalisé (rectangle jaune) et le SSI (rectangle bleu), pour obtenir la couche finale de FCD (rectangle vert). 109
- Figure 2-40 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice AVI. Les données utilisées (bandes rouge B04 et proche infrarouge B08) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte. 111
- Figure 2-41 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice BSI. Les données utilisées (bandes infrarouge à ondes courtes B11, rouge B04, proche infrarouge B08 et bleue B02) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte. 116
- Figure 2-42 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice SI. Les données utilisées (bandes rouge B04, verte B03, et bleue B02) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte. 117

Figure 2-43 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul des indices nécessaires (*Advanced Vegetation Index* - AVI, *Bare Soil Index* - BSI, *Shadow Index* - SI) pour obtenir l'indice final FCD (*Forest Canopy Density*). Les données d'entrée comprennent les bandes spectrales rouge (B04), bleue (B02), verte (B03), proche infrarouge (B08) et infrarouge à ondes courtes (B11) (ellipses bleues). Les étapes de traitement, représentées par des rectangles jaunes, incluent le calcul des indices individuels AVI, BSI et SI, réalisé dans l'outil Raster Calculator. La normalisation du SI pour produire le *Scaled Shadow Index* (SSI) est réalisée dans Raster Calculator. Les indices AVI et BSI sont ensuite combinés à l'aide de l'outil Principal Component pour générer le résultat nommé PCA (ellipse verte). Ce dernier est normalisé dans Raster Calculator pour obtenir le *Vegetation Density* (VD). Enfin, le VD normalisé et le SSI sont intégrés dans Raster Calculator pour produire l'indice final FCD (ellipses vertes). 120

Figure 2-44 Le graphique (A) illustre, à l'aide de quatre courbes distinctes, les variations de température au fil du temps, prévues et observées, en fonction des différents niveaux d'ombrage riverain sur le cours d'eau. Ce graphique permet une comparaison entre les données prévisionnelles et celles observées. En revanche, le graphique (B) présente les résultats en fonction du niveau d'ombrage, allant jusqu'à l'absence totale d'ombrage, pour montrer l'effet sur la température de l'eau au fil du temps (Rutherford, 1997)..... 123

Figure 2-45 Illustration des paramètres topographiques comprenant l'orientation de la pente et la division azimutale. En haut à gauche, une carte solaire, calculée pour une latitude de 45 degrés nord et basée sur la date du solstice, montre les mois et les heures. En haut à droite, cette carte est combinée à une carte de visibilité afin d'estimer le rayonnement solaire direct. En bas à gauche, une carte du ciel illustre les secteurs définis par 8 divisions zénithales et 16 divisions azimutales, chaque secteur étant coloré pour représenter l'origine du rayonnement diffus. Enfin, en bas à droite, la superposition de la carte solaire et de la carte de visibilité est utilisée pour affiner le calcul du rayonnement solaire direct. (Huang, et al., 2009)..... 131

Figure 2-46 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'insolation surfacique. La donnée d'entrée utilisée est un MNT à une résolution de 5 m x 5 m (ellipse bleue). Le traitement a été réalisé à l'aide de l'outil Area Solar Radiation, produisant quatre résultats principaux (ellipses vertes) : Radiation directe (arsolrad_bv5), Radiation diffuse (dfserad_bv5), Durée de radiation directe (drctrad_bv5) et Radiation globale (durrad_bv5)..... 132

Figure 2-47 Schématisation du classement des facteurs physiques selon leur ordre de priorité: La figure illustre un résumé des éléments décrits ci-dessus. Elle présente la classification des facteurs physiques selon leur stabilité temporelle et leur susceptibilité aux variations. Chaque facteur est associé à ses variables, caractérisées par leur influence sur la température de l'eau, leur contribution à la formation de RT, leur échelle spatiale (bassin versant ou cours d'eau), ainsi que leur vulnérabilité aux changements climatiques et aux interventions humaines. Cette représentation visuelle vise à synthétiser les relations complexes entre ces facteurs et leur rôle dans la dynamique thermique des cours d'eau..... 136

Figure 2-48 Schématisation de la distribution des poids pour l'Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp) : La figure illustre la répartition des poids entre les facteurs stables (65) et

susceptibles aux variations (35) pour le calcul de l'AMC. Les facteurs stables, influençant la température et les RT, reçoivent un poids de 40, réparti entre l'hydrogéologique (20) et le géologique (20), tandis que d'autres facteurs moins influents reçoivent 15. Les facteurs susceptibles aux variations, comme le forestier (30) et l'atmosphérique (5), sont également représentés avec leurs pondérations respectives. 138

Figure 3-1 Exemple des anneaux de distance de la plume de confluence, où la rivière est représentée par un polygone bleu pâle. Chaque anneau marque une distance par tranches de 10 m, allant jusqu'à 90 m. Le bleu foncé, qui représente une distance de 10 m, indique les zones les plus influentes de la plume de confluence, tandis que l'influence de la plume sur le cours d'eau principal diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne, jusqu'à atteindre 90 m, où la couleur rouge marque la zone la moins influente. Cette représentation permet de comprendre que l'eau injectée par le tributaire perd son effet au fur et à mesure de son éloignement du point de confluence. 145

Figure 3-2 La carte a été réalisée à partir de l'indice d'humidité topographique / *Topographic Wetness Index* (TWI), une donnée disponible sur le site Forêt ouverte. Les valeurs inférieures à 15 représentent des milieux secs avec peu de potentiel d'accumulation d'eau, tandis que les milieux humides, identifiés par des valeurs égales ou supérieures à 15, indiquent un potentiel plus élevé d'accumulation d'eau (MRNF, 2020; 2021). 147

Figure 3-3 La carte piézométrique a été réalisée à partir d'une interpolation des niveaux d'eau enregistrés dans les forages de la base de données du Système d'Information hydrogéologique (SIH) répartis sur la zone d'étude (2024). Cette carte est inspirée des travaux effectués dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances des eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) (Buffin-Bélanger, et al., 2015). Les lignes blanches représentent des lignes équipotentielles, tandis qu'un gradient de bleu illustre le gradient des niveaux piézométriques. La zone d'étude est délimitée par un polygone blanc, et le cours d'eau est représenté par un polygone bleu pâle..... 149

Figure 3-4 La carte de l'élévation du substrat rocheux a été réalisée à partir d'une interpolation des niveaux d'eau enregistrés dans les forages de la base de données du Système d'Information hydrogéologique (SIH) répartis sur la zone d'étude (2024). Cette carte est inspirée des travaux effectués dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances des eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) (Buffin-Bélanger, et al., 2015). Les courbes de niveau représentent le gradient topographique, illustrant les variations d'altitude du substrat rocheux. Les couleurs, allant des teintes plus pâles aux teintes plus foncées, permettent de visualiser la transition des zones les plus élevées vers les zones les plus basses..... 151

Figure 3-5 La carte des dépôts meubles et les hydrofaciès est le résultat de notre réinterprétation des dépôts meubles dans la zone d'étude, inspiré des travaux effectués dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances des eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) (Buffin-Bélanger, et al., 2015). La section aval du cours d'eau se distingue par des dépôts perméables, notamment à proximité du cours d'eau (en bleu foncé pour les dépôts fluviaux), ainsi que par des alluvions et terrasses (en jaune), qui favorisent la résurgence des eaux souterraines. L'ensemble du cours d'eau est encadré par des dépôts fluviaux, bien que ces derniers soient plus prédominants dans la section aval. 153

Figure 3-6 Carte isopaque illustrant l'épaisseur des dépôts de surface. La majorité des secteurs présente des dépôts peu épais (en brun), tandis que certaines zones, caractérisées par des dépôts plus épais (en mauve), favorisent les résurgences d'eau souterraine et possèdent un fort potentiel d'accumulation. L'épaisseur des dépôts protège l'eau souterraine du réchauffement, augmentant ainsi le potentiel d'eaux froides dans le cours d'eau, en particulier dans la portion aval de la zone d'étude, où les refuges thermiques alimentés par les eaux souterraines sont plus fréquents. 155

Figure 3-7 Carte de gradient de pente : sur cette carte, trois sous-catégories de gradients de pente en pourcentage sont observées. Bien que toutes ces catégories correspondent à des pentes très faibles, un seul segment présente le taux le plus élevé de gradient, situé entre 1,5 et 2,4 %. La section aval du cours d'eau se caractérise par les gradients de pente les plus faibles, tandis qu'en amont, les gradients sont légèrement plus élevés. Un changement notable est observé dans les catégories de pente, passant de plus bas à plus élevé, puis revenant à des pentes plus faibles. Il est toutefois évident qu'il existe une baisse générale des gradients de pente. 157

Figure 3-8 Distribution du gradient de pente (en %) des segments de la rivière Ouelle. Cet histogramme illustre la répartition des segments en fonction de leur gradient de pente. La majorité des segments présentent une pente supérieure à la moyenne (1,14 %), tandis que la médiane est légèrement inférieure (1,02 %). Il est également à noter qu'un seul segment affiche le gradient de pente le plus élevé, identifié dans la zone d'étude. 158

Figure 3-9 L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) montre que l'ensemble du bassin versant affiche des valeurs supérieures à 0,7, indiquant une végétation saine, représentée en vert, soit une forte réflectance de chlorophylle. Cependant, quelques secteurs, notamment les champs agricoles et les routes, ne présentent une faible réflectance de chlorophylle, et sont marqués en brun (ESA, 2024). 159

Figure 3-10 Carte de l'indice AVI (*Advanced Vegetation Index*) illustrant la santé et la densité de la couverture forestière dans la zone d'étude du bassin versant de la rivière Ouelle. La majorité des valeurs affichent des teintes vert pâle à blanc, indiquant des niveaux de densité moyens à faibles. Ces résultats suggèrent que la couverture forestière est globalement moins dense et en moins bonne santé que ce que laisse entendre l'indice NDVI, soulignant l'importance de croiser ces indices pour une évaluation plus précise de l'état de la végétation. 161

Figure 3-11 La carte de l'indice *Bare Soil Index* (BSI) met en évidence les zones les plus découvertes, dépourvues de canopée (ESA, 2024). Elle révèle notamment des sites tels que les champs agricoles et les sablières, particulièrement en aval du cours d'eau de la zone d'étude, représentés en rouge foncé. En revanche, la majorité de la zone d'étude est illustrée par des teintes allant du rose pâle au blanc, ce qui reflète une couverture forestière de moyenne à élevée densité. 163

Figure 3-12 Carte de densité de végétation : les zones de sol nu sont représentées en rouge, tandis que les zones de haute densité de végétation sont en vert. La végétation est répartie de manière inégale, avec des fragments visibles, notamment dans le secteur urbanisé de l'aval, où des zones modérément végétalisées alternent avec des zones plus dégagées. L'indice de densité de végétation (VD) permet de mieux comprendre cette distribution. 165

Figure 3-13 Carte de l'indice SSI montrant le niveau d'ombrage produit par la végétation, notamment la canopée, permettant d'estimer la densité et la hauteur des arbres. Les zones en violet foncé indiquent une couverture forestière dense et élevée, générant un ombrage plus important, tandis que celles sans couverture, en blanc, n'ont pas d'ombrage. Globalement, l'ombrage dans la zone d'étude est moyen, ce qui suggère que la couverture forestière est moins dense que ce que d'autres indices, comme le NDVI, pourraient laisser penser. 167

Figure 3-14 Carte de l'indice Forest Canopy Density (FCD) montrant la relation entre la densité, la distribution de la canopée et l'ombrage produit. Les secteurs les plus denses et continus sont en vert, tandis que les zones à découvert sont en mauve. La densité de canopée est généralement moyenne, plus élevée près du cours d'eau principal, mais les tributaires, moins protégés, sont exposés aux rayons solaires, suggérant une vulnérabilité au réchauffement. 169

Figure 3-15 L'illustration se divise en trois parties principales. La première présente un gradient forestier, allant d'une absence de couverture forestière à une canopée dense. La deuxième partie illustre, à travers un graphique, la relation entre les facteurs de végétation, d'ombrage et de sol nu, et leur effet sur la température. Sur l'axe des Y, les niveaux élevés ou bas des paramètres sont représentés, tandis que l'axe des X montre l'évolution du couvert forestier. Le graphique révèle qu'en absence de végétation, la température est élevée, alors qu'une couverture forestière dense entraîne une diminution notable de la température. Enfin, la troisième partie est un tableau qui synthétise l'interprétation des résultats des indices individuels (AVI, BSI, SI, TI) en fonction des valeurs de l'indice global FCD et du niveau de couverture forestière. Par exemple, un FCD élevé reflète une forte végétation (AVI élevé), un faible sol nu (BSI bas), un ombrage important (SI élevé) et une température réduite (TI bas) (Rikimaru, et al., 2002; Zomer et al., 2007). 170

Figure 3-16 Carte d'ombrage riverain par heure cumulative : Elle indique le nombre d'heures d'ombrage accumulées par pixel le long du cours d'eau, allant de 1 à 12 heures. Cette carte met en évidence les secteurs clés pour le refroidissement thermique, où les zones les plus ombragées bénéficient d'une couverture prolongée, tandis que les secteurs ouverts ont un ombrage de courte durée. 172

Figure 3-17 Carte de l'insolation solaire surfacique, représentant la radiation globale (en WH/m²) sur la zone d'étude du bassin versant de la rivière Ouelle. Le bassin est largement exposé au rayonnement solaire, mais l'insolation diminue localement à proximité du cours d'eau, en particulier dans les secteurs à végétation dense. Certaines zones, notamment sur la rive gauche, reçoivent moins de radiation solaire, en raison de la présence de canopée et de l'orientation du relief. 174

Figure 3-18 Carte de l'identification des zones potentielles de refroidissement et de réchauffement sur le cours d'eau. Les zones de refroidissement (ZRf) potentiel sont indiquées en bleu, les zones modérées en gris et les zones de réchauffement (ZRc) en rouge. Trois zones sont identifiées pour le refroidissement et trois pour le réchauffement. La zone 1 présente un potentiel de refroidissement élevé, tandis que la zone 6 montre un potentiel de réchauffement plus marqué. Les zones 2 à 5 sont plutôt modérées, avec des nuances de gris, indiquant qu'elles peuvent être des zones de transition. 176

Figure 3-19 Répartition des refuges thermiques (RT) par classe de potentiel de refroidissement sur le cours d'eau : 38,2 % des RT se trouvent dans la catégorie à faible potentiel, tandis que 61,8 % sont situés dans la catégorie à potentiel modéré. Aucun RT n'a été identifié dans la catégorie à haut potentiel. 179

Figure 3-20 Distribution du nombre de RT par potentiel de refroidissement du cours d'eau : Dans les zones à faible potentiel, les RT sont principalement de type suintement latéral, une tendance également observée dans les zones à potentiel modéré. Les alcôves froides sont la catégorie la moins fréquente dans les zones à faible potentiel, tandis que dans les zones modérées, les RT associés aux ruisseaux d'eau de source sont les moins récurrents..... 181

Figure 3-21 Distribution des refuges thermiques (RT) par zone identifiée : Les zones 1, 3 et 5 correspondent à des zones de refroidissement (ZRf), tandis que les zones 2, 4 et 6 sont des zones de réchauffement (ZRc). Dans la zone 1, située en aval de la zone d'étude, on observe 6 types de RT. Le suintement latéral est le plus récurrent, suivi des RT de confluence. En troisième position, on trouve une répartition entre les alcôves froides, les chenaux latéraux froids, et les effluents de versant de vallée. Les ruisseaux d'eau de source sont les moins fréquents. La zone 2 présente 4 types de RT, avec une prédominance partagée entre le suintement latéral et les RT de confluence, suivis des effluents, et enfin des alcôves froides. La zone 3 est uniquement composée de RT de résurgence hyporhéique, tout comme la zone 4. La zone 5 est quant à elle exclusivement constituée de RT d'effluents de versant de vallée. Enfin, la zone 6, située dans une ZRc, est composé de 4 types de RT : le suintement latéral en première position, suivi des effluents, des résurgences hyporhéiques et des RT de confluence. Dans le graphique, des flèches illustrent le sens de l'écoulement de la rivière, facilitant ainsi la localisation des zones en fonction de leur position en aval ou en amont du cours d'eau. 182

Figure 3-22 Étalon, scénarios et résultat final (maille 1 x 1). Scénario 1: priorise le facteur hydrographique, montre peu de variations dans les zones de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc). Scénario 2 : priorise le facteur hydrogéologique, révèle une diminution de l'influence des sites en amont du bassin versant, réduisant ainsi les ZRf en amont. Scénario 3 : met l'accent sur le facteur géologique, qui génère des résultats similaires au scénario 2, soulignant l'interconnexion entre les facteurs hydrogéologique et géologique, souvent liés aux réservoirs d'eau souterraine. La figure inclut aussi la couche étalon, où tous les facteurs ont le même poids, ainsi que le résultat final pour comparaison. 185

Figure 3-23 La représentation du résultat final de l'Analyse multicritères pondéré (AMCp) montre les trois sections identifiées du site A visité : la section 1, qui correspond à un site à haut potentiel de réchauffement ; la section 2, une zone de transition entre la section 1 et la section 3 ; et enfin, la section 3, une zone à potentiel de refroidissement..... 188

Figure 3-24 Image A : Photos de la campagne terrain : Karolane Tremblay Chacon prépare la sonde ProDSS pour les relevés de température de la section A. Image B : Photo terrain: l'assistant terrain, Louis Boivin, mesure approximativement la hauteur de la colonne d'eau dans la section 1 du site A. 188

Figure 3-25 Image A : Dans le site A, section 1, on observe que le lit d'un des bras de la rivière est complètement exposé, sans débit d'eau et très sec, ce qui suggère qu'il n'y a pas eu

d'écoulement d'eau depuis un certain temps. Bien que la forêt soit dense, les arbres sont situés loin de la zone où l'eau pourrait être présente, ce qui réduit leur capacité à fournir de l'ombrage et à exercer un effet de refroidissement sur le cours d'eau. Image B : En amont de la section A, on observe le cours d'eau de la rivière Ouelle, dont le débit est relativement faible. Sur la rive droite, de petits glissements de terrain sont visibles. Sur les deux rives, des bancs rocheux composés de nombreuses petites roches de différentes tailles granulométriques et de sols nus sont suivis par des arbustes et une forêt dense. 190

Figure 3-26 Image A : Dans la section 2 du site A, une petite dénivellation entre les deux sections crée une chute d'eau. On remarque que la colonne d'eau y est plus profonde et que le débit est plus fort. Image B : Dans la section 2 du site A, après la petite chute, on observe un ralentissement du débit du cours d'eau. Le bassin, encaissé entre les roches, présente une diminution du débit de l'eau. 192

Figure 3-27 Dans la section 3 du site A, on observe le canyon où le cours d'eau s'écoule, encastré entre les roches, avec une forêt dense couvrant les roches. Les arbres, moyennement inclinés vers le cours d'eau, forment un couvert végétal assez dense, et la configuration étroite du canyon semble protéger l'eau des rayons solaires. 193

Figure 3-28 Dans un autre point de vue du petit canyon de la section 3 du site A, on observe le cours d'eau qui serpente entre les roches et d'autres petites dénivellations. La photo, prise vers 13 h00, montre que, du côté gauche, bien que les arbres ne soient pas très inclinés vers le cours d'eau, leur hauteur, leur angle et leur densité créent une zone ombragée. Cette configuration protège efficacement le cours d'eau des rayons du soleil, limitant ainsi l'ensoleillement direct sur sa surface. 194

Figure 3-29 Cette figure compare les résultats de l'Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp) pondéré avec la réalité observée sur le terrain (A), en identifiant les zones de potentiel de refroidissement (B) et de réchauffement (C). Il apparaît que la zone à haut potentiel de réchauffement (C), prédite par l'AMCp, correspond bien au type de paysage observé, indiquant que ce site est particulièrement vulnérable aux facteurs pouvant réchauffer l'eau. Inversement, la zone à potentiel de refroidissement identifiée par l'AMCp (B) correspond à une région qui semble offrir des conditions idéales pour protéger l'eau, en contribuant soit à son refroidissement, soit en prévenant son réchauffement. 196

Figure 3-30 Carte synthèse illustrant les résultats de l'analyse multicritères pondérée (AMCp) en contraste avec la distribution des refuges thermiques (RT) sous formes d'agrégats, ainsi que des photos de la réalité du terrain des zones de refroidissement (Zrf) 5 et 6. On observe la répartition des RT le long du cours d'eau caractérisé par son potentiel de refroidissement ou de réchauffement. Cela permet d'identifier les secteurs du cours d'eau où les RT seraient potentiellement plus vulnérables ou les secteurs à prioriser, afin d'orienter les stratégies de conservation ou de protection de l'habitat du saumon. Ag- RT 197

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Le tableau présente les mois d'été, de juin à août, pour les années 2020 à 2024, avec leurs températures moyennes, maximales et extrêmes, ainsi que le nombre de jours dépassant le seuil critique de 23 °C et les séries de jours consécutifs au-dessus de cette limite. Les mois marqués en rouge indiquent des scénarios extrêmes, combinant de longues périodes consécutives de températures élevées et un grand nombre de jours au-dessus de 23 °C. Parmi les températures extrêmes enregistrées, la valeur maximale, 35,4 °C, a été relevée en juin 2024 et est mise en évidence en violet foncé, tandis que la valeur minimale en violet pâle parmi ces extrêmes, 26,3 °C, a été observée en août 2023. Les chiffres en bleu indiquent le nombre de jours non consécutifs ayant dépassé 23 °C au cours d'un mois. L'année 2024 se distingue par le plus faible nombre de jours consécutifs de températures élevées par mois durant l'été, tandis que 2020 est celle ayant connu le plus grand nombre de jours consécutifs chauds sur cette période. Finalement, les chiffres en rouge indiquent des séries de plus de trois jours consécutifs dépassant les 23 °C. (Environnement et Ressources Naturelles, 2024)......	13
Tableau 2.1 Synthèse des six facteurs physiques identifiés, avec leurs variables et indicateurs associés.....	29
Tableau 2.2 Synthèse des facteurs physiques identifiés, avec leurs variables et indicateurs respectifs, incluant les données utilisées pour chaque indicateur, la méthode recommandée pour le traitement des données, ainsi que les sources associées.....	53
Tableau 2.3 Typologie des refuges thermiques selon les sources d'eau et les mécanismes associés (Dugdale, et al., 2013; Frechette, et al., 2018; Bergeron, et al., 2020)	57
Tableau 2.4 Synthèse des facteurs physiques et variables influençant les variations de température des cours d'eau en lien avec les zones de refroidissement et les refuges thermiques	63
Tableau 2.5 Exemple de la table des puits de forage de la base de données du SIH : On observe la colonne # qui identifie le numéro de la ligne, suivie de deux colonnes de coordonnées x et y, de l'identifiant unique du puits, de la profondeur totale du forage, du niveau d'eau (si disponible) et de sa profondeur. Viennent ensuite la séquence de la stratigraphie identifiée dans le forage, l'épaisseur de chaque ligne stratigraphique et l'identification du type de dépôt. Ces trois dernières colonnes (séquence, épaisseur et description) se répètent jusqu'à ce que toutes les lignes stratigraphiques des types de dépôts soient identifiées dans le forage.	85
Tableau 2.6 Synthèse des différentes formules utilisées pour le calcul de l'indice de sol nu. Chaque formule est adaptée au contexte du territoire, le choix étant principalement influencé par les facteurs forestiers et anthropiques. La formule retenue est mise en évidence en orange dans le tableau.	113
Tableau 2.7 Heures de lever et de coucher du soleil pour les mois d'été (juin à août) de 2020 à 2023	125

Tableau 2.8 Calcul des intervalles de la période d’enseillement importante pour être couverte par l’ombrage riverain	127
Tableau 2.9 Paramètres pour la modélisation de l’ombrage riverain (azimut et altitude)	128
Tableau 3.1 Synthèse des résultats par objectif et sous-objectif	143
Tableau 3.2 Classes d'inclinaisons de la pente en six (6) catégories en pourcentages (Gouvernement du Canada, 2013).....	156
Tableau 3.3 Répartition des refuges thermiques par type de zone (refroidissement et réchauffement) et par zone identifiée	178
Tableau 3.4 La distribution des pondérations entre les indicateurs des facteurs physiques totalise 100. La première colonne représente l'étalon, avec un poids de 9 pour chaque indicateur, totalisant 99 en raison des contraintes de Raster Calculator. Les trois colonnes suivantes présentent trois scénarios avec un facteur priorisé : le scénario 1 priorise l'hydrographique, le scénario 2 l'hydrogéologique, et le scénario 3 le géologique, chacun avec un poids de 14 par indicateur, totalisant 28.	185

LISTE DES FORMULES

- Formule 2.1 Calcul de l'indice d'humidité topographique (TWI), où a correspond à l'aire de bassin spécifique et $\tan(B)$ représente la pente locale (Beven, et al., 1979; Esri, 2024a)..... 76
- Formule 2.2 Calcul du gradient de pente où P1 représente le point amont du segment, P2 représente le point en aval du segment et DS représente la distance du segment, multipliés par 100 pour avoir un résultat en pourcentage..... 97
- Formule 2.3 Calcul de l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) en utilisant les bandes spectrales proche infrarouge (NIR) et rouge (RED). Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B08 pour le proche infrarouge et B04 pour le rouge. Finalement, un exemple de la formule de l'indice NDVI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B08 pour la bande proche infrarouge et B04 pour la bande rouge)..... 107
- Formule 2.4 Calcul de l'indice FCD (Forest Canopy Density) en utilisant les paramètres SSI (*Scaled Shadow Index*) et VD (Vegetation Density)..... 108
- Formule 2.5 Calcul de l'indice AVI (*Advanced Vegetation Index*) utilisant les bandes spectrales proche infrarouge (NIR) et rouge (RED). Dans la formule, MaxValue correspond à la valeur maximale observée parmi les pixels de la bande spectrale. Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B08 pour le proche infrarouge et B04 pour le rouge. Finalement, un exemple de la formule de l'indice AVI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B08 pour la bande proche infrarouge et B04 pour la bande rouge)..... 111
- Formule 2.6 Calcul de l'indice BSI (*Bare Soil Index*) en utilisant les bandes spectrales infrarouge à ondes courtes (SWIR), rouge (RED), bleu (BLUE) et proche infrarouge (NIR). Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B11 pour l'infrarouge à ondes courtes, B04 pour le rouge, B02 pour le bleu, et B08 pour le proche infrarouge. Finalement, un exemple de la formule de l'indice BSI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B11 pour la bande infrarouge à ondes courtes, B04 pour la bande rouge, B02 pour la bande bleue, et B08 pour la bande proche infrarouge). 115
- Formule 2.7 Calcul de l'indice SI (*Shadow Index*) en utilisant les bandes spectrales rouge (RED), vert (GREEN), et bleu (BLUE). Dans la formule, MaxValue correspond à la valeur maximale observée parmi les pixels de la bande spectrale. Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B04 pour le rouge, B03 pour le vert, et B02 pour le bleu. Finalement, un exemple de la formule de l'indice SI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B04 pour la bande rouge, B03 pour la bande verte, et B02 pour la bande bleue)..... 117
- Formule 2.8 Calcul de l'indice SSI (*Scaled Shadow Index*) en utilisant le résultat du calcul de l'indice SI. Dans la formule, MaxValue et MinValue correspondent respectivement aux

valeurs maximales et minimales observées parmi les pixels du résultat. Suivi d'un exemple de la formule avec les valeurs du résultat de l'indice SI calculé antérieurement.....	118
Formule 2.9 Normalisation du VD (Vegetation Density) en utilisant le résultat du calcul du VD. Dans la formule, MaxVD et MinVD correspondent respectivement aux valeurs maximales et minimales observées parmi les pixels du résultat. Suivi d'un exemple de la formule avec les valeurs du résultat de l'indice VD calculé antérieurement.	120
Formule 2.10 Inversion des valeurs des couches	140
Formule 2.11 Normalisation des indicateurs.....	140
Formule 2.12 Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp) : Zones de refroidissement et de réchauffement.....	141

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AMCp	Analyse Multi-Critères pondérée
AVI	<i>Advanced Vegetation Index</i>
BD	Base de données
BSI	<i>Bare Soil Index</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FCD	<i>Forest Canopy Density</i>
MH	Milieus humides
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
RT	Refuge thermique
SI	<i>Shadow Index</i>
SIG	Système d'information géographique
SSI	<i>Scaled Shadow Index</i>
TWI	<i>Topographic wetness index</i>
VD	<i>Vegetation Density</i>
Zrf	Zone de refroidissement
Zrt	Zone de réchauffement

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

%	Pourcentage
Km	Kilomètre
Km ²	Kilomètre carré
M ³ /sec	Mètre cube par seconde
WH/m ²	Wattheure par mètre carré

RÉSUMÉ

Le saumon atlantique (*Salmo salar*), espèce emblématique du Québec, fréquente des eaux claires et fraîches, ce qui en fait un indicateur clé de la santé des écosystèmes forestiers et riverains. Cependant, dans un contexte de changements climatiques, un défi majeur se pose : les fluctuations hydroclimatiques et les stress thermiques. Cela inclut l'augmentation des températures de l'eau, la prolongation des périodes d'étiage et des canicules, ainsi que des températures excessivement froides. En tant qu'espèce ectotherme, la température est le facteur abiotique déterminant pour la survie du saumon atlantique. Incapable de réguler sa température corporelle, il dépend de la stabilité thermique de l'eau et de variations minimales de cette température pour survivre. Il parvient à se maintenir aux températures élevées grâce aux refuges thermiques (RT), des sites ponctuels où la température de l'eau est plus froide que celle du cours d'eau principal. Cependant, la localisation de ces refuges est complexe, car ils sont sensibles aux variations spatio-temporelles et dépendent principalement des mécanismes liés aux eaux souterraines et de surface. Ils peuvent se trouver à l'intérieur ou à l'extérieur des « zones de refroidissement », des secteurs plus vastes et moins définis, où l'interaction de divers facteurs physiques environnementaux favorise le refroidissement ou le maintien de la température de l'eau. Bien que similaires en raison de la différence de température, les refuges thermiques se distinguent des zones de refroidissement par leur fonction écohydrologique. Cependant, ces zones sont difficiles à identifier et à cartographier sans recourir à des techniques spécialisées et coûteuses comme la télédétection, la géomatique ou les images thermiques (TIR), qui sont souvent hors de portée des acteurs locaux. Ainsi, ce mémoire propose une méthodologie novatrice utilisant les systèmes d'information géographique (SIG) pour identifier, cartographier et modéliser l'agrégation de facteurs physiques influençant la température de l'eau. L'objectif est d'identifier les zones favorables au refroidissement (ZRf) et au réchauffement (ZRc) des cours d'eau principal, afin de guider et de soutenir les efforts de conservation et de restauration du bassin versant. L'étude se concentrera sur la rivière Ouelle, située au Bas-Saint-Laurent, un site représentatif des défis rencontrés dans les bassins versants des rivières à saumon. Cette approche vise à améliorer la gestion locale des écosystèmes et à fournir une base scientifique pour orienter les actions de protection et de restauration. Le projet, qui s'inscrit dans une collaboration entre le GeoLAS (Laboratoire de géomatique appliquée et d'Analyse Spatiale) et la Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA), proposera une cartographie qui pourra orienter des prises de décisions pour la préservation de la santé du bassin versant, la protection du saumon atlantique et le maintien de l'équilibre thermique des cours d'eau.

Mots clés : géomatique, systèmes d'information géographique, télédétection, analyse spatiale, analyse multicritères pondérée, zones de refroidissement, refuges thermiques, zones de réchauffement, saumon atlantique, rivières, rivières à saumon

ABSTRACT

The Atlantic salmon (*Salmo salar*), an emblematic species of Quebec, thrives in clear, cold waters, making it an important indicator of the health of forest and riparian ecosystems. However, climate change poses a significant challenge due to hydro-climatic fluctuations and thermal stress. This includes rising water temperatures, extended low-flow periods, heatwaves, and extremely cold temperatures. As an ectothermic species, temperature is the key abiotic factor for the survival of Atlantic salmon. Unable to regulate its body temperature, it depends on the thermal stability of the water and minimal temperature fluctuations to survive. To cope with elevated temperatures, the salmon seeks out thermal refuges (TR), localized areas where the water temperature is cooler than in the mainstem. Locating these refuges is challenging because they are highly sensitive to spatiotemporal variations and are primarily influenced by groundwater and surface water interactions. Thermal refuges can be found both within and outside "cooling zones," which are larger, less-defined areas where various environmental factors help maintain or lower the water temperature. Although thermal refuges and cooling zones are similar in terms of temperature difference, they differ in their ecohydrological roles. However, identifying and mapping these zones requires specialized, often expensive techniques such as remote sensing, geomatics, or thermal infrared imaging (TIR), which are typically out of reach for local entities. This research presents an innovative methodology using Geographic Information Systems (GIS) to identify, map, and model the aggregation of physical factors influencing water temperature. The goal is to identify areas that contribute to cooling and warming the mainstem, to guide efforts for their respective conservation and restoration within the watershed. The study will focus on the Rivière Ouelle in the Bas-Saint-Laurent region, which serves as a representative example of the challenges encountered in salmon river watersheds. This approach aims to enhance local ecosystem management and provide a scientific foundation to guide protection and restoration efforts. The project, a collaboration between GeoLAS (Laboratory of Applied Geomatics and Spatial Analysis) and the Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA), will provide a map that can guide decision-making for the preservation of watershed health, the protection of Atlantic salmon, and the maintenance of the thermal balance of the mainstem.

Keywords : geomatics, geographic information systems, remote sensing, spatial analysis, weighted multi-criteria analysis, cooling zones, thermal refuges, warming zones, atlantic salmon, rivers, salmon rivers

INTRODUCTION

Le saumon atlantique (*Salmo salar*), espèce emblématique du Québec (COSEPAC, 2006), joue un rôle essentiel en tant qu'indicateur de la santé des cours d'eau et du bassin versant (MPO, 2009). Sa gestion relève d'une gouvernance complexe au Québec, impliquant divers acteurs tels que les Premières Nations (principalement pour des fins alimentaires), les ministères, les acteurs de l'eau et les pêcheurs sportifs (MELCCFP, 2023). Face à la diminution des populations de saumons due à la surpêche, à l'exploitation forestière, à l'agriculture, à l'urbanisation, à la sédimentation et à la pollution (Parcs Canada, 2022), la pêche commerciale a été interdite au Québec en 2000 (MELCCFP, 2023).

Cependant, la pêche sportive au saumon demeure populaire et, en 2022, elle a généré une valeur ajoutée de 26 M\$ CAD (MELCCFP, 2023). De nombreux acteurs du Québec s'efforcent de contribuer à la préservation de la population de saumons et à la protection de leur habitat. En 2016, le Plan de gestion du saumon atlantique a été mis en place pour assurer la conservation à long terme des populations de saumon atlantique, tout en favorisant une gestion optimale de la pêche sportive (MFFP, 2016). Quelques années plus tard, en 2022, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) a exprimé son intention de mettre en place un cadre de gestion visant l'harmonisation des rivières à saumon sur certains territoires, tels que les Zones d'Exploitation Contrôlée (ZEC) et les réserves fauniques (Cabinet du ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2022a). À la suite de la restructuration des instances gouvernementales la même année, le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) a repris ce mandat en se fixant trois objectifs principaux : favoriser la mise en valeur des rivières à saumon pour la pêche, encourager un partage harmonieux du territoire, et assurer une gouvernance claire et collaborative.

Dans cette perspective, de nombreux efforts sont déployés pour en assurer la protection de l'écosystème riverain et forestier, tel que l'attribution du statut de rivière à saumon. Toutefois, la fonction de ce statut reste ambiguë pour certains acteurs de l'eau (FQSA, 2012):

[...] il n'est spécifié à nulle part si le but visé par cette reconnaissance est de protéger l'habitat du saumon adulte, parce que l'exploitation sportive de cette espèce donne lieu à une pêche de grande valeur, ou s'il est de protéger l'ensemble des habitats de cette espèce dans une optique écologique.

D'après le Bilan d'exploitation du saumon au Québec en 2023, il y a un total de 114 rivières à saumon (MELCCFP, 2024a). À la lumière de ces quelques exemples, on peut penser que la protection du saumon atlantique revêt une importance stratégique à la fois sur le plan économique et vital, mais aussi, elle demeure cruciale d'un point de vue environnemental. Le salmonidé doit trouver des cours d'eau offrant un spectre de conditions idéales pour son développement à travers ses stades de croissance. Il se démarque par sa forme anadrome, c'est-à-dire une espèce qui naît en eau douce, migre vers l'océan pour une partie de sa vie, puis retourne dans les rivières où il est né pour se reproduire (MPO, 2018). Ainsi, l'utilisation de plusieurs écosystèmes entre l'habitat dulcicole et l'habitat marin tout au long de son cycle de vie suscite un intérêt scientifique en raison de la complexité de cette espèce, de sa capacité d'adaptation à son environnement et de sa sensibilité face à la qualité de l'habitat.

Cependant, dans un contexte de changements climatiques, les fluctuations hydroclimatiques et les stress thermiques constituent un défi majeur (Heggenes et al., 1993; FQSA-DGR, 2012). Cela comprend l'augmentation des températures de l'eau, la prolongation des périodes d'étiage et des périodes de canicules, ainsi que des températures excessivement froides (FQSA-DGR, 2012). Toutefois, le réchauffement de l'eau représente la menace la plus inquiétante. D'après Heggenes et al. (1993), la température serait le facteur abiotique le plus déterminant pour la survie du saumon atlantique. En effet, en tant qu'espèce ectotherme, il dépend de la stabilité thermique de l'eau ou de variations minimales pour survivre puisqu'il est incapable de réguler sa température corporelle (FQSA, 2022). De plus, la température de l'eau joue un rôle crucial en déclenchant la migration et

les processus métaboliques, et détermine les taux de progression et le succès à chaque stade de vie (Dymond, 1963; Elson, 1975; Wilzbach et al., 1998; COSEPAC, 2006). La littérature indique que des températures comprises entre 14 et 20 °C sont problématiques pour le saumon à toutes les étapes de son développement. Bien que le seuil optimal varie selon les sources, une température excédant 20-23 °C est généralement considérée comme potentiellement létale pour l'espèce (FQSA, 2022; COSEPAC, 2006).

Néanmoins, le saumon atlantique réussit à survivre aux températures élevées en utilisant les refuges thermiques (RT). Ce sont des secteurs où la température de l'eau est plus froide que celle du chenal principal (FQSA, 2022). Les types de RT identifiés dans la littérature sont influencés par des facteurs physiques (Sullivan et al. 2021). Pour en nommer quelques-uns, il y a des RT issus des résurgences d'eaux souterraines, et d'autres résultent de la confluence des tributaires d'eau froide (Sullivan et al. 2021). La localisation des RT est relative, ceux-ci peuvent se localiser tant dans des secteurs connus comme des « cooling zones » ou « zones de refroidissement » (ZRf) qu'en dehors de ce périmètre (Fakhari, et al., 2022). Bien que ces deux termes se ressemblent, ils se distinguent par le fait que les RT se localisent sur un site ponctuel sur la rivière, alors que les ZRf représentent des surfaces plus larges et moins délimitées (Fakhari, et al., 2022). Ce sont des zones où plusieurs facteurs physiques seraient concentrés pour contribuer au refroidissement de la température du cours d'eau principal. Malgré leur aspect vital pour la survie du saumon atlantique, les RT et les ZRf sont difficiles à détecter, à cartographier et à caractériser sans l'aide de techniques et d'expertise plus coûteuse, qui sont souvent hors de portée pour les acteurs locaux, telles que la télédétection, la géomatique ou l'acquisition d'Images thermiques (TIR) par hélicoptère ou par drone (Dugdale et al., 2013).

Malheureusement, les RT sont autant menacés par les changements climatiques que par les activités anthropiques, tel que l'industrie forestière (FQSA, 2022). Bien que la foresterie apporte des avantages économiques, elle engendre également des risques pour l'équilibre des écosystèmes forestiers et riverains des bassins versants (FQSA, 2022). Les acteurs locaux s'efforcent de réaliser des projets de caractérisation du bassin versant dans le but de justifier la protection de certaines

zones et de fournir des orientations aux intervenants du territoire dans le cadre des Tables de gestion intégrée des ressources et du territoire (TGIRT) (FQSA-DGR, 2012).

Les observations décrites précédemment mettent en lumière la complexité des interactions entre l'humain et la nature dans les écosystèmes des rivières à saumon. Ce fragile équilibre nécessite un compromis constant entre la protection de l'environnement, notamment celle du saumon atlantique et de ses habitats, et les activités économiques qui dépendent de cette espèce et de son écosystème. Les pressions anthropiques et les défis climatiques imposent des choix stratégiques qui doivent concilier développement économique et préservation écologique. Les réflexions présentées dans ce mémoire s'inscrivent dans la continuité des efforts déjà amorcés pour la gestion durable des bassins versants. Elles visent à répondre aux besoins croissants d'outils d'analyse spatiale en géomatique accessibles aux acteurs de l'eau, tout en renforçant la caractérisation des bassins versants des rivières à saumon. Ce mémoire a pour objectif d'actualiser une méthodologie, s'appuyant sur les systèmes d'information géographique (SIG), afin d'identifier, modéliser et cartographier les facteurs physiques exerçant une influence sur la température de l'eau ainsi que leur agrégation. Cela permettra de déterminer les zones potentielles de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc) des cours d'eau.

L'étude se concentrera sur la rivière Ouelle, située au Bas-Saint-Laurent (zone salmonicole Q3), un site représentatif des enjeux rencontrés dans les bassins versants des rivières à saumon. Grâce aux avancées récentes en analyse spatiale appliquée aux SIG, cette recherche actualisera une méthode permettant de caractériser et d'identifier avec plus de précision les zones critiques de refroidissement et de réchauffement au sein de ce bassin versant. Cette approche améliorée favorisera une gestion plus efficace des écosystèmes locaux et fournira une base scientifique optimisée pour orienter les stratégies de protection et de restauration. Enfin, il convient de souligner que ce mémoire est réalisé en collaboration avec le GeoLAS (Laboratoire de géomatique appliquée et d'Analyse Spatiale de l'UQAM) et la Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA), dans le cadre du projet « Suivi des températures des rivières à saumon 2024-2026 », financé par la Fondation de la Faune du Québec (FFQ) et la Fondation pour la Conservation du Saumon Atlantique (FCSA). Cette synergie entre la recherche scientifique et les acteurs de terrain est

essentielle pour répondre aux enjeux actuels de conservation des rivières à saumon, en alliant expertise, innovation et gestion durable des ressources.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre, **Introduction**, expose le cadre général de la recherche en mettant l'accent sur les enjeux environnementaux liés à la préservation du saumon atlantique et de son habitat, ainsi que sur la nécessité de protéger les écosystèmes aquatiques face aux défis posés par le changement climatique. Le deuxième chapitre, **Méthodologie**, détaille l'approche multicritère adoptée pour l'analyse spatiale. Cette méthodologie intègre des techniques avancées de modélisation afin d'optimiser l'identification et la cartographie des zones de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc) dans le bassin versant de la rivière Ouelle. Le troisième chapitre, **Résultats**, présente les données et les cartes obtenues à l'aide de cette méthodologie, ainsi que les principales observations concernant les facteurs physiques influençant la température de l'eau. Enfin, le quatrième chapitre, **Discussion**, met en perspective les résultats en tenant compte des défis environnementaux actuels, en comparant les zones identifiées avec les connaissances existantes et en suggérant des stratégies de conservation et de restauration pour les zones critiques.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

Ce chapitre présente une revue de littérature mettant en lumière le contexte environnemental et les défis auxquels fait face le bassin versant. Il explore également les vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques, considérés comme les principaux enjeux. Enfin, la problématique, la question de recherche et les objectifs seront présentés.

1.1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1.1 Contexte environnemental et défis du bassin versant de la rivière Ouelle

La rivière Ouelle, située à 381 km de Montréal, s'étend entre les régions du Bas-Saint-Laurent et de Chaudière-Appalaches (Figure 1-1) (Furois, 2016), et constitue la rivière à saumon située le plus à l'ouest sur la rive sud du Saint-Laurent (MRC de Kamouraska, 2024). La superficie de son bassin versant est de 841 km² et son cours d'eau a une longueur de 76 km, dont 26 km était ouvert à la pêche sportive (Saumon Québec, 2015; Furois, 2016). Ce bassin s'étend sur deux municipalités régionales de comté (MRC) : la MRC de Kamouraska pour le secteur amont (où la rivière à saumon s'écoule) et la MRC de L'Islet pour le secteur aval (Furois, 2016). Depuis 1966, la rivière Ouelle et quatre de ses affluents (Chaude, Sainte-Anne, du Rat Musqué et Grande rivière) ont le statut de rivières à saumon, limité aux tronçons fréquentés par cette espèce, tandis que les portions situées en amont des chutes infranchissables en sont exclues (MRC de Kamouraska, 2024).

Figure 1-1 Carte du bassin versant de la rivière Ouelle, d'une superficie de 841 km². Ce bassin est situé entre le Bas-Saint-Laurent et Chaudière-Appalaches, couvrant les MRC de Kamouraska (amont) et de L'Islet (aval) (Furois, 2016).



Le Plan de conservation de la rivière Ouelle (2016), élaboré par l'Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR) en collaboration avec la FQSA, dresse un portrait détaillé du bassin versant et des principaux défis environnementaux auxquels la rivière est confrontée. Le résumé qui suit met en lumière les faits saillants de ce plan, en soulignant les enjeux majeurs liés à la conservation de cet écosystème.

Le bassin de la rivière Ouelle est divisé de sept sous-bassins. Bien qu'il n'y ait pas de grandes étendues d'eau, il compte 16 petits plans d'eau couvrant une superficie totale de 8,5 km², soit environ 1 % du bassin versant. Parmi eux, les lacs Therrien (1,3 km²), Sainte-Anne (3 km²) et Chaudière (1,3 km²) sont les plus importants, situés à la tête de leurs sous-bassins respectifs et jouant un rôle essentiel dans l'alimentation de la rivière (Furois, 2016). La rivière dispose également d'une station hydrométrique située à 2,7 km de son embouchure. Selon les données du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), les débits maximaux sont observés en avril et mai, tandis que les débits d'étiage surviennent en février, août et septembre (CEHQ, 2015; Furois, 2016). Toutefois, les projections indiquent que les périodes d'étiage estivales seront de plus en plus sévères et prolongées dans les années à venir (CEHQ, 2015; Furois, 2016).

Un faible débit accentue le réchauffement de l'eau, entraînant une diminution de l'oxygène disponible et rendant l'accès aux habitats de frai plus difficile, ce qui compromet directement la survie du saumon (Furois, 2016). Les températures dans les bassins nordiques sont déjà en hausse, et cette tendance devrait se poursuivre dans les années à venir, affectant encore davantage les bassins du sud du Québec (Dugdale et al., 2015; Furois, 2016). La Figure 1-2 montre qu'en 2024, durant l'été, le débit varie généralement entre 1 et 10 m³/s, ce qui est relativement bas (CEHQ, 2024). Ces débits semblent effectivement en concordance avec ce qui est mentionné précédemment, soulignant que les faibles débits exacerbent le réchauffement des eaux. Les changements climatiques devraient également modifier le régime hydrique du sud du Québec, avec une augmentation et un allongement des périodes d'étiage estivales. Les prévisions indiquent une réduction du débit de 40 à 50 % sur une période de 30 jours consécutifs sur 5 ans (CEHQ, 2015; Furois, 2016). Cette diminution influencera non seulement le régime hydrique de la rivière Ouelle, mais également la population de saumons, déjà connue pour sa sensibilité, car un faible débit entraverait leur migration vers l'amont (Furois, 2016). La fragilité de la population de saumons

est évidente, car après avoir disparu de la rivière Ouelle, elle a été réintroduite dans les années 1960 grâce à l'ensemencement de plus de 500 000 tacons et alevins entre 1961 et 1964. Ces efforts, poursuivis jusqu'en 2000, ont soutenu la pêche sportive et permis l'établissement d'une population autosuffisante (MRC de Kamouraska, 2024).

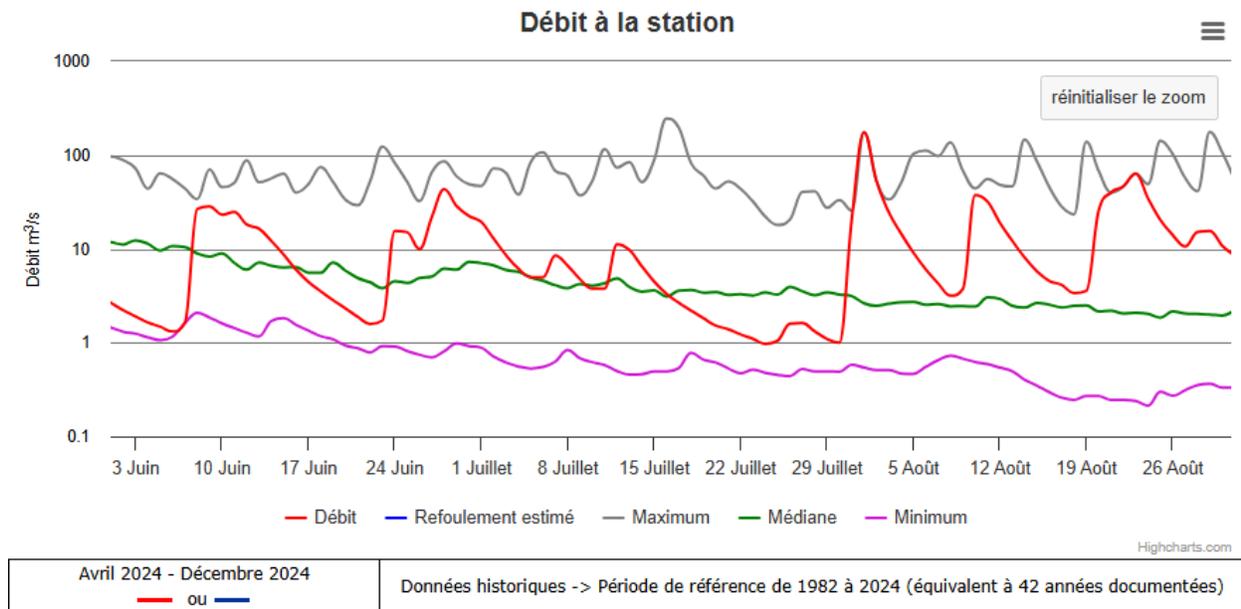
Figure 1-2 Évolution du débit mesuré à la station 022704 Ouelle, située à 2,7 km en aval du pont-route près de Saint-Gabriel-de-Kamouraska. Les données, couvrant la période de 1982 à 2024, montrent le débit moyen (ligne rouge), le refoulement estimé (bleu), le maximum (gris), la médiane (vert) et le minimum (rose). L'axe des ordonnées (y) exprime le débit en m³/s, tandis que l'axe des abscisses (x) indique les dates de l'année 2024. En moyenne, la médiane oscille entre 5 et 10 m³/s. Entre les mois de juin et août 2024, le débit varie généralement entre 1 et 10 m³/s, dépassant ponctuellement cette limite. Une seule hausse notable, excédant les 100 m³/s, a été enregistrée à la fin juillet 2024 (CEHQ, 2024).

Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques

Station : 022704 Ouelle - à 2,7 km en aval du pont-route près de Saint-Gabriel-de-Kamouraska

(Données préliminaires)

Sélectionner une partie du graphique pour l'agrandir.



Cependant, le contexte actuel de changements climatiques et de pressions humaines rend les défis pour la population de saumons encore plus complexes. Le stress thermique est l'un des principaux facteurs aggravants, et la température de l'air influence celle de l'eau de manière non linéaire. En général, il est reconnu que la température de l'air constitue l'un des principaux facteurs physiques influençant la température de l'eau (Koirala et al., 2014; O'Sullivan et al., 2019b). Une augmentation de 1 degré de la température de l'air entraîne un réchauffement de l'eau de 0,6 à 0,8 degré, ce qui peut affecter la qualité de l'eau, notamment en réduisant la teneur en oxygène dissous (Morris et al., 2001; Cluis, 1972; L'Heureux, 2002). Ainsi, la température de l'air est fréquemment utilisée comme proxy dans les modèles de prévision de la température de l'eau (Caissie et al., 2007; O'Sullivan et al., 2019b). Cependant, il convient de noter que la température de l'air « ne peut pas prévoir adéquatement l'hétérogénéité de la température de la rivière » [Notre traduction] (Isaak et al., 2019; O'Sullivan et al., 2019b). Les températures des rivières et des ruisseaux réagissent rapidement aux fluctuations de l'air en raison de leur petite taille, ce qui les rend plus sensibles que les lacs. Cette variation est en partie déterminée par des facteurs comme la taille du plan d'eau, le degré de mélange de l'eau, et la présence de sources d'afflux telles que les tributaires ou les zones végétales. En conséquence, les températures de l'eau dans ces cours d'eau changent plus vite, avec des fluctuations diurnes, quotidiennes et saisonnières, en réponse aux variations de la température de l'air (Koycheva, 2003; Koirala et al., 2014; O'Sullivan et al., 2019b; Morris et al., 2001; Cluis, 1972; L'Heureux, 2002).

Compte tenu de l'allongement prévu des périodes de chaleur et des tendances récentes observées dans cette région, des préoccupations émergent concernant la mortalité et les effets létaux de ces phénomènes sur les populations de saumons. Par exemple, en 1987, la température de l'eau a atteint 34°C pendant plusieurs heures, dépassant le seuil léthal de 27°C pendant plus de 72 heures, entraînant la mort de plus de 250 saumons (Thibault et al., 1990; Furois, 2016). En 1987, les données d'exploitation du saumon indiquent un dénombrement de 540 individus, suggérant la disparition d'environ la moitié de la population recensée à cette période (Figure 1-3) (MELCCFP, 2024a).

Additionnellement, la tendance de la température de l'air dans la région de la rivière Ouelle s'est aggravée ces dernières années (Tableau 1.1). Nous avons fait une analyse des températures de l'air des mois d'été (juin, juillet, août) entre 2020 et 2024 qui montre que bien que la température moyenne reste dans une plage acceptable, des températures maximales ont dépassé les seuils préoccupants de 20-23°C, atteignant entre 23 et 25°C, avec des pics extrêmes de 26,3°C en août 2023 et 35,4°C en juin 2024. De plus, sur les 15 mois analysés, ils ont tous enregistré plus de 3 jours consécutifs avec des températures supérieures aux seuils d'acceptabilité. D'ailleurs, pour l'été 2023, on observe que la température moyenne de la rivière était de 20,9 °C (RivTemp, 2024). En tenant compte des effets mortels observés en 1987, il est probable qu'avec le contexte actuel, une population de saumons déjà vulnérable rencontre des difficultés de survie dans de telles conditions. Cette situation suscite des inquiétudes quant à la pérennité de l'espèce.

D'ailleurs, le bilan d'exploitation montre que pour les années 2018, 2019 et 2020, seulement 25, 31 et 49 saumons ont été comptabilisés respectivement. Cela représente environ 3 % de la population estimée lors du dernier dénombrement effectué en 1996 (Figure 1-3, Figure 1-4). Bien que certains saumons aient pu éviter la barrière de comptage, leur nombre reste largement inférieur au seuil de conservation, estimé entre 400 et 500 grands saumons, nécessaire pour préserver l'espèce et maintenir la pêche (Furois, 2016). Ces chiffres mettent en évidence non seulement la diminution marquée de la population de saumons dans la rivière Ouelle au fil des années, mais également l'instabilité qui caractérise cette population.

Figure 1-3 Sommaire de l'exploitation sportive de la rivière Ouelle, couvrant les années 1984 à 2006, met en évidence l'année 1987. Cette année-là, 540 saumons ont été comptabilisés lors de la montaison. Cependant, durant l'été, au moins 250 d'entre eux sont morts en raison de longues périodes de canicules (Thibault et al., 1990; Furois, 2016; MELCCFP, 2024a).

Sommaire de l'exploitation sportive de 1984 à 2023 de la rivière Ouelle														Optimal: 1,634				
Zone salmonicole: Q3			No. rivière: 02270000			Seuils de conservation (million d'oeufs)			Démographique: 0,499									
Année	Captures sportives			Remise à l'eau	Jours-pêche	Succès (Cap. j-p.)	Succès ajusté	Taux (%) Exploitation			Retrait	Prélèvement	Montaison			Reproducteurs		Oeufs déposés (million)
	Petit	Grand	Total					Petit	Grand	Total			Mad.	Réd.	Total	Mad.	Réd.	
1984	76	26	102		617	0,17		29	29	29	30	132	262	90	352		220	
1985	27	39	66		734	0,09		14	14	14	41	107	187	270	457		350	
1986	57	76	133		1 365	0,10		14	14	14	197	330	420	560	980		650	1,09
1987	21	21	42		521	0,08		8	8	8	366	408	270	270	540		132	0,20
1988	94	60	154		1 134	0,14		32	32	32	75	229	297	190	487		258	0,31
1989	104	70	174		1 611	0,11		14	14	14	442	616	722	486	1208		592	0,74
1990	70	208	278		2 291	0,12		20	20	20	271	549	345	1025	1370		821	1,72
1991	26	38	64		940	0,07		13	13	13	160	224	198	290	488		264	0,45
1992	128	60	188		1 237	0,15		11	11	11	22	210	1137	533	1670		1460	2,99
1993	18	29	47		1 140	0,04		9	9	9	22	69	191	309	500		431	0,72
1994	119	18	137		646	0,21		25	25	25	9	146	476	72	548		402	0,42
1995	20	28	48		704	0,07		7	7	7	48	96	302	422	724		628	2,15
1996	230	60	290		926	0,31		25	25	25	8	298	920	240	1160		862	0,95
1997	24	46	70		529	0,13					28	98						
1998	38	31	69		472	0,15					10	79						
1999	38	31	69		731	0,09					21	90						
2000	58	25	83	0	475	0,17	0,17				22	105						
2001	22	39	61	0	588	0,10	0,10				17	78						
2002	17	8	25	0	395	0,06	0,06				10	35						
2003	63	26	89	0	666	0,13	0,13				0	89						
2004	8	49	57	5	518	0,11	0,12				0	57						
2005	23	5	28	0	108	0,26	0,26				0	28						
2006	7	12	19	0	145	0,13	0,13				0	19						

Tableau 1.1 Le tableau présente les mois d’été, de juin à août, pour les années 2020 à 2024, avec leurs températures moyennes, maximales et extrêmes, ainsi que le nombre de jours dépassant le seuil critique de 23 °C et les séries de jours consécutifs au-dessus de cette limite. Les mois marqués en rouge indiquent des scénarios extrêmes, combinant de longues périodes consécutives de températures élevées et un grand nombre de jours au-dessus de 23 °C. Parmi les températures extrêmes enregistrées, la valeur maximale, 35,4 °C, a été relevée en juin 2024 et est mise en évidence en violet foncé, tandis que la valeur minimale en violet pâle parmi ces extrêmes, 26,3 °C, a été observée en août 2023. Les chiffres en bleu indiquent le nombre de jours non consécutifs ayant dépassé 23 °C au cours d’un mois. L’année 2024 se distingue par le plus faible nombre de jours consécutifs de températures élevées par mois durant l’été, tandis que 2020 est celle ayant connu le plus grand nombre de jours consécutifs chauds sur cette période. Finalement, les chiffres en rouge indiquent des séries de plus de trois jours consécutifs dépassant les 23 °C. (Environnement et Ressources Naturelles, 2024).

Année	Mois	T° moyenne	T° max	T° extrême	Nb de jours dépassant les 23 °C	Nb de jours consécutifs 23 °C ou plus
2020	JN	17	23.4	34.7	17	13
	JL	19.6	25.4	30.3	25	10
	AU	18.6	24.2	31.9	20	16
2021	JN	18.4	24	32.7	16	6
	JL	17.5	22.8	27.7	19	10
	AU	20.2	26.1	31.9	20	5
2022	JN	15.7	21.3	30.8	13	6
	JL	19.7	25.1	30.5	25	15
	AU	19	24.3	30	24	7
2023	JN	15	19.9	32.2	12	5
	JL	20.2	25.2	31.5	25	12
	AU	17.3	22.2	26.3	17	6
2024	JN	17.8	23.9	35.4	21	7
	JL	21.4	26.5	29.8	25	9
	AU	18.5	23.4	31	21	8

Figure 1-4 Le sommaire de l'exploitation sportive de la rivière Ouelle, couvrant les années 2007 à 2023, met en évidence, en complément de la que le dénombrement des saumons n'a pas été réalisé de manière régulière, avec une période sans comptage entre 1997 et 2018. Entre 2018 et 2020, très peu de saumons ont été comptabilisés. Cette situation s'explique par le fait que les données de montaison ont été estimées à partir de divers indicateurs, tels que le taux d'exploitation ou les inventaires des nids de frai, notamment en 1993, 1994 et 1996. Depuis 2015, les statistiques de pêche concernent exclusivement le secteur contingenté, jusqu'à la fermeture récente de la pêche.

Sommaire de l'exploitation sportive de 1984 à 2023 de la rivière Ouelle													Optimal: 1,634						
Zone salmonicole: Q3			No. rivière: 02270000			Seuils de conservation (million d'oeufs)			Démographique: 0,499										
Année	Captures sportives			Remise à l'eau	Jours-pêche	Succès (Cap./j-p.)	Succès ajusté	Taux (%) Exploitation			Retrait	Prélèvement	Montaison			Reproducteurs			
	Petit	Grand	Total					Petit	Grand	Total			Mad.	Réd.	Total	Mad.	Réd.	Total	Oeufs déposés (million)
2007	48	6	54	0	234	0,23	0,23				1	55							
2008	75	27	102	0	338	0,30	0,30				0	102							
2009	11	68	79	0	427	0,19	0,19				0	79							
2010	15	4	19	0	229	0,08	0,08				3	22							
2011	30	25	55	15	458	0,12	0,15				0	55							
2012	10	5	15	6	160	0,09	0,13				0	15							
2013	11	18	29	0	316	0,09	0,09				0	29							
2014	12	0	12	5	231	0,05	0,07				0	12							
2015	46	0	46	15	261	0,18	0,23				1	47							
2016	6	0	6	15	228	0,03	0,09				1	7							
2017	0	0	0	3							0	0							
2018	0	0	0	0				0	0	0	0	0	8	17	25	8	17	25	0,10
2019	0	0	0	1	78	0,00	0,01	0	0	0	0	0	5	26	31	5	26	31	0,15
2020													33	16	49	33	16	49	0,11
2021																			
2022																			
2023																			
2018 -2022	0	0	0	0			0,01	0	0	0	0	0	15	20	35	15	20	35	0,12

Remarque : Depuis 2020, fermée à la pêche. Depuis 2015, les statistiques de pêche ne concernent que le secteur contingenté. En 1993, 1994 et 1996, les données de montaison sont estimées à partir du taux d'exploitation. En 1989, 1990 et 1992, les données de montaison sont estimées à partir d'un inventaire des nids de frai.

Les sols du bassin présentent également une diversité notable. Vers l'embouchure, les sols argileux sont fertiles et bien adaptés à l'agriculture, tandis qu'en amont, ils deviennent sablonneux et graveleux, parsemés de roches arrondies (Furois, 2016). On y trouve également des formations de « cabourons », collines de quartzite et de conglomérat calcaire, comme la montagne Thiboutot. Entre Saint-Onésime-d'Ixworth et Tourville, les sols sont constitués de sédiments glaciaires (till) avec un relief irrégulier et des roches angulaires, tandis que plus près de la rivière, ils restent sablonneux et graveleux avec des roches arrondies (Baril, et al., 1965; Furois, 2016). L'érosion et la sédimentation représentent des enjeux majeurs dans le bassin, amplifiés par l'absence de végétation riveraine, l'accumulation de sable et les conditions hydrologiques extrêmes, particulièrement entre Saint-Pacôme et l'embouchure. Le transport sédimentaire, qui varie entre 291 et 13 417 tonnes par jour selon les débits (Groupe SALAR, 1992; Furois, 2016), contribue à la dégradation des habitats aquatiques, notamment par le colmatage des sites de frai, menaçant ainsi la reproduction des saumons. Par exemple, le nombre de fosses à saumon est passé de 51 en 1990 à 19 en 2014 en raison de l'accumulation de sédiments (Thibault et al., 1990; Furois, 2016). L'ensablement du tronçon aval, dû à sa faible pente, est une conséquence directe, tandis que le tronçon amont transporte plus efficacement les sédiments. De plus, la construction de l'autoroute 20 a modifié le tracé de la rivière, entraînant des dépôts sédimentaires nécessitant des dragages réguliers tous les cinq ans (Furois, 2016). Plus en amont, le décrochage des falaises ajoute des colluvions et des sédiments gravitaires aux fosses à saumon, phénomène causé par des mouvements subaériens qui affaiblissent les berges et facilitent l'érosion par mouvements de masse. Cette érosion varie de 5 à 50 mm par mois, dépendant des périodes et de la position sur la berge. Les chutes de blocs, représentant 50 % des mouvements, se produisent principalement en automne et au printemps, lors des cycles de gel-dégel (Hamel, 2012; Furois, 2016).

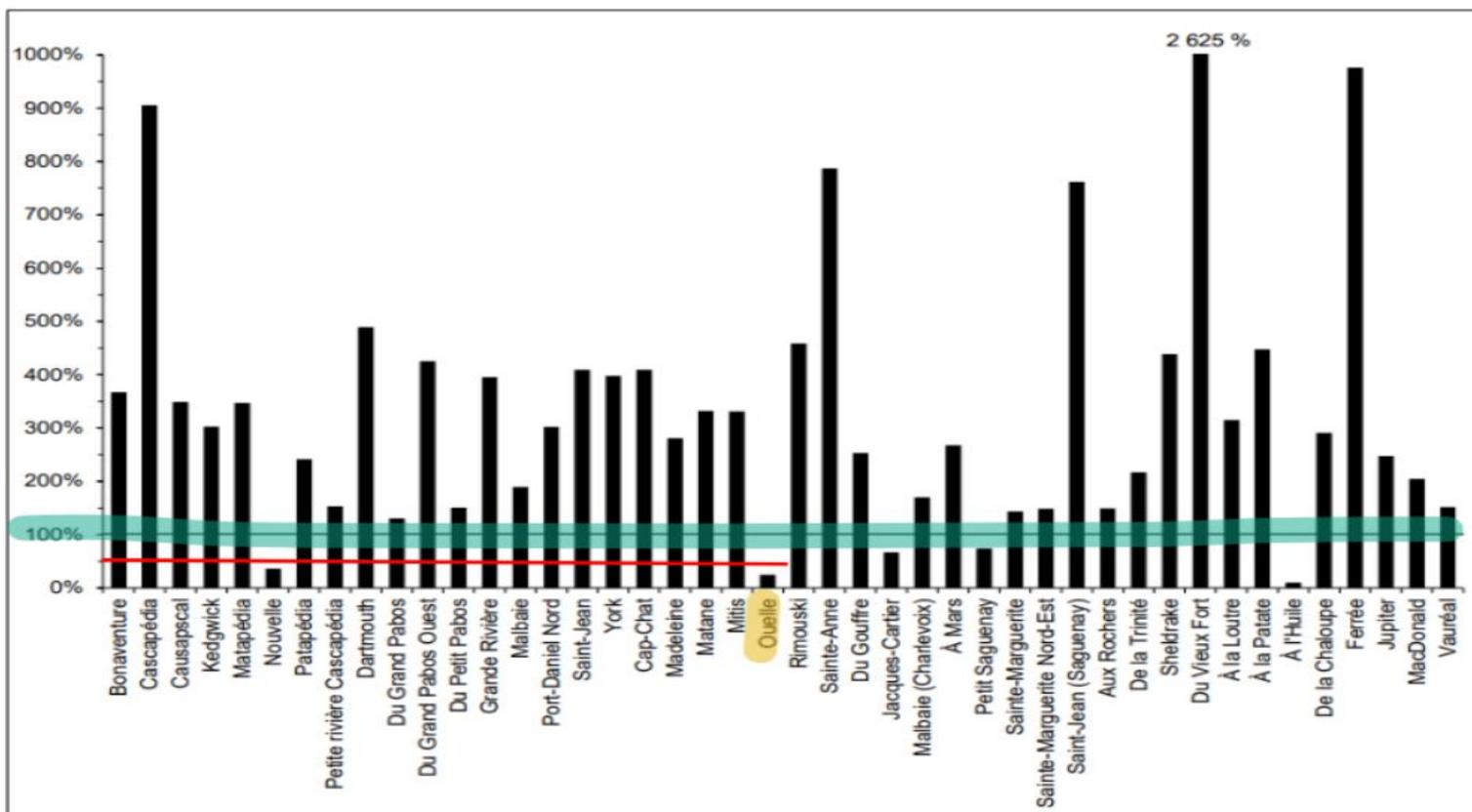
Concernant l'utilisation du sol, 88 % du bassin est couvert de forêt, répartie inégalement entre terres privées et publiques. L'exploitation forestière y est importante, tout comme les activités récréotouristiques, incluant la chasse, la pêche et les loisirs de plein air (MFFP, 2014; Furois, 2016). Le réseau routier en forêt publique constitue également une menace pour la biodiversité en favorisant l'apport de sédiments dans les cours d'eau. Bien que certaines mesures d'aménagement aient été mises en place pour canaliser les eaux de ruissellement, les ponceaux restent une source importante de sédimentation excessive, entraînant le colmatage des lits de graviers essentiels à la

reproduction des salmonidés (Molloy et al., 2001; Furois, 2016). Cette sédimentation nuit à la reproduction des poissons en asphyxiant les œufs ou en empêchant l'émergence des alevins. De plus, certains anciens chemins forestiers, bien que non utilisés, contribuent encore au ruissellement et à l'augmentation des débits (Bérubé et al., 2010; Furois, 2016).

Enfin, la pollution agricole est une cause majeure de dégradation des cours d'eau en milieu rural. Le drainage intensif et l'intensification des cultures ces 50 dernières années aggravent l'érosion et la sédimentation. Les eaux de pluie ruissellent vers les fossés et les cours d'eau, emportant avec elles terre, nutriments et pesticides. Ces substances, comme l'atrazine, perturbent notamment l'olfaction des saumons, compromettant leur retour aux rivières pour frayer (MDDELCC, 2015; Furois, 2016).

En réponse à ces défis, le MFFP a instauré en 2019 l'obligation de remise à l'eau des saumons (Cabinet du ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2019). Face aux périodes prolongées d'étiage et de canicules, la fermeture définitive de la rivière à la pêche est devenue nécessaire cette même année. Cette mesure demeure en vigueur selon les rapports d'exploitation du saumon depuis 2020 (MFFP, 2021). La réglementation de la pêche pour 2024-2026 officialise désormais l'interdiction de la pêche au saumon dans la rivière Ouelle (MELCCFP, 2024a), reflétant à la fois la complexité de la gestion et l'impact des pressions humaines ainsi que des changements climatiques. Ainsi, la population de saumons de la rivière Ouelle est classée « préoccupante » par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) en raison de la dégradation de ses habitats (COSEPAC, 2016; MRC de Kamouraska, 2024). D'ailleurs, la population de saumons de la rivière Ouelle ne parvient pas à atteindre les seuils de conservation, tant démographique qu'optimal, comme le révèle le Plan de gestion du saumon atlantique 2016. Bien que la majorité des rivières atteignent ces seuils, la rivière Ouelle fait partie des cinq rivières qui ne répondent pas aux critères de conservation, n'atteignant que 25 % du seuil requis (Figure 1-5) (MFFP, 2016; MPO, 2023).

Figure 1-5 Atteinte moyenne du seuil de conservation démographique de 2016 à 2019, depuis la mise en œuvre du Plan de gestion du saumon atlantique. L'axe des ordonnées (Y) représente le pourcentage du seuil de conservation atteint, tandis que l'axe des abscisses (X) affiche les différentes rivières. La ligne verte indique l'objectif idéal de 100 % atteint, et les résultats pour la rivière Ouelle sont soulignés en jaune. La ligne rouge marque la limite de 50 %, servant de référence pour évaluer le pourcentage du seuil de conservation atteint par chaque rivière.



1.1.2 Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques

Au fil des dernières années, des scénarios alarmants ont émergé concernant certaines rivières à saumon. Parmi les 114 rivières à saumon du Québec (**Error! Reference source not found.**), certaines sont jugées plus vulnérables en raison de leur exposition aux changements climatiques et aux pressions anthropiques (April et al., 2023). Ces deux facteurs principaux ont des effets dévastateurs sur l'habitat d'eau douce, entraînant de nombreuses conséquences. D'une part, les activités humaines telles que l'urbanisation, l'industrie forestière et l'agriculture exercent une pression considérable sur l'habitat du saumon, sans oublier l'impact du braconnage (Parcs Canada, 2022). Cependant, le stress thermique demeure la principale menace pour le saumon, exacerbé par les périodes d'étiage, tous deux amplifiés par les changements climatiques (Figure 1-7) (Heggenes et al., 1993)

Figure 1-6 Carte des 114 rivières désignées comme rivières à saumon au Québec, réparties en 11 zones salmonicoles (Q1 à Q11). Les zones Q1 à Q4 se trouvent au sud du fleuve Saint-Laurent, tandis que les zones Q5 à Q9 occupent la rive nord. L'île d'Anticosti correspond à la zone Q10, et la région de l'Ungava constitue la zone Q11. À noter, la zone Q4 (région des Appalaches) ne compte aucune rivière à saumon (MELCCFP, 2024a).

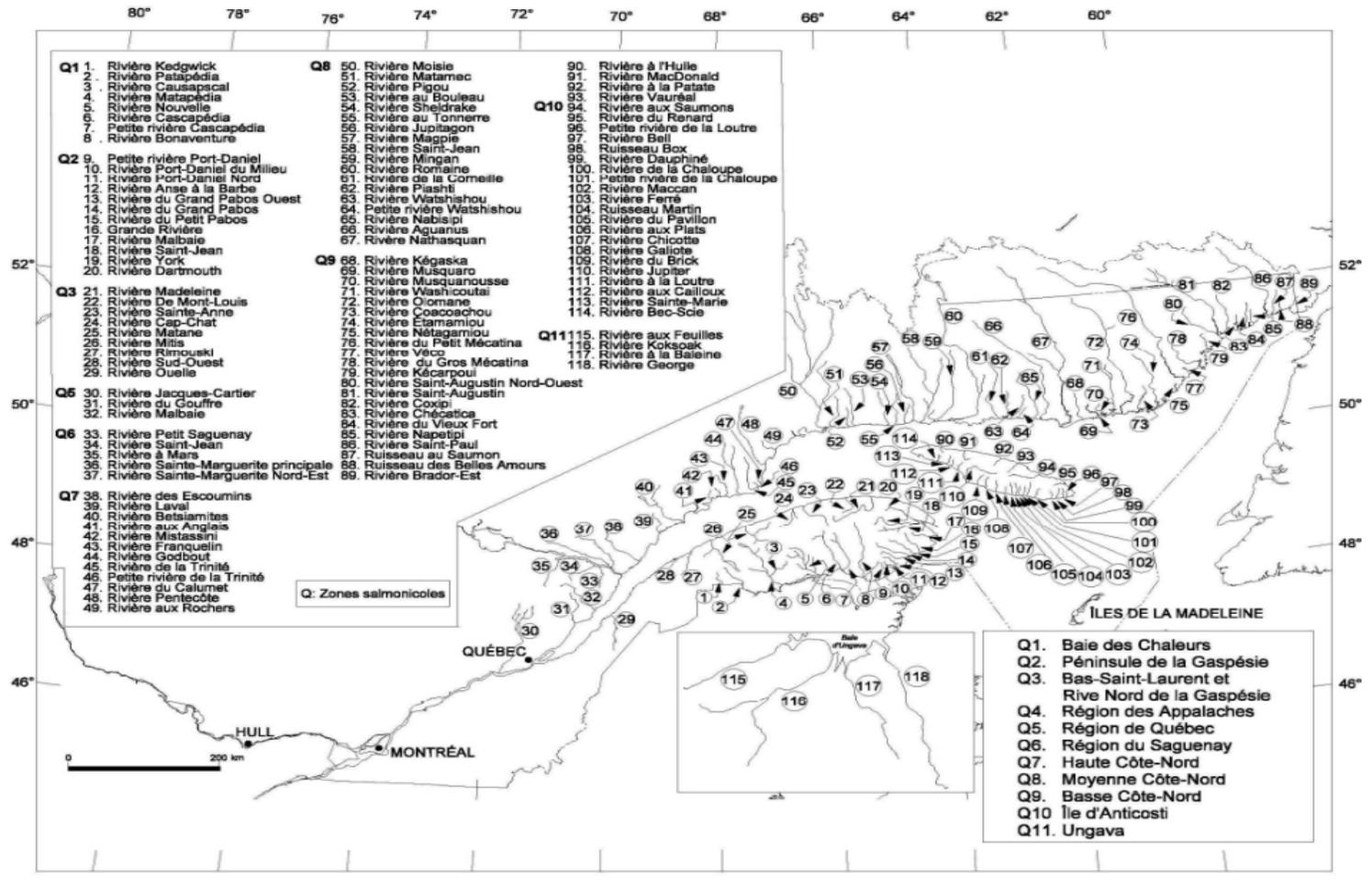
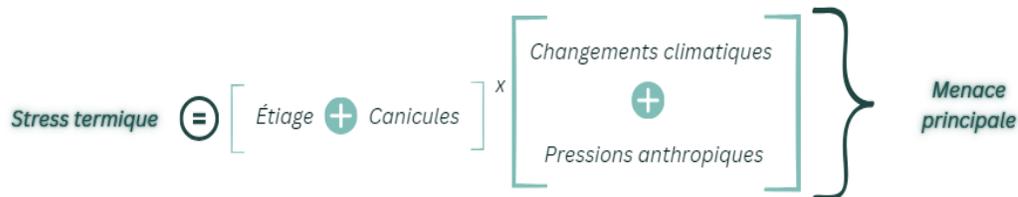


Figure 1-7 La figure illustre une équation synthétisant les principaux défis et menaces affectant les populations de saumons. Elle met en évidence que le stress thermique, principal facteur de menace, résulte de la combinaison de l'étiage et des canicules, des phénomènes amplifiés par les changements climatiques et les pressions anthropiques. Cette dynamique souligne l'impact cumulatif de ces facteurs, montrant que le stress thermique peut, à terme, compromettre la survie des populations de saumons, voire entraîner leur disparition (Heggenes et al., 1993; FQSA-DGR, 2012).



Les menaces énumérées ont conduit à l'anéantissement des populations de saumons dans certaines rivières, notamment celles situées dans le Québec méridional en raison de leur proximité avec les villes (COSEPAC, 2011). Ce scénario catastrophique souligne l'urgence de mettre en place des mesures préventives et un suivi rigoureux de l'état des bassins versants (COSEPAC, 2011). La rivière Ouelle est un exemple pertinent : sa proximité avec les centres urbains exerce une pression énorme sur l'habitat, entraînant une perte significative de celui-ci (COSEPAC, 2011). Il est essentiel de signaler qu'elle est considérée comme l'une des rivières à saumon les plus chaudes du Canada (Jeong et al., 2012; Dugdale et al., 2013). Selon Gendron (2013), c'est l'une des rivières les plus affectées par le stress thermique dans la région du Bas-Saint-Laurent, et illustre l'impact des fluctuations de température sur la vie aquatique.

En 2013, la rivière Ouelle a été étudiée pour analyser la variabilité temporelle des RT et les patrons de température de l'eau (Dugdale et al., 2013). Cette étude avait deux objectifs principaux : évaluer l'impact de la variabilité temporelle sur l'abondance des RT et déterminer si les conditions hydrométéorologiques expliquent cette variabilité ; et examiner comment la structure du profil de température longitudinale d'une rivière évolue dans le temps, en comprenant le rôle des conditions hydrométéorologiques et hydromorphologiques (Dugdale et al., 2013). Les acteurs de l'eau du territoire de la rivière Ouelle, comme l'OBAKIR, ont également contribué à la caractérisation des microbassins pour mieux comprendre le contexte des RT (Furois, 2016; Furois, 2018).

Dans ce contexte, les chercheurs ont souligné les difficultés rencontrées pour étudier les RT, notamment en raison de l'accessibilité limitée et du coût élevé des méthodes disponibles, comme les images infrarouges (TIR) (Dugdale et al., 2013). En 2013, les températures journalières de la rivière Ouelle avaient déjà tendance à dépasser les 22 °C, avec une moyenne proche ou supérieure à 28 °C pendant les étés de 2009 à 2012. Cette tendance se maintient aujourd'hui, où la moyenne des températures journalières entre 2020 et 2023 dépasse encore la température acceptable de 20-23 °C pour le saumon (Environnement et Ressources Naturelles, 2024).

Additionnellement, l'étude a permis d'identifier une série de RT le long de la rivière Ouelle et de son affluent principal, la Grande Rivière, à l'aide des TIR, avec un total de 166 RT sur la rivière Ouelle et 87 RT sur la Grande Rivière (Dugdale et al., 2013). Elle met en évidence le rôle crucial de la variation spatio-temporelle dans la disponibilité et la distribution de ces refuges, essentiels à la survie du saumon (Dugdale et al., 2013). Cependant, il est précisé que ces RT ne sont pas toujours disponibles selon leur source. Par exemple, les tributaires d'eau froide offrent des RT plus stables et accessibles que ceux alimentés par des eaux souterraines, dont la disponibilité dépend des précipitations et des recharges des aquifères (Dugdale et al., 2013). L'étude révèle aussi que les pressions anthropiques, telles que les champs agricoles et l'absence de bandes riveraines, ont un impact significatif sur le réchauffement du cours d'eau principal (Dugdale et al., 2013). Les résultats mettent en évidence l'influence directe des facteurs physiques liés aux conditions hydromorphologiques, hydrométéorologiques et à l'utilisation du sol sur la fluctuation thermique de l'eau. Ils soulignent également l'importance d'une meilleure compréhension de la dynamique du bassin versant afin d'identifier les refuges thermiques (RT) et d'analyser les mécanismes régissant leur disponibilité, leur variabilité et leur pérennité.

Face à ces défis, le Plan stratégique de développement durable de la pêche au saumon atlantique de 2016 a minutieusement documenté la situation de la rivière Ouelle (Furois, 2016). Ce plan visait à être un outil d'orientation et de planification, en offrant un portrait détaillé de la situation (Furois, 2018). Il met également en évidence la diminution des populations de saumon dans la rivière Ouelle, principalement attribuable à cinq facteurs anthropiques majeurs : la pollution issue des activités agricoles, les coupes à blanc, la construction de barrages, les pratiques de drave et le braconnage (Thibault et al., 1990; Furois, 2016). Les changements climatiques, combinés à

l'élévation de la température de l'eau et à une exposition prolongée du saumon à ces conditions, ont entraîné des taux de mortalité élevés (Thibault et al., 1990; Furois, 2016).

Face à ces événements, la seule possibilité de survie pour le saumon dans un contexte d'eau chaude réside dans les RT (Furois, 2016). Conformément au Plan de conservation Ouelle de 2016 par l'OBAKIR, le déficit de connaissances concernant les RT, ainsi que leur protection limitée ou absente, représente un problème majeur (Furois, 2016). Les chercheurs soulignent donc l'importance de poursuivre les recherches scientifiques sur les RT, notamment à l'aide des thermographes (Furois, 2016). Ces refuges restent encore méconnus et dépourvus de mesures de protection dans le contexte de la rivière Ouelle (Furois, 2016). D'ailleurs, un suivi biologique des RT a été effectué par l'OBAKIR à la suite de la publication du Plan de conservation en utilisant les RT géolocalisés par Dugdale et al. en 2013 pour évaluer leur utilisation par les tacons et les saumons reproducteurs (Furois, 2018). En été 2017, des thermographes ont été installés dans des refuges sélectionnés pour mesurer la température et vérifier leur efficacité (Furois, 2018). Une attention particulière a été accordée à la caractérisation de l'utilisation du sol des microbassins pour mieux comprendre la dynamique des RT (Furois, 2018). Cette initiative souligne également l'importance de poursuivre les efforts de cartographie et de caractérisation des bassins versants et sous-bassins afin d'assurer la présence des RT, tout en restaurant les sites surexploités.

Cependant, ces études ont souvent été confrontées à des difficultés d'accès aux données en raison de contraintes financières, de l'accessibilité des données ou de l'acquisition de celles-ci. Par exemple, certaines sources d'imagerie satellitaire gratuites, comme Landsat 8, disposent de capteurs infrarouges, tels que l'Operational Land Imager (OLI) et le Thermal Infrared Sensor (TIRS) (NASA, 2012). Plus précisément, Landsat 8 inclut deux bandes thermiques infrarouges (Bandes 10 et 11) utilisées pour mesurer la température de surface (NASA, 2012). La résolution spatiale des bandes thermiques, fixées à 100 m x 100 m, constitue une limite significative pour une analyse précise des cours d'eau, même après rééchantillonnage. Cette contrainte est particulièrement problématique pour les rivières plus petites, dont la largeur est souvent bien inférieure à cette résolution (Linnaansaari, et al., 2023). Par exemple, la rivière Ouelle, avec une largeur moyenne de 54 mètres, est largement sous-dimensionnée par rapport à la taille d'un pixel, rendant cette résolution inadéquate pour représenter fidèlement les détails et la variabilité thermique.

De plus, bien que des satellites comme Landsat 8, équipés de deux bandes thermiques, fournissent des données continues sur de larges portions de cours d'eau, ces avantages spatiaux se traduisent par une résolution temporelle limitée, avec un temps de revisite d'environ 16 jours (Handcock, et al., 2012; Roy, et al., 2014; Linnaansaari, et al., 2023). Ces images sont utiles pour les grandes rivières, mais elles ne permettent pas de capturer la fine hétérogénéité qui caractérise les refuges thermiques dans les petits cours d'eau, souvent masqués par la végétation riveraine (Torgerssen, et al., 1999; Linnaansaari, et al., 2023). Par conséquent, cette approche reste insuffisante pour cartographier avec précision les microrefuges thermiques, essentiels à une compréhension fine des interactions hydrologiques et écologiques (Linnaansaari, et al., 2023). Cela entraînerait un niveau d'erreur et d'incertitude trop élevé pour des analyses détaillées.

D'autre part, il est essentiel de prendre en compte les études utilisant des techniques statistiques avancées pour analyser les phénomènes écologiques. Par exemple, des recherches appliquant des modèles, tel que le Modèle Additif Généralisé (GAM) et le Modèle de Régression Multivariée par Splines Adaptatifs (MARS) permettent d'estimer la répartition des RT dans les rivières (Saadi, 2020). D'autre part, les avancées en instrumentation thermographique facilitent le suivi en temps réel des conditions thermiques des rivières, enrichissant les capacités de modélisation des régimes thermiques et des écosystèmes lotiques (Guillemette, 2009). Une approche alternative est l'utilisation de modèles géostatistiques dans un espace mathématique bidimensionnel, construit à l'aide d'outils multivariés, tels que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'Analyse Canonique des Corrélations (ACC), qui intègrent des variables physiographiques spécifiques aux bassins versants (Guillemette, 2009). Ces modèles permettent de caractériser la distribution spatiale des variables thermiques à différentes échelles et d'améliorer la gestion des ressources hydriques (Guillemette, 2009). L'intégration de ces approches statistiques avancées aide à mieux identifier les zones potentielles de RT et à élaborer des stratégies de gestion et de conservation plus efficaces des écosystèmes aquatiques (Saadi, 2020; Guillemette, 2009). Cependant, ce sont les modèles de température de l'eau qui se divisent en trois catégories : régressifs, stochastiques et déterministes. Les modèles déterministes, utilisant un bilan énergétique, prédisent la température de l'eau, tandis que les modèles régressifs et stochastiques se basent sur des relations entre la température de l'air et de l'eau (Caissie, 2006). Cependant, la température des rivières, un facteur clé influençant les écosystèmes, devrait augmenter en raison des changements climatiques, ce qui affectera la qualité

de l'eau. Comprendre les facteurs de variabilité de cette température est crucial pour les stratégies d'adaptation. Les données historiques de température des rivières sont souvent difficiles d'accès ou limitées en termes de séries temporelles. Par conséquent, on privilégie de plus en plus les modèles basés sur les processus, qui simulent les échanges d'énergie et d'eau, offrant ainsi une meilleure compréhension des dynamiques de température. Bien que ces modèles soient plus complexes que les approches statistiques, ils sont plus efficaces pour étudier les effets des changements climatiques et des modifications de l'usage des sols (Dugdale, et al., 2017).

D'autres études intéressantes ont tenté de proposer des méthodes d'analyse spatiale et en SIG pour identifier des RT ou des ZRf. Elles cherchent également à répondre à ce besoin d'accessibilité en développant des méthodes à faible coût et en utilisant des données ouvertes. Un bel exemple est l'étude d'O'Sullivan et al. (2019a), où les chercheurs ont comparé les images thermiques infrarouges (TIR) à l'imagerie satellite hivernale pour identifier des résurgences d'eaux souterraines. L'étude souligne que les eaux souterraines peuvent jouer un rôle crucial dans la régulation des régimes thermiques des cours d'eau dans les régions froides et tempérées, ce qui est essentiel pour les habitats aquatiques (O'Sullivan, et al., 2019a). Les eaux souterraines maintiennent généralement une température constante, plus chaude que l'eau de surface en hiver et plus fraîche en été (O'Sullivan, et al., 2019a). En exploitant ces schémas thermiques, les chercheurs ont utilisé une classification de vraisemblance maximale supervisée (sMLC) pour identifier les apports d'eaux souterraines le long d'une rivière gelée en utilisant des données satellitaires disponibles au public (O'Sullivan, et al., 2019a). Ils ont comparé ces résultats aux données TIR aéroporté et ont constaté qu'il n'y avait pas de différence statistique significative, confirmant ainsi que les apports d'eaux souterraines peuvent être délimités à l'aide d'images satellites du système gelé (O'Sullivan, et al., 2019a). Cependant, un problème courant est la rareté de l'imagerie satellite gratuite en hiver avec une bonne résolution. Par ailleurs, cette méthode ne concerne que les refuges thermiques provenant des eaux souterraines.

1.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Ce travail de recherche se penche sur la problématique critique qui touche les rivières à saumon, notamment chez la rivière Ouelle, qui est confrontée aux impacts des changements climatiques et les pressions anthropiques. La dégradation continue de l'habitat du saumon atlantique et l'augmentation des températures de l'eau soulignent l'urgence de poursuivre les efforts de caractérisation des bassins versants de ces rivières afin de trouver des solutions adaptées pour préserver cette espèce en péril. En réponse à ces enjeux, cette étude explore les mécanismes qui contribuent au régime thermique de la rivière, et à la stabilité spatio-temporelle des zones de refroidissement (ZRf) et des refuges thermiques (RT). Les objectifs de recherche visent à cartographier et identifier les zones potentielles de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRC) par l'agrégation des facteurs physiques exerçant un effet sur la température de l'eau.

1.2.1 Présentation de la problématique

Dans ce contexte, le bassin versant de la rivière Ouelle est confronté à des défis environnementaux majeurs qui menacent la santé de son écosystème, en particulier les populations de saumon atlantique. L'interaction entre les changements climatiques et les pressions anthropiques a entraîné une élévation des températures de l'eau et une accentuation des périodes d'étiage, accentuant le stress thermique des saumons. Par ailleurs, l'érosion, l'apport de sédiments et la pollution liée aux activités agricoles dégradent l'habitat aquatique, limitant les zones de frai et augmentant la mortalité des poissons.

Les progrès technologiques géospatiales, notamment dans les SIG et les nouveaux outils en géomatique, jouent un rôle clé dans l'analyse des régimes thermiques des cours d'eau, la caractérisation des bassins versants et l'étude des habitats du saumon. Des données telles que le LiDAR, l'imagerie thermique (TIR) et des méthodes statistiques avancées, comme la régression PLS et les modèles de réseaux fluviaux, permettent de traiter des données complexes à différentes échelles. Ces innovations favorisent une meilleure compréhension des interactions entre les régimes thermiques des rivières et les écosystèmes, tout en améliorant l'analyse des relations entre les variables paysagères, à l'échelle locale et régionale (Petty et al., 2014; Steel et al., 2017; Hrachowitz et al., 2010; Monk et al., 2013; O'Sullivan et al., 2019b).

Ainsi, les refuges thermiques (RT) le long de la rivière Ouelle représentent des solutions cruciales pour la survie des saumons (Jeong et al., 2012; Dugdale et al., 2013), mais ces RT restent encore largement méconnus et insuffisamment protégés. Il convient de noter que les zones de refroidissement ne sont pas nécessairement des RT, bien qu'elles puissent contribuer au maintien de températures favorables. Malgré ces défis, les RT pourraient jouer un rôle clé dans le maintien de la population de saumons en danger dans cette rivière (Jeong et al., 2012; Dugdale et al., 2013). Il est donc essentiel de poursuivre les efforts de caractérisation des bassins versants des rivières à saumon, ainsi que de renforcer les actions de conservation et de restauration des sites critiques ou endommagés (Sullivan et al., 2021). La disponibilité des données, le contexte unique de la rivière Ouelle et les nombreuses études déjà réalisées sur cet environnement font de ce bassin versant un site idéal pour évaluer si la cartographie et l'analyse des interactions entre différents facteurs physiques permettent d'identifier les zones potentielles de refroidissement et de réchauffement. Ces approches combinent les méthodes géomatiques et l'analyse spatiale afin de préserver l'habitat aquatique en exploitant les avancées récentes en technologies géospatiales.

1.2.2 Présentation de la question de recherche

Comment l'analyse spatiale par systèmes d'information géographique (SIG), en mettant en relation et en agrégeant des facteurs physiques environnementaux, permet-elle de représenter spatialement leur dynamique complexe, de cartographier les zones de refroidissement (ZRF) dans la rivière Ouelle et d'identifier des zones critiques pour les refuges thermiques afin d'orienter les actions de conservation ?

1.2.3 Présentation des objectifs de recherche

L'objectif principal est de développer une méthodologie utilisant un système d'information géographique (SIG) pour cartographier et identifier les confluences des facteurs physiques influençant la thermie de l'eau, afin de déterminer les zones potentielles de refroidissement et de réchauffement dans le cours d'eau principal, ainsi que de proposer une approche pour orienter les efforts de conservation et de surveillance thermique. Face aux défis posés par les pressions

anthropiques, les changements climatiques et les contraintes liées aux coûts et à l'accès aux données, cette méthodologie pourrait orienter les efforts de conservation et de restauration des écosystèmes forestiers et riverains, tout en soutenant les initiatives visant à mieux protéger le saumon atlantique dans son habitat d'eau douce. De plus, elle servirait à guider le déploiement stratégique des thermographes pour suivre les refuges thermiques.

Il convient de souligner que ce mémoire ne cherche pas à localiser précisément les refuges thermiques, mais plutôt à cartographier les zones où se combinent les facteurs physiques influençant la température de l'eau. Cette approche permet d'identifier des secteurs présentant un potentiel de refroidissement ou de réchauffement, pouvant ainsi servir d'indicateurs pour la présence de refuges thermiques. L'objectif n'est pas d'analyser en détail comment ces facteurs modifient la thermie, car cela a été largement traité dans d'autres études. Ce mémoire propose une approche d'analyse spatiale accessible et reproductible, en utilisant des données ouvertes et des logiciels SIG. Bien que ce travail soit réalisé avec ArcGIS, il peut être entièrement reproduit avec des logiciels gratuits tels que QGIS. Cette approche pourrait aussi orienter le déploiement de thermographes pour les gestionnaires de l'eau. Plutôt que de localiser précisément un refuge thermique, l'objectif est d'identifier des secteurs propices à leur présence et à leur stabilité (zones de refroidissement), ainsi que de repérer les zones nécessitant des interventions de restauration pour réduire les impacts négatifs (zones de réchauffement).

1.2.3.1 Présentation de la question de recherche

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthode SIG permettant de cartographier et d'identifier les zones potentielles de refroidissement et de réchauffement dans la rivière Ouelle, en modélisant et en agrégeant les facteurs physiques exerçant un effet sur la température de l'eau. Le résultat attendu est une représentation spatiale du potentiel de refroidissement sur le cours d'eau.

Objectif 1 : Développer une méthode d'identification des zones de refroidissement dans la rivière Ouelle

- **Sous-objectif 1.1 :** Développer des modèles pour représenter chaque variable environnementale contribuant aux processus de refroidissement de l'eau, en identifiant et en quantifiant les indicateurs pertinents.
- **Sous-objectif 1.2 :** Agréger tous les indicateurs modélisés afin de produire la représentation spatiale du potentiel de refroidissement du cours d'eau.

Objectif 2 : Cartographier et valider les zones potentielles de refroidissement et de réchauffement

- **Sous-objectif 2.1 :** Identifier et cartographier les zones de refroidissement et de réchauffement en fonction de leur importance selon une approche d'Analyse Multi-Critères (AMC).
- **Sous-objectif 2.2 :** Vérifier la fiabilité de la cartographie en comparant les zones identifiées avec des refuges thermiques préalablement géolocalisés.
- **Sous-objectif 2.3 :** Effectuer une validation terrain des zones de refroidissement et de réchauffement afin d'évaluer la précision et la pertinence des résultats obtenus.

Ce mémoire vise à développer une méthode accessible, reproductible et applicable à d'autres bassins versants, en s'appuyant sur des données ouvertes pour faciliter son déploiement à grande échelle. L'objectif est de fournir des outils concrets permettant d'améliorer la gestion et la conservation des écosystèmes aquatiques, tout en tenant compte des défis posés par les changements climatiques et les pressions anthropiques. Linnansaari et al. (2023) soulignent l'importance pour la gestion des pêches d'identifier et protéger les refuges thermiques existants, d'adopter des mesures adaptées pour préserver les populations de salmonidés et de collaborer avec les usagers du territoire afin de minimiser les impacts des épisodes de températures élevées sur ces populations vulnérables.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie développée pour l'identification et la cartographie des zones potentielles de refroidissement (ZRF) et de réchauffement (ZRC) dans le cadre de cette recherche. La première section consiste en la définition de la zone d'étude et en la justification du secteur modélisé, choisie en fonction de la densité des données disponibles et de leur pertinence pour la modélisation. Ensuite, nous décrivons en détail la méthodologie adoptée, centrée sur l'approche d'analyse multicritères pondérée (AMCp). Cette approche permet de combiner plusieurs facteurs influençant la température des cours d'eau de manière structurée et rigoureuse. Nous introduisons par la suite les six facteurs physiques retenus pour cette analyse, en explicitant les variables associées. Pour chaque variable, nous avons identifié des indicateurs qui ont été sélectionnés en fonction de sa représentativité spatiale dans les systèmes d'information géographique (SIG) ainsi que de leur influence sur la dynamique thermique des eaux de surface (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Synthèse des six facteurs physiques identifiés, avec leurs variables et indicateurs associés.

Type de facteur physique	Variabes par facteur physique	Indicateurs
Hydrographique	Tributaires froids et plumes de confluence	Anneaux de distance des plumes de confluence (multiple ring buffers)
	Potentiel d'accumulation d'eau	Indice d'humidité topographique / Topographic Wetness Index (TWI)
	Milieus humides *	
Hydrogéologique	Résurgences d'eau souterraine	Carte piézométrique Carte de l'élévation du substrat rocheux
	Types de dépôts meubles (hydrofaciès)	Réinterprétation des dépôts meubles
Géologique	Épaisseur des dépôts meubles	Carte isopaque : épaisseur des sédiments
	Gradient de pente du cours d'eau	Méthode de calcul du gradient de pente du cours d'eau (représentation surfacique)
Géomorphologique	Orientation de la pente *	N/A
	Réflectance de chlorophylle de la végétation	Indice de végétation par différence normalisée / Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
Forestier	Densité de la couverture forestière	Indice de densité de la couverture forestière / Forest Canopy Density Index (FCD)
	Ombre riverain	Ombre de canopée sur le cours d'eau par heure
Atmosphérique	Insolation solaire surfacique	Rayonnement solaire zonal / Area solar radiation (outil)

*Ces facteurs ne font pas l'objet d'une couche distincte, car ils ont été intégrés à la modélisation d'autres variables et indicateurs

Les sources de données ouvertes exploitées pour la modélisation seront décrites en détail, de même que les méthodes de traitement appliquées via ArcGIS Pro afin de produire les couches spatiales nécessaires à l'AMCp. L'ensemble du processus a été conçu dans une optique de reproductibilité, en s'appuyant exclusivement sur des données ouvertes, de manière à développer une méthodologie transférable à d'autres contextes. Nous justifions par la suite la pondération attribuée à chaque facteur et variable en fonction de leur influence sur la température de l'eau. L'agrégation des résultats a été réalisée à l'aide d'une calculatrice matricielle, dont la formule est explicitée afin d'illustrer le mode de combinaison des différentes couches spatiales. Enfin, les sections suivantes approfondissent les caractéristiques des facteurs pris en compte, les variables qui leur sont associées, ainsi que les techniques de modélisation employées pour répondre aux objectifs de cette recherche. L'ensemble de cette démarche vise à établir un cadre méthodologique répliquable, permettant son application dans divers territoires en s'appuyant uniquement sur des données ouvertes et des outils accessibles.

2.1 ZONE D'ÉTUDE

2.1.1 Justification du secteur modélisé

Bien que l'analyse ait initialement été envisagée à l'échelle du bassin versant, il a été nécessaire de restreindre la zone d'étude à un secteur plus spécifique. Cette décision découle de la distribution inégale des données à l'échelle du bassin, ainsi que du souci de minimiser les erreurs de modélisation. En concentrant l'analyse sur une zone où les données disponibles sont plus denses et de meilleure qualité, il est possible d'assurer une modélisation plus précise et de réduire les incertitudes, rendant ainsi les résultats plus robustes.

Dans cette perspective, une preuve de concept a été réalisée afin d'évaluer la validité de la méthodologie développée dans ce mémoire. Celle-ci permet de tester un cadre méthodologique et un outil en conditions réelles, mais sur un périmètre restreint. Cette approche vise à vérifier l'applicabilité et la robustesse de la méthodologie avant son déploiement à plus grande échelle, tout en démontrant sa faisabilité et sa pertinence avant une éventuelle généralisation à d'autres contextes. Ce cadre restreint permet de tester et d'affiner l'approche avant une éventuelle application à une échelle plus large. De plus, certaines données clés ont joué un rôle déterminant

dans la délimitation de la zone d'étude, notamment en raison de leur représentativité et de leur pertinence pour l'analyse thermique des cours d'eau.

Le premier jeu de données concerne la distribution des refuges thermiques (RT), identifiés en 2013 par Bergeron et al. Comme mentionné précédemment, un total de 284 RT a été géolocalisé, dont 166 sur la rivière Ouelle. Nous avons identifié environ 116 refuges présentant une distribution continue, qui s'aligne parfaitement avec celle des autres données abondantes dans la même section du bassin versant. Ces données sont cruciales pour valider les résultats, mais en raison de leur nature sensible, leur localisation exacte ne peut être révélée (Figure 2-1). Ensuite, la présence et la disponibilité des thermographes déployés dans le cours d'eau permettent de suivre la température de manière continue, disponibles dans la base de données de RivTemp (RivTemp, 2024). Comme l'illustre la Figure 2-2, les thermographes sont répartis de manière inégale dans le cours d'eau, chaque appareil ayant une série de collecte de données distincte. Certains thermographes ont collecté des informations pendant une année, tandis que d'autres ont assuré un suivi pendant une période pouvant aller jusqu'à 15 ans (RivTemp, 2024a).

Enfin, l'abondance et la couverture homogène des données de forages issues du Système d'Information hydrogéologique (SIH) dans cette région constituent un atout décisif en préparation au traitement de données. Contrairement aux autres secteurs du bassin versant, cette zone bénéficie d'une répartition plus uniforme de ces données, ce qui permet de réduire les incertitudes dans la modélisation des facteurs physiques, hydrogéologiques et géologiques (Figure 2-2). Finalement, parmi les facteurs ayant influencé la décision, figure la diversité de l'affectation du sol, incluant des terres agricoles et des espaces peu perturbés, ainsi que le fait que ce site correspond aux fosses identifiées utilisées pour la pêche par le passé. En somme, la disponibilité et la répartition des données dans cette zone permettent de valider le modèle, d'assurer une analyse plus précise et de minimiser les incertitudes.

Figure 2-1 Carte représentant les refuges thermiques (RT) géolocalisés sur la rivière Ouelle et son principal tributaire, la Grande Rivière (Bergeron et al., 2013). Les RT sont présentés sous forme d'agrégats pour respecter la sensibilité des données. Leur répartition se divise en trois sections : 28 RT à l'embouchure de la rivière (agrégat gris), 116 RT dans la zone d'étude (agrégat turquoise, délimité par le polygone orange), et 140 RT en amont de cette zone (agrégat gris), répartis entre la rivière Ouelle et son principal tributaire.

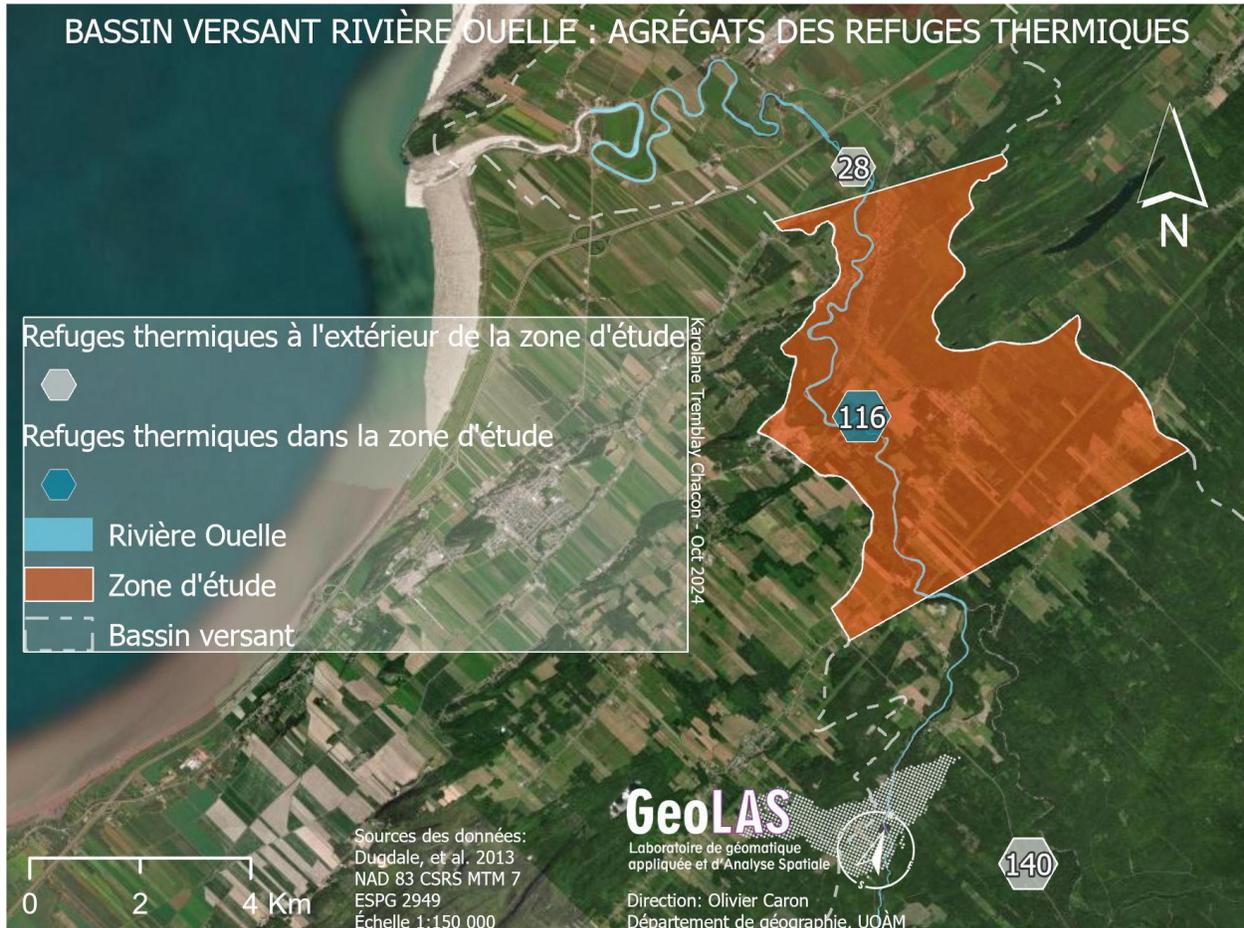
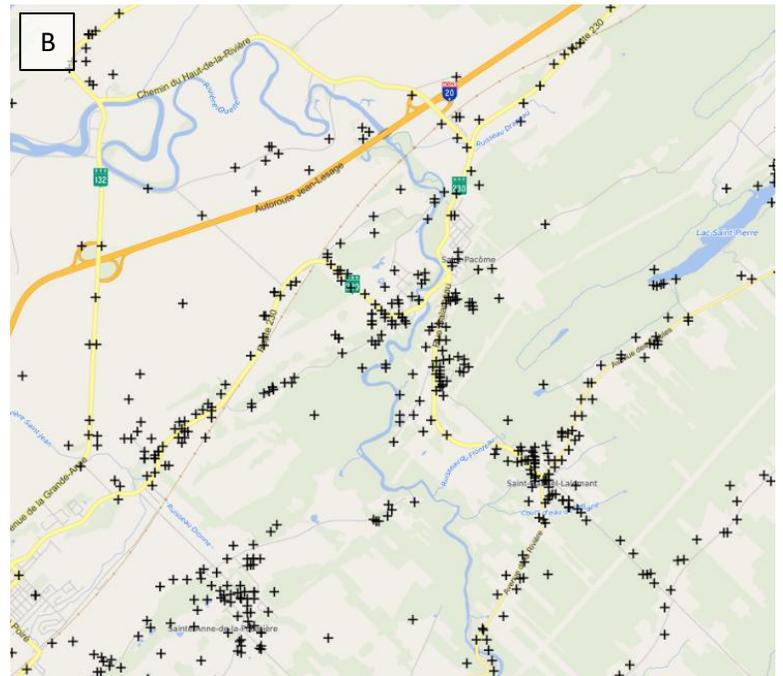
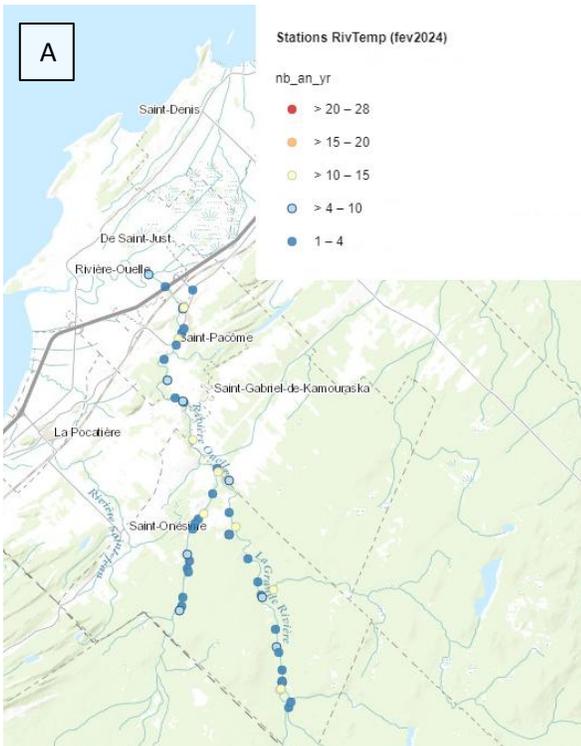


Figure 2-2 Captures d'écran : Image (A) : Cartographie de la localisation des thermographes sur le site RivTemp : on retrouve 49 thermographes déployés sur la rivière Ouelle (RivTemp, 2024) et leurs séries temporelles de collecte des données. La légende indique la durée de collecte pour chaque thermographe. Dans ce bassin, la majorité des thermographes ont une série temporelle de 1 à 4 ans, tandis que les séries les plus longues couvrent une période de 10 à 15 ans; Image (B) : Cartographie de la localisation des forages : on retrouve 1223 forages (représentés par des croix) dans le bassin versant de la rivière Ouelle (SIH, 2024). On note une faible présence de forages à l'embouchure du cours d'eau, tandis que la majorité est concentrée à l'amont du bassin. Par ailleurs, la répartition des forages est très inégale sur le territoire.



2.1.2 Caractéristiques spécifiques du secteur

La délimitation de cette zone a été ajustée en fonction de la répartition inégale des données au sein du bassin versant, certaines zones étant moins couvertes par les relevés nécessaires à l'analyse. De plus, la zone modélisée inclut des résurgences d'eaux souterraines, des confluences de tributaires d'eau froide, et des forêts riveraines, éléments clés dans la régulation thermique du cours d'eau. La présence de ces éléments permet de valider les hypothèses de l'AMC, tout en assurant une représentativité des conditions locales dans les résultats. La zone d'étude débute 0,75 km après la confluence entre la rivière Ouelle et la Grande Rivière, qui est le principal tributaire d'eau froide (Bergeron et al., 2020). Elle est située à environ 10 km de l'embouchure en ligne droite, bien que la distance réelle du cours d'eau, en suivant les méandres, soit plus longue. Elle se trouve à la hauteur des municipalités de Saint-Pacôme et Saint-Gabriel-Lalemant, couvrant une superficie totale de 30 km² (Figure 2-3).

Figure 2-3 Localisation de la zone d'étude (polygone orange) et de la rivière Ouelle, située entre les municipalités de Saint-Pacôme et de Saint-Gabriel-Lalemant, à proximité de la municipalité Rivière-Ouelle. La délimitation de la zone d'étude a été tracée à partir du polygone du bassin versant. Le découpage des limites amont et aval a ensuite été réalisé en fonction de la répartition des données sur le territoire, notamment celle des forages disponibles dans le Système d'information hydrogéologique (SIH).



La rivière Ouelle est située dans la province géologique des Appalaches, au sein d'une formation d'âge Cambro-Ordovicien, très déformé et qui est bien exposé le long de la rive sud du Saint-Laurent (Bourque, 2010). Son réseau hydrographique présente une variabilité régionale marquée : en amont, dans les hautes terres appalachiennes, il adopte une configuration en treillis, caractéristique des environnements montagneux, tandis qu'en aval, dans la basse plaine côtière, il devient dendritique (Bourque, 2010; Bérubé et al., 2021). Cette différenciation résulte de multiples phases géologiques survenues au cours du Wisconsinien et lors de l'Holocène.

La période entre 12 000 et 10 000 ans se caractérise par l'envahissement de la région par la transgression postglaciaire. Ensuite, entre 9 000 et 8 000 ans, le niveau marin s'est stabilisé à un niveau proche de celui actuel. Entre 8 000 et 6 000 ans, une période de régression marine a eu lieu, suivie d'une remontée progressive du niveau marin entre 6 000 et 4 000 ans. Une transgression significative, appelée Transgression laurentienne, s'est produite entre 4 000 et 3 000 ans. Après 3 000 ans, un soulèvement isostatique a provoqué des fluctuations mineures du relief, particulièrement entre 2 000 et 1 000 ans, (Dionne et al., 2001; Bélanger, 1983; Dionne, 2002).

Dans ce contexte, la transgression postglaciaire de la mer de Goldthwait a partiellement inondé la partie aval de la rivière Ouelle à la suite du retrait de l'inlandsis il y a environ 14 000 ans. Ce processus s'est déroulé en trois phases. La première, dite glaciomarine, a été marquée par des transgressions et régressions rapides, accompagnées des premiers signes de soulèvement isostatique. Puis, lors de la deuxième phase, le poids de la glace a causé un affaissement de la lithosphère, submergeant les côtes du Saint-Laurent. Cette phase se distingue par une transgression suivie d'une régression plus marquée, avec un soulèvement isostatique prononcé. Enfin, la troisième phase, qui dure encore aujourd'hui, a vu le retrait de la masse glaciaire et un soulèvement isostatique plus graduel. Elle est caractérisée par une régression continue, un soulèvement moins marqué et une érosion plus importante, ce qui a provoqué l'encaissement des cours d'eau dans les dépôts (Dionne, 1977; Dionne et al., 2001).

Ces événements géologiques se reflètent dans la distribution et l'architecture des dépôts meubles, en particulier dans la section aval de la rivière Ouelle, où les phases de transgression et de régression marines sont bien marquées. La zone étudiée comprend également une terrasse de 8 m, où la rivière a creusé une vallée à méandres distincts (Dionne, 1988; Dionne et al., 2001). Le

parcours de la rivière Ouelle suit une dépression, possiblement d'origine tertiaire, orientée au nord-nord-ouest, en direction de l'estuaire, creusée dans le socle appalachien qui affleure du côté sud-ouest de la baie (D'Anglejan, 1981).

Les formations holocènes de la rive sud du moyen estuaire du Saint-Laurent comportent des unités lithostratigraphiques qui reflètent les variations du niveau marin au cours de l'Holocène (Dionne, 1967; Bélanger, 1993; Dionne et al., 2001). Bien que la stratification des dépôts puisse varier localement, elle suit généralement un ordre similaire. Elle commence (du bas vers le haut) par une couche d'argile grise associée à la mer de Goldthwait, suivie d'une unité alluviale complexe composée de deux types distincts de dépôts.

Ensuite, des alluvions sableuses et limoneuses, de couleur gris pâle à gris foncé et contenant des débris organiques, sont interprétées comme des dépôts estuariens. Puis, des sables moyens à grossiers, des graviers et des lentilles de galets, partiellement stratifiés, sont observés, avec la présence de morceaux de bois, dont des troncs d'arbres. Enfin, les 20 à 30 derniers centimètres de cette sous-unité sont constitués de sable et de gravier imprégnés de limon (Dionne et al., 2001). Toutefois, la synchronisation de la déglaciation et la chronologie de la mer de Goldthwait a varié d'un secteur à l'autre. Cela explique la distribution inégale des dépôts dans la région, avec des épaisseurs variables dans le paysage (Dionne, 1977).

La Figure 2-4 montre la répartition des dépôts meubles dans la zone d'étude : la zone d'étude est majoritairement couverte de dépôts glaciaires, représentant 67,4 % de la surface et constituant 72,2 % des dépôts peu perméables, témoignant ainsi du passage des glaciers dans cette région (Figure 2-6, Figure 2-7) (Ferlatte, et al., 2014). Les dépôts littoraux marins d'eau profonde et peu profonde (indiqués dans la légende comme « dépôts marins/roc ») représentent respectivement 11,7 % et 14,2 % de la zone d'étude, et constituent chacun 12,6 % et 15,2 % des dépôts peu perméables de la région (Figure 2-6, Figure 2-5). Ces dépôts témoignent d'une sédimentation lors du retrait glaciaire et lors de la présence de la mer de Goldthwait dans cette zone (Dionne, et al., 2001; Ferlatte, et al., 2014).

Les dépôts peu perméables dominent la zone d'étude, couvrant 93,3 % de la surface, tandis que les dépôts perméables, principalement situés dans le lit mineur et majeur des cours d'eau, ne représentent que 4,7 % (Figure 2-6). Parmi ces dépôts perméables, 93,5 % sont constitués de dépôts fluviaux, et 6,5 % d'alluvions et de terrasses (Figure 2-5). Ils se forment aux endroits où le cours d'eau perd en compétence à faible débit, favorisant l'accumulation de matériaux grossiers comme le gravier et le sable (Ferlatte, et al., 2014; MFFP, 2017). Ces caractéristiques permettent à ces dépôts de constituer des aquifères, propices aux résurgences d'eau souterraine (Ferlatte, et al., 2014; MFFP, 2017). Ce contexte permet de comprendre la présence et la distribution des RT au sein du bassin versant, en particulier dans la zone d'étude.

Figure 2-4 Carte illustrant la réinterprétation des hillshades de la zone d'étude, utilisée pour cartographier la composition des dépôts meubles du site. Les résultats mettent en évidence une prédominance de dépôts de type glaciaire. Ces dépôts ont également été classés en fonction de leur perméabilité, permettant d'identifier les sites potentiels de résurgences d'eau souterraine.

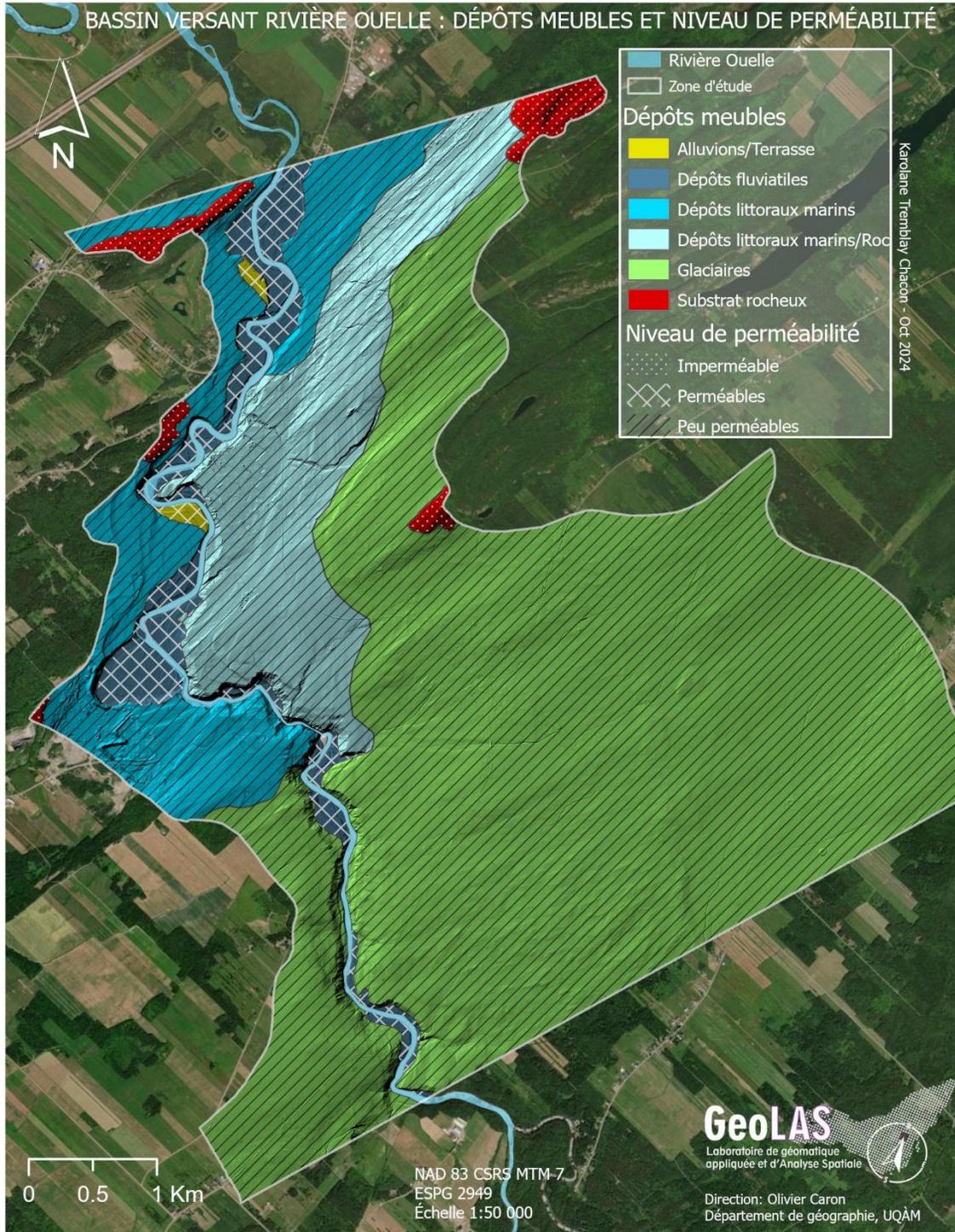
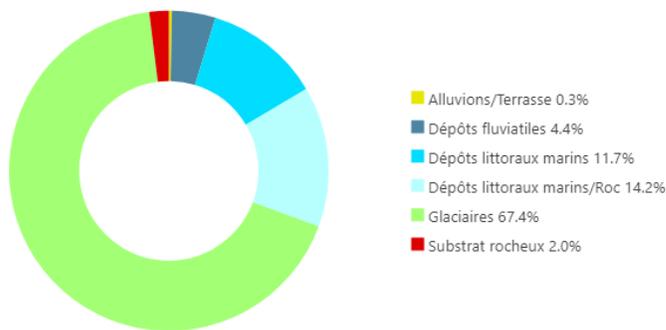


Figure 2-6 Distribution des dépôts meubles dans la zone d'étude en pourcentages. La composition des dépôts meubles est majoritairement dominée par les dépôts glaciaires, suivis par les dépôts littoraux marins en eau peu profonde, puis ceux en eau profonde. Les dépôts fluviatiles et alluviaux, bien que

Figure 2-5 Répartition des dépôts meubles par niveau de perméabilité dans la zone d'étude, mettant en évidence la prédominance des dépôts peu perméables.

Distribution des dépôts meubles dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)



Répartition en pourcentage des dépôts en fonction de leur perméabilité dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)

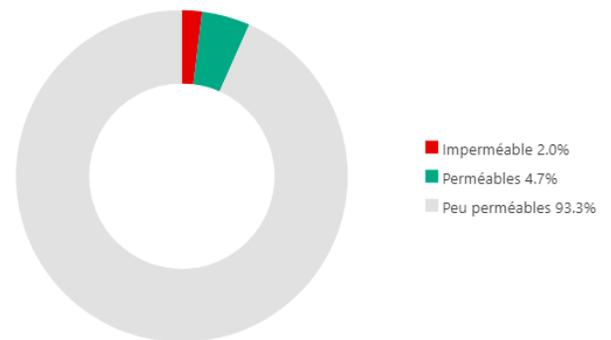
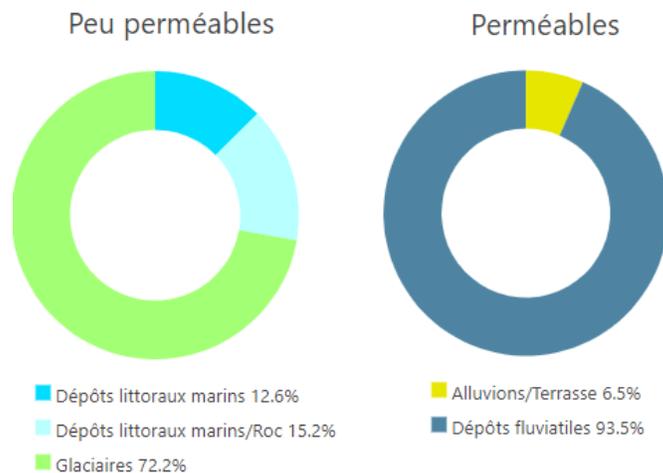


Figure 2-7 Distribution des dépôts meubles selon leur niveau de perméabilité. Il apparaît que les dépôts peu perméables sont principalement constitués des dépôts glaciaires, suivis des dépôts littoraux marins d'eau profonde, puis de ceux d'eau peu profonde. En revanche, les dépôts perméables sont majoritairement composés des dépôts fluviatiles, suivis des alluvions/terrasses.



Le contexte géologique décrit précédemment, associé à d'autres facteurs physiques, explique la diversité des RT observés dans la zone d'étude, soulignant la complexité des mécanismes qui les génèrent (Figure 2-8). Cette diversité témoigne également de la dynamique entre ces différents éléments, qui interagissent pour influencer le régime thermique. Les RT se distinguent par leur origine, liée à des mécanismes d'eaux souterraines ou d'eau de surface. Toutefois, la majorité des types de RT identifiés dans la littérature sont associés aux eaux souterraines (Dugdale, et al. 2013; Sullivan, et al., 2021). Dans cette zone d'étude, la majorité des RT est associée aux sources d'eau souterraine, représentant 72,4 %, tandis que les refuges liés aux eaux de surface constituent les 27,6 % restants (Figure 2-9). De toute évidence, la majorité des RT sont associés aux eaux souterraines. Le type de refuge le plus fréquent dans la zone d'étude est le suintement latéral (*lateral seep*) (Figure 2-8), représentant à lui seul 50 % de tous les refuges observés, soit 69 % des refuges liés aux eaux souterraines. Les autres types de refuges souterrains se partagent les 3,3 % restants (Figure 2-10). À l'opposé, les refuges alimentés par les eaux de surface sont divisés de façon égale (Figure 2-11). Il est important de souligner que les effluents de versant de vallée (*wall-base channel*), associés aux eaux souterraines et représentant 13,8 %, occupent la deuxième place en fréquence d'observation dans l'ensemble de la zone d'étude, à égalité avec les refuges de panache de tributaire ou de confluence (*tributary confluence plume*), qui sont les seuls refuges associés aux eaux de surface (Figure 2-11). La présence et la classification des RT dans cette zone témoignent de l'importance des eaux souterraines et des facteurs hydrogéologiques et géologiques qui favorisent ces mécanismes de régulation thermique.

Figure 2-8 Dans la zone d'étude, les RT se répartissent principalement en trois types. La majorité des RT, soit 50 % (58 des 116 RT identifiés), correspondent à des suintements latéraux, associés aux eaux souterraines. Viennent ensuite les effluents de versant de vallée, représentant 13,8 % (16 des 116 RT), également liés aux eaux souterraines. Enfin, les panaches ou confluences de tributaires, représentant également 13,8 % (16 des 116 RT), associés aux eaux de surface et au ruissellement.

Types des refuges thermiques dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)

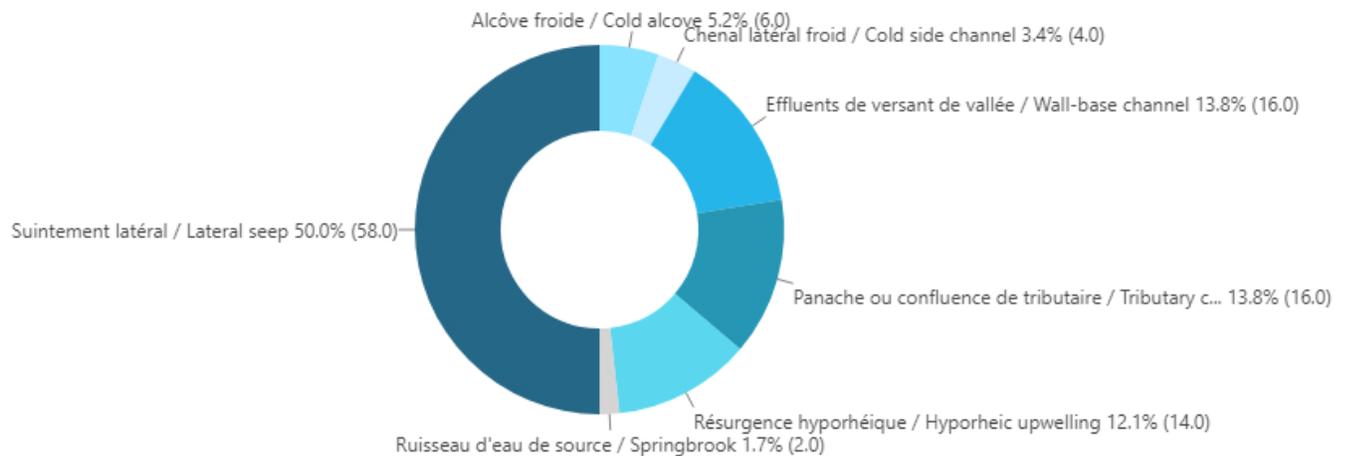


Figure 2-9 La répartition des sources d'eau alimentant les RT dans la zone d'étude révèle que la majorité provient des eaux souterraines (84 RT sur 116 identifiés), tandis qu'une proportion plus faible est issue des eaux de surface (32 RT sur 116).

Répartition des types de sources d'eau (souterraines et de surface) pour les refuges thermiques dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)

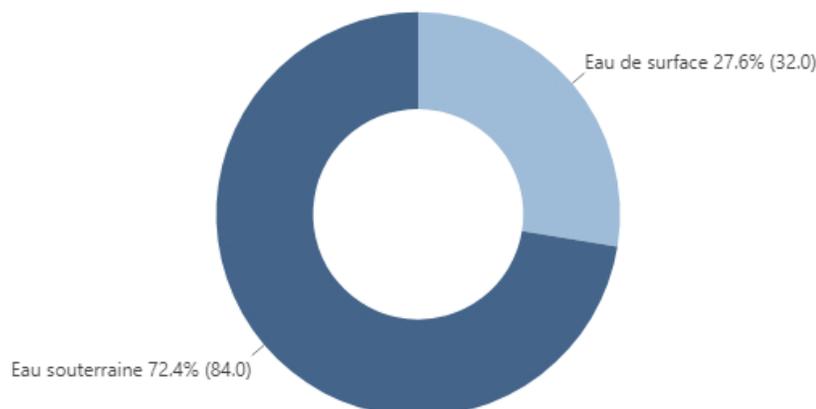


Figure 2-10 Sur les 84 RT alimentés par des eaux souterraines dans la zone d'étude, la majorité étant des refuges de suintement latéral, représentant 69 % (soit 58 RT), suivis des résurgences hyporhéiques, qui constituent 16,7 % (soit 14 RT).

Types des refuges thermiques alimentés par les eaux souterraines dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)

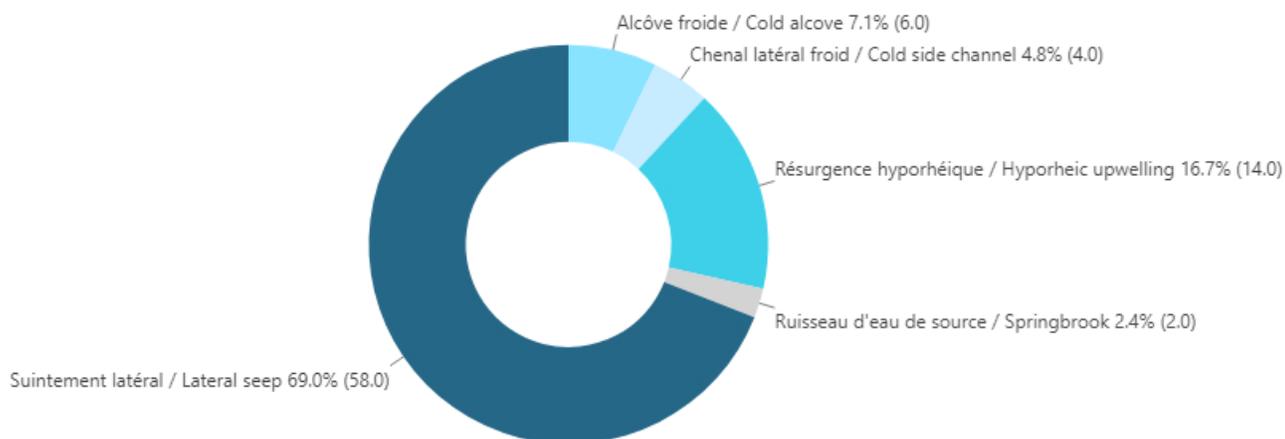
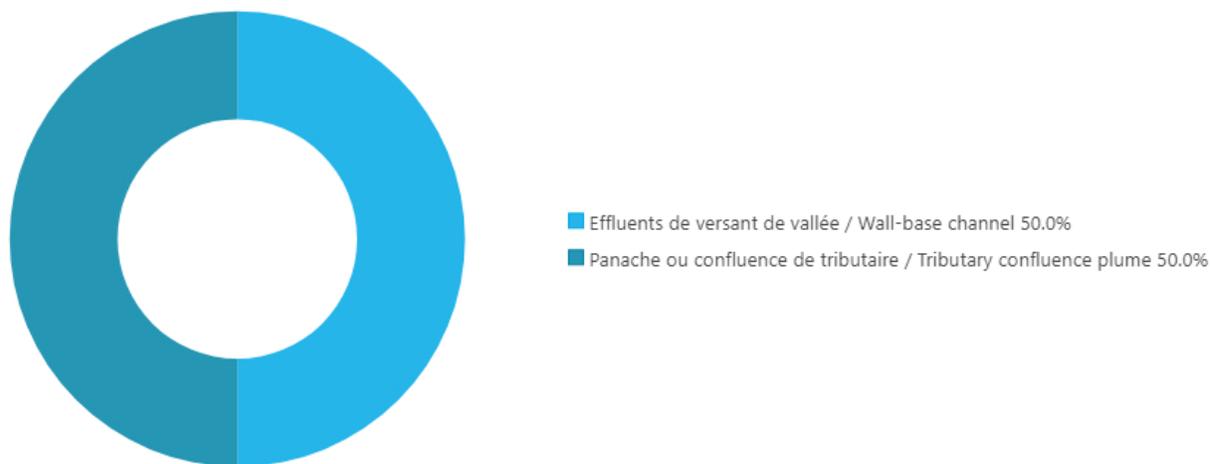


Figure 2-11 Les 32 RT alimentés par des eaux de surface dans la zone d'étude sont répartis de manière égale entre les RT de type effluent de versant de vallée et ceux associés aux panaches ou confluences de tributaires.

Types de refuges thermiques alimentés par les eaux de surface dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)



2.2 DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE

2.2.1 Présentation de l'approche analyse multicritères pondérée (AMCP)

Les systèmes d'information géographique (SIG), l'analyse spatiale et l'analyse multicritères (AMC) constituent des outils complémentaires et efficaces pour gérer et analyser de grandes quantités d'informations dans des contextes de prises de décision et d'aménagement territorial (Janssen, et al., 1990; Aschan-Leygonie, et al., 2019). Ces technologies permettent de traiter des données issues de multiples unités spatiales ou de phénomènes variés, tout en prenant en compte les incertitudes influençant les développements technologiques et les choix des décideurs (Janssen, et al., 1990).

Les SIG facilitent la gestion et l'analyse de données géographiques complexes, offrant la possibilité de modéliser des scénarios d'aménagement et de hiérarchiser les facteurs nécessaires pour résoudre des problèmes spatiaux (Openshaw, et al., 1997; Goodchild, 2000; Prévil, et al., 2004). Ils produisent des représentations spatiales (couches) des critères étudiés, permettant d'analyser leur impact dans un contexte local et de fournir une base solide pour comprendre la dynamique des phénomènes étudiés (Prévil, et al., 2004). De plus, les SIG transforment les données géographiques en informations nouvelles, répondant ainsi à des questions spatiales complexes (Aschan-Leygonie, et al., 2019).

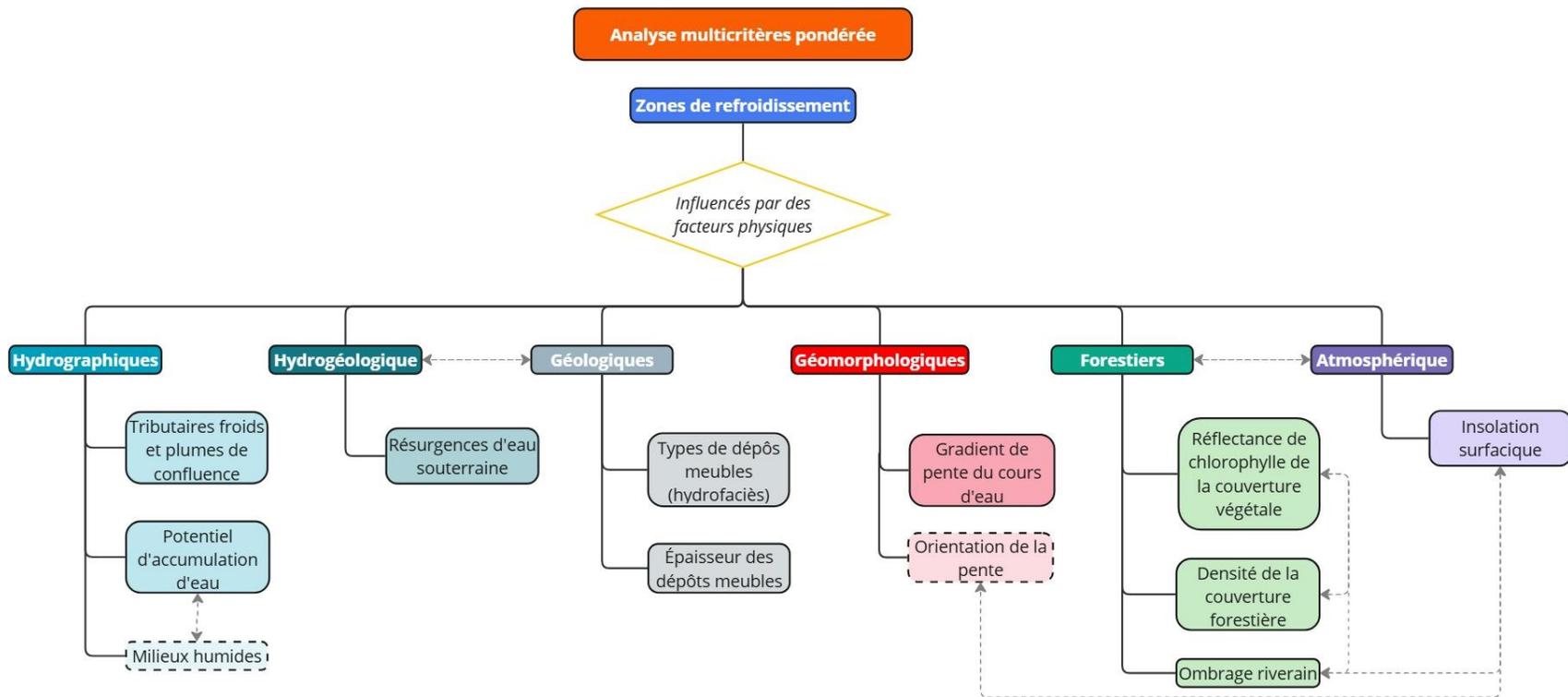
En complément, l'AMC complète l'apport des SIG au processus d'analyse de la dynamique entre les critères sélectionnés. La combinaison de ces outils permet d'explorer et de visualiser des scénarios d'aménagement tout en intégrant des données biophysiques et socio-économiques, ce qui facilite la prise de décision et améliore la communication avec les parties prenantes (Prévil, et al., 2004). L'approche de l'AMC repose souvent sur un système de pondération et de notation, couramment utilisé pour comparer plusieurs options en fonction de critères définis à l'avance (Bélorgey, et al., 2017). Grâce à ce système, une couche matricielle peut être générée afin d'évaluer le niveau d'interconnectivité entre les critères selon le résultat de la moyenne des pondérations (Bélorgey, et al., 2017).

En intégrant ces divers critères, l'AMC aide à prendre des décisions éclairées, que ce soit individuellement ou en groupe, tout en tenant compte des différents aspects de la situation (Bélorgey, et al., 2017). Dans certains cas, cette méthode peut également être utilisée pour identifier des sites critiques, contribuant ainsi à la caractérisation des cours d'eau.

Enfin, l'analyse spatiale, en complément des SIG, renforce la pertinence de l'AMC (Aschan-Leygonie, et al., 2019). Elle met l'accent sur « l'identification de formes et de structures spatiales, sur les relations entre des objets géographiques, sur les processus de changement » (Aschan-Leygonie, et al., 2019), s'appuyant sur ces outils pour étudier et comprendre les dynamiques géographiques complexes, tel que le régime thermique de l'eau influencé par la dynamique des facteurs physiques.

Dans le cadre de ce mémoire, l'analyse multicritères pondérée (AMCp) s'est imposée comme une méthode de choix pour identifier et cartographier les zones de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc) dans le bassin versant étudié. Cette approche repose sur une pondération des facteurs, en vue de modéliser avec précision l'influence relative de plusieurs processus physiques complexes sur la température des cours d'eau. L'analyse intègre six facteurs principaux soit: 1) l'hydrographique, 2) l'hydrogéologique, 3) la géologie, 4) la géomorphologie, 5) le couvert forestier et 6) l'atmosphère. Chacun de ces facteurs se décline en variables spécifiques, telles que les tributaires froids, la densité de la canopée forestière ou l'épaisseur des dépôts meubles (Figure 2-12).

Figure 2-12 Schématisation des facteurs physiques et variables identifiés influençant les zones de refroidissement, répartis en six grandes familles pour l'AMCp : hydrographique (tributaires froids, potentiel d'accumulation d'eau), hydrogéologique (résurgence d'eau souterraine), géologique (dépôts meubles, épaisseur des dépôts meubles), géomorphologique (pente du cours d'eau, orientation de la pente), forestier (réflectance de chlorophylle de la végétation, densité de la couverture forestière, ombrage riverain) et atmosphérique (insolation surfacique). Certaines catégories, comme les milieux humides (MH) et l'orientation de la pente, sont indiquées en cases pointillées. Cela signifie qu'elles sont prises en compte, mais ne seront pas modélisées, car elles sont intégrées dans d'autres variables (par exemple, les MH dans le potentiel d'accumulation d'eau et l'orientation de la pente dans l'insolation solaire). De plus, des flèches relient certains facteurs ayant des liens plus étroits. Bien que tous les facteurs soient interconnectés, certains sont particulièrement associés, comme les facteurs hydrogéologique et géologique, ou encore forestier et atmosphérique.



L'approche de pondération permet de quantifier l'importance relative de chaque facteur selon son influence sur la dynamique thermique des cours d'eau. Cette pondération vise à garantir une représentation adéquate des variations spatiales de la température, tout en respectant la complexité de l'écosystème. Les interactions entre les facteurs physiques étudiés sont souvent non linéaires et dynamiques, ce qui nécessite une méthodologie adaptée pour représenter fidèlement leurs effets synergiques. Par exemple, l'effet de la canopée sur la température de l'eau varie en fonction de la densité forestière et de l'orientation des pentes, ce qui influence directement l'ombre projetée sur les cours d'eau. La pondération dans l'AMCp permet d'intégrer ces interactions complexes de manière structurée, renforçant ainsi la fiabilité de la modélisation et son adéquation avec la réalité observée.

La flexibilité de l'AMCp est un atout majeur pour une étude locale où les objectifs de modélisation et les conditions peuvent varier. Dans cette recherche, les facteurs tels que l'ombrage, la santé de la couverture forestière et les caractéristiques hydrogéologiques ont été pondérés de manière spécifique en raison de leur rôle crucial dans la régulation thermique des cours d'eau, répondant ainsi aux besoins précis de conservation et de gestion écologique. L'utilisation de la pondération dans l'AMCp simplifie l'intégration de diverses sources de données géospatiales, comme les relevés LiDAR pour la modélisation de la hauteur de la canopée et les images Sentinel-2 pour évaluer la réflectance de chlorophylle de la végétation via l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI- *Normalized Difference Vegetation Index*). Les couches spatiales ainsi produites sont combinées à l'aide de la calculatrice matricielle d'ArcGIS Pro, permettant une précision d'analyse jusqu'au niveau du pixel.

L'AMCp s'avère particulièrement appropriée pour étudier les zones de refroidissement et de réchauffement en raison de sa capacité à intégrer et à hiérarchiser des variables multiples et hétérogènes selon leur importance relative. Cette méthode permet de localiser de manière précise les zones critiques pour la gestion des habitats aquatiques, dans un contexte écologique complexe comme celui de la rivière Ouelle, où les interactions entre couverture forestière, topographie et processus hydrologiques influencent directement la température des cours d'eau. En adoptant cette approche, cette étude bénéficie d'une approche à la fois rigoureuse et flexible, apte à représenter l'ensemble des variables influençant la température des cours d'eau, et parfaitement adaptée aux objectifs de conservation et de gestion des milieux aquatiques de la zone d'étude.

2.2.2 Description des données sources

Dans le cadre du mémoire, nous avons utilisé une série de données géospatiales diversifiées, incluant de l'imagerie satellitaire multispectrale, des relevés LiDAR, des données tabulaires et des données vectorielles. Toutes ces informations proviennent de sources ouvertes, garantissant l'accès à l'information et facilitant la reproductibilité de la méthode géomatique employée.

Parmi les choix d'imagerie satellitaire multispectrale en open source, nous avons sélectionné les images Sentinel-2 Level 2A, qui offrent la résolution la plus précise ainsi que les bandes spectrales nécessaires pour nos analyses, toutes au format *32-bit float* (nombre à virgule flottante). Sentinel-2 est une mission européenne d'imagerie multispectrale de haute résolution utilisant deux satellites jumeaux en orbite, décalés de 180° l'un par rapport à l'autre, ce qui permet une fréquence de revisite élevée de 5 jours à l'équateur (ESA, 2013). Il dispose de 13 bandes spectrales : quatre bandes de 10 m (pour les bandes visibles (rouge, vert, bleu) et proche infrarouge), six bandes de 20 m (pour l'infrarouge à ondes courtes) et trois bandes de 60 mètres (pour la correction atmosphérique) (ESA, 2015). Les images ont été obtenues via le moteur de recherche du site Copernicus Browser. Nous avons filtré la sélection de l'imagerie durant les mois d'été, entre juin et août, de l'année 2024, en visant une couverture nuageuse de 10 %. La date proposée par le moteur de recherche répondant à ces critères a été le 27 juillet 2024. Nous avons utilisé ces données pour la modélisation des variables du facteur forestier.

Ensuite, nous avons utilisé une série de données dérivées du LiDAR (Light Detection and Ranging) disponible sur le site Forêt Ouverte, couvrant l'ensemble du Québec méridional (MFFP, 2020). Cette technologie offre « un grand potentiel d'utilisation dans les domaines de la cartographie de base (hydrographie, topographie), du génie civil (réseau routier, urbanisme) et de la gestion des ressources naturelles (agriculture, forêt) » (Gouvernement du Québec, 2015; Wasser, 2024).

Le LiDAR est une technologie de télédétection active, ce qui signifie qu'il utilise sa propre source d'énergie lumineuse pour effectuer des relevés du terrain. Un laser émet des impulsions lumineuses vers la surface, qui sont ensuite réfléchies par des objets et captées par le capteur LiDAR. Cet échange entre le capteur et les objets est généralement appelé « retour » (Figure 2-13). Ces retours sont caractérisés par des coordonnées GPS X, Y et Z, ainsi que par une unité de mesure inertielle

(IMU) qui permet de déterminer l'orientation de l'appareil en vol. Le temps que met la lumière pour revenir au capteur est mesuré afin d'estimer la distance parcourue et de déduire l'altitude de l'objet (valeur Z) (Figure 2-14). Les données LiDAR aéroportées topographiques se présentent sous forme de nuages de points 3D géoréférencés (Yan, 2023). Ces points sont ensuite classés en fonction des caractéristiques des objets détectés par les retours du laser, ainsi que des besoins des utilisateurs (Wasser, 2024). Cependant, la captation des informations par laser présente certaines limitations, car il peut enregistrer des retours nuls lors du balayage de plans d'eau, ce qui entraîne des vides dans les nuages de points, souvent appelés « laser dropouts » (Figure 2-15) (Yan, 2023).

Figure 2-13 Les retours du laser LiDAR sont enregistrés à chaque contact avec un point, où le laser rebondit et retourne vers le capteur. L'image montre quatre retours : le premier représente la hauteur de la canopée ou des bâtiments, le dernier correspond au sol, et les retours intermédiaires permettent de reconstruire les éléments analysés (Wasser, 2024).

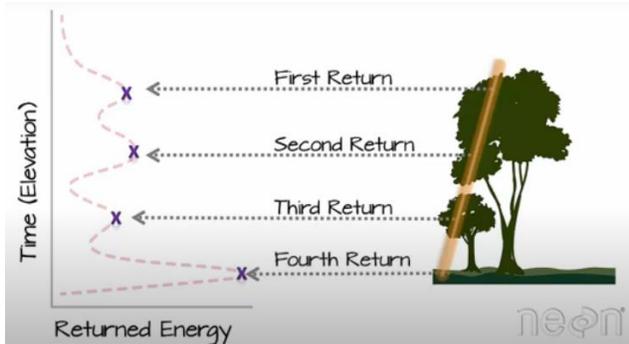


Figure 2-14 Le fonctionnement du capteur LiDAR et ses limitations. Dans la partie (A), on observe comment les bâtiments entravent la capture des données, à la fois du point de vue frontal et du dessus. Le laser capte certaines zones, mais des obstacles créent des données manquantes. En revanche, dans la partie (B), le capteur réussit à capturer toute la canopée, offrant ainsi une couverture complète (Yan, 2023).

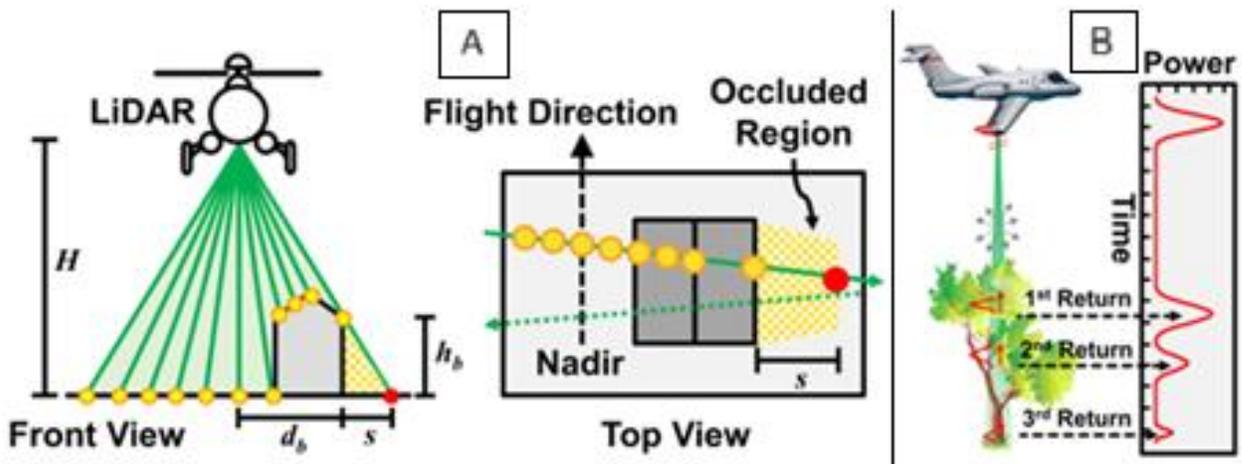
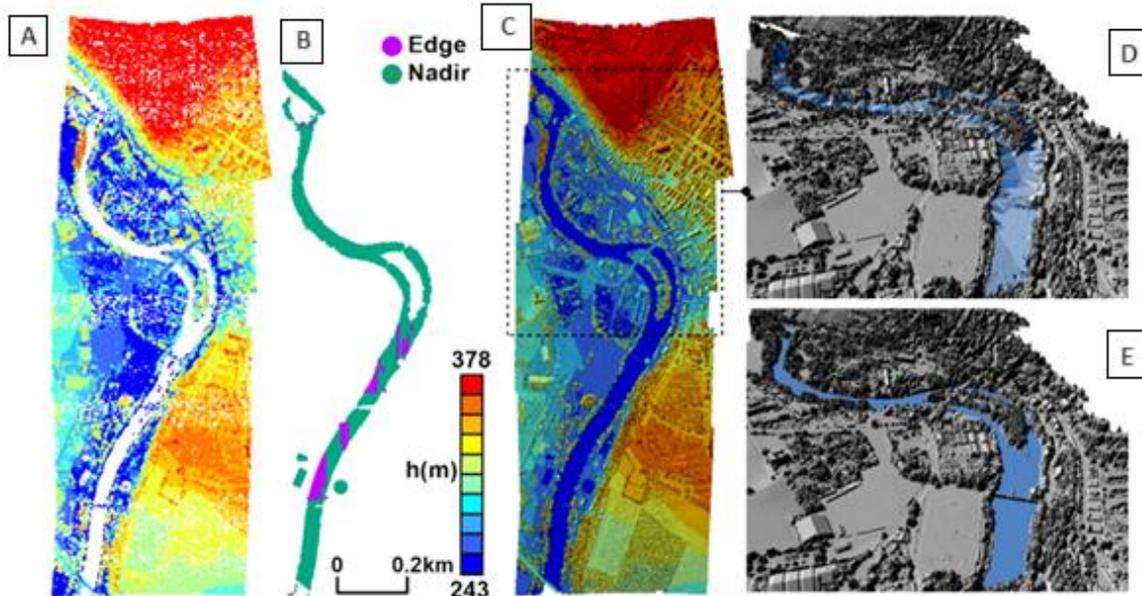


Figure 2-15 Exemple de « laser dropouts » ou trous sur les plans d'eau, illustrant la difficulté du capteur LiDAR à enregistrer correctement les surfaces aquatiques (Yan, 2023). A : Résultat des dropouts sur un cours d'eau. B : Algorithmes d'identification et de comblement des trous. C : Correction du modèle numérique de terrain (MNT) en fonction des corps d'eau. D et E : Visualisation 3D du MNT issu du LiDAR, montrant le cours d'eau avant et après correction.



Les données dérivées du LiDAR disponibles sur le site Forêt Ouverte incluent un modèle numérique de terrain (MNT) à une résolution spatiale de 1 mètre, un modèle numérique de terrain en relief ombragé (Hillshade), également à 1 mètre de résolution, ainsi qu'un modèle numérique de hauteur de canopée (MHC) d'une résolution de 1 mètre, et des pentes à une résolution de 2 mètres (MFFP, 2020). D'autres types de données sont également accessibles sur ce même site, faisant partie des produits dérivés du LiDAR, comme l'indice d'humidité topographique (TWI - *Topographic Wetness Index*) à une résolution de 1 mètre (MFFP, 2020). Toutefois, nous avons uniquement utilisé le MNT et le TWI de Forêt Ouverte pour l'ensemble de nos travaux, et nous avons produit notre propre Hillshade à partir de ce MNT. Nous avons utilisé ces données pour la modélisation de certaines variables des facteurs hydrographiques, géomorphologique, géologique, forestier et atmosphérique.

Nous avons également exploité les données SIH, qui constituent une BD sous forme de tableaux consultables sur les forages effectués au Québec depuis l'instauration du Règlement sur les eaux souterraines en 1967 (MELCCFP, 2020a; MELCCFP, 2020b). Nous avons utilisé ces données pour modéliser les variables associées aux facteurs hydrogéologiques et géomorphologiques.

Une autre source de données utilisée est la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ), qui sert de référence essentielle pour l'hydrographie à travers le Québec. Ce réseau détaillé comprend des données vectorielles sous forme de polygones, de points et de polygones (MERN, 2019). Nous avons principalement utilisé le réseau linéaire. La GRHQ a été utilisée en complément des bassins hydrographiques multiéchelles (niveaux 1 à 8) du Québec, qui constituent des données vectorielles surfaciques. Cette donnée a permis d'extraire le bassin versant de la rivière Ouelle (niveau 1) ainsi que ses sous-bassins (niveaux 2 et 3) (MDDELCC, 2018). En plus de ces données, le Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ) a également été consulté. Ce dernier est un outil cartographique centralisant des informations sur les écosystèmes aquatiques du Québec pour soutenir la prise de décision. Produit par le ministère de l'Environnement, le CRHQ fournit un cadre spatial structuré pour mieux comprendre les écosystèmes aquatiques au sein d'unités écologiques. Il inclut des entités géographiques (points, lignes, polygones) provenant de la Géobase du réseau hydrographique, ce qui facilite diverses analyses hydrologiques (MELCC, 2021). Nous avons utilisé ces données pour extraire le réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Ouelle. Cela a permis de modéliser certaines variables liées au facteur hydrographique et de délimiter d'autres données pour qu'elles s'intègrent au bassin versant et à la zone d'étude.

En guise de validation des résultats de l'AMCp, nous avons interrogé la BD du réseau RivTemp, lancé en 2014. Ce réseau joue un rôle essentiel dans la surveillance des températures des rivières du Québec et de l'Atlantique canadien. Actuellement, RivTemp regroupe 835 stations réparties sur 379 rivières, y compris des stations situées au Nunavik. Les températures y sont mesurées toutes les 15 minutes à deux heures selon les sondes, certaines étant actives uniquement en été tandis que d'autres fonctionnent toute l'année. Pour accéder aux informations, une demande d'autorisation d'accès à la BD est nécessaire. La BD est organisée en tables et doit être interrogée à l'aide de requêtes SQL. Dans notre cas, nous avons ciblé les coordonnées des thermographes, la date (au format JJ-MM-AAAA), la température et le nom de la rivière. Nous avons ainsi téléchargé les

données des thermographes déployés sur la rivière Ouelle entre 2020 et 2023, pour les mois d'été de chaque année.

Dans cette même perspective, nous avons également pris contact avec les chercheurs Stephen J. Dugdale, Normand E. Bergeron et André St-Hilaire pour obtenir l'autorisation d'accéder aux données concernant les RT qu'ils ont identifiés, caractérisés et géolocalisés dans le cadre de leur étude intitulée « *Temporal Variability of Thermal Refuges and Water Temperature Patterns in an Atlantic Salmon River* », réalisée en 2013. Ces informations, essentielles pour valider nos résultats, ont été utilisées exclusivement à cette fin en raison de leur sensibilité, sans qu'aucune cartographie ou partage de données ne soit effectué.

L'ensemble des données énumérées et décrites précédemment a été traité de manière distincte selon leur type et les objectifs de notre modélisation. Pour la production et le traitement des données matricielles, nous avons utilisé différentes méthodes, telles que l'analyse spatiale, le calcul d'indices, la reclassification, l'interpolation et la calculatrice matricielle (*Raster calculator*). L'analyse spatiale nous a permis d'examiner les relations et les motifs au sein des données raster, tandis que le calcul d'indices, comme l'indice de végétation, a été utilisé pour extraire des informations spécifiques sur la couverture végétale. La reclassification a été appliquée pour ajuster les valeurs des pixels en fonction de critères définis. L'interpolation a servi à estimer les valeurs manquantes, améliorer la résolution des données, et créer de nouvelles couches, telles que celles liées aux résurgences d'eau souterraine, à partir des données de forages du SIH. La calculatrice matricielle, quant à elle, nous a permis d'agréger les couches pixel par pixel en attribuant des valeurs, des contraintes et des pondérations, afin de combiner efficacement les différents facteurs analysés. En complément, nous avons également structuré les données sous forme de tables, comme dans le cas des forages, en reclassifiant et en organisant les informations relatives à la stratification des dépôts meubles et à leur épaisseur. Par ailleurs, nous avons traité des données vectorielles, ce qui a nécessité la photo-interprétation et la numérisation, notamment pour classifier les dépôts meubles et mettre à jour la couche de la rivière.

Pour conclure cette section, un tableau de synthèse est présenté ci-dessous, récapitulant les facteurs indicateurs, les données, les méthodes et les sources utilisées (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Synthèse des facteurs physiques identifiés, avec leurs variables et indicateurs respectifs, incluant les données utilisées pour chaque indicateur, la méthode recommandée pour le traitement des données, ainsi que les sources associées.

Facteur physique	Variables	Indicateurs	Données	Méthodes	Source des données (input)
Hydrographique	Confluence de tributaire froid	Réseau hydrographique	Polylignes (vectoriel)	Caractérisation des polylignes en fonction des refuges thermiques déjà identifiés et des thermographes Grille de distance de la confluence	GRHQ
		Refuges thermiques géolocalisés	Points (vectoriel)		Dugdale, et al. 2013
		Thermographes	Tables et points (vectoriel)		RivTemp
	Milieus humides	Indice d'humidité topographique (TWI - Topographic Wetness Index)	TWI (matriciel)	N/A	Forêt ouverte
Hydrogéologique	Résurgences d'eau souterraine	Topographie du substrat rocheux	Forages : Tables et points (vectoriel)	Structuration des tables Visualisation des points Interpolation	SIH
		Piézométrie			
Géologie	Dépôts meubles	Classification des dépôts	Relief ombragé / Forages: tables et points (vectoriel)	Photo interpretation	Forêt ouverte
	Épaisseur des dépôts meubles	Carte Isopaque			
Géomorphologie	Pente du cours d'eau	Gradient de pente du cours d'eau	MNT (matriciel)	Calcul du gradient de pente du cours d'eau: altitude et distance entre des points sur le cours d'eau	Forêt ouverte
Forestier	Réflectance de chlorophylle de la couverture végétale	NDVI	Sentinel-2 : Bandes 08 (NIR) et 04 (Rouge) (imagerie satellite)	Formules de télédétection Calculatrice matricielle	Copernicus
	Densité de la couverture forestière	FCD (Forest canopy density)	AVI: Sentinel-2: Bandes 08 (NIR) et 04 (Rouge) (imagerie satellite)		
			BSI: Sentinel-2: Bandes 08 (NIR), 04 (Rouge), 02 (Bleu), 11 (SWIR) (imagerie satellite)		
			SI: Sentinel-2: Bandes 02 (Bleu), 03 (Vert), et 04 (Rouge) (imagerie satellite)		
Ombre riverain	Ombre riparien pixel par pixel	MHC / Hillshade MHC	Calculatrice matricielle et outil Hillshade dans ArcGIS Pro	Forêt ouverte	
Atmosphérique	Radiation solaire	Insolation solaire	MNT	Outil Solar radiation dans ArcGIS Pro	Forêt ouverte

2.3 REFUGES THERMIQUES ET ZONES DE REFROIDISSEMENT

Le choix des six familles de facteurs physiques que nous avons identifiées découle de la compréhension des refuges thermiques (RT) et les zones de refroidissement (ZRf), contrôlés et influencés par une série de mécanismes et facteurs physiques. La définition des RT peut être complexe. En général, ils sont associés à des températures froides, mais ils peuvent aussi correspondre à des zones d'eau chaude. Cela dépend des besoins spécifiques des espèces qui y trouvent refuge dans ces sites ponctuels (Sullivan et al., 2021). Ce qui les caractérise principalement c'est la différence de température par rapport au cours d'eau principal, ainsi que son rôle écologique en tant que mesure d'adaptation aux stress thermiques (Sullivan et al., 2021; Fullerton, et al., 2018; O'Sullivan, et al., 2019b). Ils existent différents types de RT identifiés dans la littérature qui sont influencés par de divers mécanismes et facteurs physiques (Sullivan et al., 2021).

Dans le contexte du saumon atlantique, le terme « refuge thermique » désigne des sites où la température est inférieure à celle du cours d'eau principal, offrant un abri aux saumons pendant les périodes de chaleur extrême ou d'étiage (Furois, 2016; FQSA, 2022). Dans le cadre de ce mémoire, nous faisons référence à cette définition. Plus précisément, les RT sont identifiés et classés en fonction des mécanismes physiques qui les contrôlent et de la source d'eau qui les alimente, qu'elle provienne de nappes souterraines ou de l'écoulement de surface. La combinaison de ces deux facteurs détermine en grande partie leur variabilité spatio-temporelle (Dugdale et al., 2013). En tout, sept types de RT ont été décrits, comme illustré dans le Tableau 2.3 et la Figure 2-16 (Dugdale et al., 2013).

Ces types de refuges se répartissent en quatre grandes catégories de mécanismes (Bergeron et al., 2020; Berthiaume et al., 2022). Ces mécanismes sont cruciaux pour la formation de microhabitats thermiques, en particulier lors de périodes de stress thermique, et leur rôle devient encore plus significatif dans le contexte actuel de changements climatiques (Dugdale, 2013; Berthiaume et al., 2022; Bergeron et al., 2020; Sullivan et al., 2021). Les paragraphes suivants détaillent ces mécanismes ainsi que les RT qui leur sont associés.

La première catégorie de mécanismes est liée aux confluences des tributaires d'eau froide, qui créent les refuges de confluence (*tributary confluence plume*). Ils se forment lorsque l'eau d'un tributaire (généralement plus fraîche en raison de sa moindre exposition aux sources de réchauffement) rejoint la rivière principale. Le contraste thermique génère un panache de température distinct à l'embouchure du tributaire. Toutefois, la taille de ces RT de confluence varie principalement en fonction du débit du tributaire par rapport à celui de la rivière principale. Indépendamment de leur taille, ces refuges sont souvent stables et jouent un rôle essentiel dans la formation de zones froides le long des rivières (Dugdale, et al., 2013; Bergeron, et al., 2020).

Le deuxième mécanisme concerne l'apport d'eau souterraine, où l'eau émerge localement le long des berges ou du lit de la rivière. Ces refuges se forment lorsque l'eau souterraine remonte à la surface. Pour qu'un refuge soit efficace pour les saumons, deux conditions doivent être remplies : d'abord, le débit de l'eau souterraine doit être suffisamment élevé pour être perceptible dans la rivière, ce qui dépend de la hauteur de la nappe phréatique ; plus celle-ci est haute, plus le débit est important. Ensuite, l'eau fraîche doit être protégée contre un mélange rapide avec l'eau plus chaude de la rivière. La configuration des berges doit donc permettre de maintenir une zone d'eau fraîche suffisamment grande et profonde pour que les saumons juvéniles puissent en bénéficier. Dans cette catégorie, on distingue quatre types de refuges : les refuges de suintement latéral (*lateral seep*), les refuges de source (*springbrook*), les bras latéraux froids (*cold side channel*), et les alcôves froides (*cold alcove*) (Dugdale et al., 2013; Bergeron et al., 2020).

La troisième catégorie de mécanismes concerne les refuges de résurgence hyporhéique (*hyporheic upwellings*). Ces refuges se forment lorsqu'une source d'eau souterraine remonte à la surface, généralement en aval de bancs, d'îlots alluviaux ou de boucles de méandres. Ce processus se déroule dans les sédiments situés sous et autour de la rivière, où l'eau de surface se mélange avec l'eau souterraine. Les formes du lit de la rivière, telles que les seuils ou les bancs de gravier, forcent l'eau à pénétrer dans les sédiments en amont et à ressortir en aval. L'eau qui circule sous la surface reste ainsi plus fraîche que celle de la rivière (Dugdale, et al., 2013; Bergeron, et al., 2020).

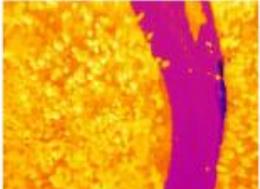
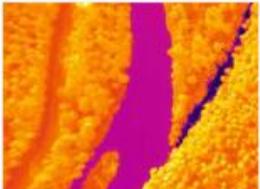
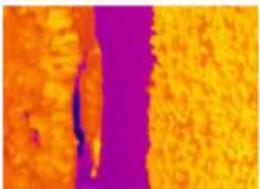
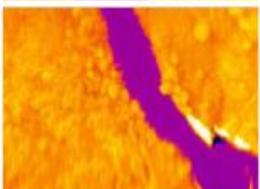
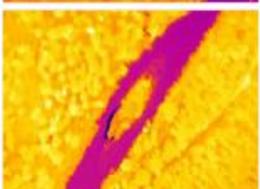
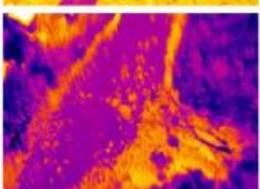
La quatrième catégorie concerne le ruissellement hypodermique, où l'eau s'écoule sous la surface des versants, généralement au-dessus d'une couche de sol imperméable. Ce type de ruissellement souterrain peut émerger lorsqu'il atteint une paroi verticale, comme celle d'une berge ou d'un talus. Ainsi, ce phénomène donne naissance à un unique type de refuge, appelé refuge de paroi (*wall-base channel*). Ces refuges se forment lorsque l'eau froide, provenant du ruissellement hypodermique, émerge à la surface (Dugdale, et al., 2013; Bergeron, et al., 2020).

En plus des RT identifiés par Dugdale et al. (2013), il existe le refuge de fond de fosse, qui se forme au fond des fosses profondes, souvent par la résurgence d'eau souterraine ou une stratification thermique où l'eau froide reste en bas. Ce type de refuge est difficile à détecter par imagerie thermique, car l'eau froide reste au fond (Frechette, et al., 2018; Bergeron, et al., 2020).

Tableau 2.3 Typologie des refuges thermiques selon les sources d'eau et les mécanismes associés (Dugdale, et al., 2013; Frechette, et al., 2018; Bergeron, et al., 2020)

Source d'eau	Type de mécanisme	Description du mécanisme	Type de refuge thermique associé	Description du refuge thermique	Sources	
Eaux de surface	Refuges de confluence	Formés lorsque l'eau plus froide d'un tributaire rencontre celle de la rivière principale, créant un panache thermique distinct.	<i>Refuge de confluence</i> <i>Tributary confluence plume</i>	Zone à l'embouchure du tributaire où l'eau froide se mélange avec l'eau plus chaude de la rivière principale, créant une zone fraîche.	Dugdale, et al. (2013); Bergeron, et al. (2020)	
			Eaux souterraines	Refuges d'eau souterraine		Créés par l'apport d'eau souterraine qui remonte le long des berges ou du lit de la rivière, nécessitant un débit élevé et une protection contre le mélange rapide avec l'eau chaude de la rivière.
<i>Refuge de source</i> <i>Springbrook</i>	Arrivée d'eau froide d'une source ou d'un marais près de la rivière.					
<i>Bras latéral froid</i> <i>Cold side channel</i>	Chenal secondaire principalement inondé pendant les crues.					
<i>Alcôve froide</i> <i>Cold alcove</i>	Accumulation d'eau souterraine dans des zones de contre-courant créées par la forme irrégulière de la berge.					
	Résurgence hyporhéique	Se forme dans les sédiments sous et autour d'une rivière, où l'eau de surface se mélange avec l'eau souterraine, créant une zone fraîche.	<i>Refuge de résurgence hyporhéique</i> <i>Hyporheic upwelling</i>	Zone fraîche formée lorsque l'eau souterraine ressort dans la rivière après avoir circulé sous la surface.		
	Refuge d'écoulement hypodermique	Se crée lorsque le ruissellement souterrain atteint une paroi verticale, formant un refuge de paroi.	<i>Refuge de paroi</i> <i>Wall-base channel</i>	Source d'eau froide le long de la paroi d'une berge ou d'un talus, issue d'un ruissellement souterrain.		
	Refuge de fond de fosse	Se forment au fond des fosses profondes d'une rivière, souvent par résurgence d'eau souterraine ou stratification thermique.	<i>Refuge de fond de fosse</i>	Zone fraîche au fond de la fosse créée par la résurgence d'eau souterraine ou la stratification thermique, souvent non visible en surface.		Dugdale, et al. (2013); Frechette, et al. (2018); Bergeron, et al. (2020)

Figure 2-16 Cette figure présente la classification des différents types de refuges thermiques, accompagnée de croquis illustratifs. Elle comprend également une image satellite et une image thermique pour montrer visuellement à quoi ressemblent ces refuges thermiques dans des contextes réels (Dugdale, et al., 2013).

Refuge	Références	Schéma	Exemple: image optique	Exemple: image TIR
Confluence	Torgersen et al., 2012			
Suintement latéral	Bilby, 1984 Ebersole et al., 2003a			
Source	Stanford and Ward, 1993 Ebersole et al., 2003a			
Bras latéral froid	Ebersole et al., 2003a Stevens and DuPont, 2011			
Alcôve froide	Ozaki, 1988 Ebersole et al., 2003a			
Résurgence hyporhéique	Brunke and Gonser, 1997 Poole and Berman, 2001 Burkholder et al., 2008			
De paroi	Peterson and Reid, 1984 Torgersen et al., 2012			

Malgré leurs similitudes en tant qu'anomalies du régime thermique de l'eau, caractérisées par une différence de température variant entre 2 et 10 °C, la principale distinction entre les ZRf et les RT réside dans le rôle écohydrologique des RT (Calow, 1999; Walker, 1998; Sullivan, 2021). Les ZRf sont généralement utilisées comme un synonyme des RT. Cependant, elles se distinguent comme des zones plus étendues et moins bien définies, où l'agrégation et l'interaction de plusieurs facteurs physiques environnementaux favorisent le refroidissement du cours d'eau ou le maintien de la température de celui-ci, sans pour autant fournir un service écohydrologique (Fakhari et al., 2022; Sullivan, 2021). Comme l'indiquent Sullivan et al. (2021), la diversité terminologique associée à ces phénomènes (« cool-water area » (Bilby, 1984), « cold pool » (Ozaki, 1988), « cold-water patch » (Ebersole et al., 2003; 2007) reflète les nuances dans la définition et l'identification de ces anomalies thermiques dans le cours d'eau. Toutefois, elles partagent toutes une origine commune, étant issues des mêmes facteurs physiques et contrôlées par des sources d'eau majoritairement souterraine, mais aussi de surface (Dugdale, et al., 2013; Sullivan, et al., 2021; Fakhari, et al., 2022).

Pour le concept de ZRf, nous nous sommes principalement inspirés de l'étude de Fakhari et al. (2022), qui distingue clairement l'identification des RT à l'aide de l'imagerie thermique infrarouge (TIR) et les différencie des ZRf, considérées comme des zones de plus grande échelle le long du cours d'eau. Dans leur analyse, les ZRf ont été identifiées à partir du profil longitudinal de température de la rivière, à l'aide des TIR. Les zones qui présentent une diminution de température supérieure à 0,25 °C ont été qualifiées de ZRf. Ce seuil a été choisi par les chercheurs, afin d'éviter les variations aléatoires de température causées par des erreurs de mesure. Ils soulignent cependant qu'une zone de refroidissement ne correspond pas systématiquement à la présence de RT. Par exemple, dans les deux rivières étudiées, le taux de diminution de température le plus élevé ne correspond pas nécessairement au plus grand nombre de RT dans une ZRf. Toutefois, une corrélation positive a été observée entre la longueur des ZRf et le nombre de RT pour l'une des rivières, tandis que cette relation n'a pas été observée dans l'autre.

Ainsi, comme l'indique Caissie (2006), le régime thermique des rivières est essentiel pour la santé des écosystèmes aquatiques, car il influence la qualité de l'eau et la répartition des espèces. Ces variations de température peuvent résulter de facteurs naturels ou anthropiques, tels que la pollution

thermique, la déforestation, les modifications de débits et les changements climatiques (Brown, 1970; Brown, et al., 1970; Beschta, et al., 1987; Johnson, et al., 2000; Sinokrot, et al., 1995; Schindler, 2001; Caissie, 2006). Cependant, d'autres facteurs, comme les conditions atmosphériques, la topographie, le débit et le lit de la rivière, régulent également les échanges thermiques et déterminent la capacité de la rivière à chauffer ou refroidir l'eau (Morse, 1972; Morin, et al., 1994; Sinokrot, et al., 2000; Caissie, 2006). En outre, des éléments comme l'ombrage de la végétation ou du relief peuvent atténuer les rayonnements solaires et la vitesse du vent, tout en étant modulés par l'orientation, l'altitude et l'occupation du sol. Enfin, les échanges thermiques entre l'eau, l'air et le substrat sont également influencés par des facteurs tels que le débit, l'origine des apports en eau et la turbulence des écoulements (Caissie, 2006; Marteau, et al., 2023).

À la lumière des mécanismes physiques associés aux RT, expliqués par Dugdale et al. (2013), Sullivan et al. (2021), Fakhari et al. (2022), ainsi que des facteurs physiques influençant la température de l'eau identifiés par Caissie (2006) et Bergeron et al. (2020) (Figure 2-17), il apparaît que la dynamique des régimes thermiques et l'interconnectivité entre ces facteurs sont extrêmement complexes. Cette complexité se manifeste notamment par l'interaction entre ces facteurs, qui influencent les variations de température à différentes échelles temporelles et territoriales (Figure 2-18).

Figure 2-17 Illustration des différents types de facteurs physiques identifiés ayant un effet sur la température de l'eau (Caissie, 2006).

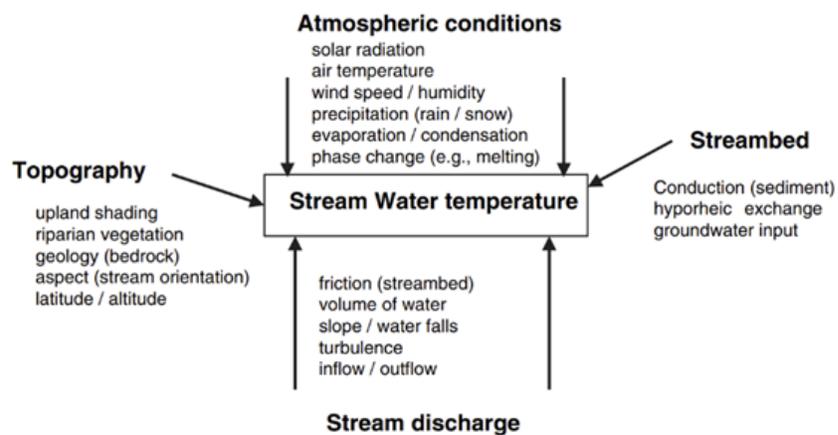
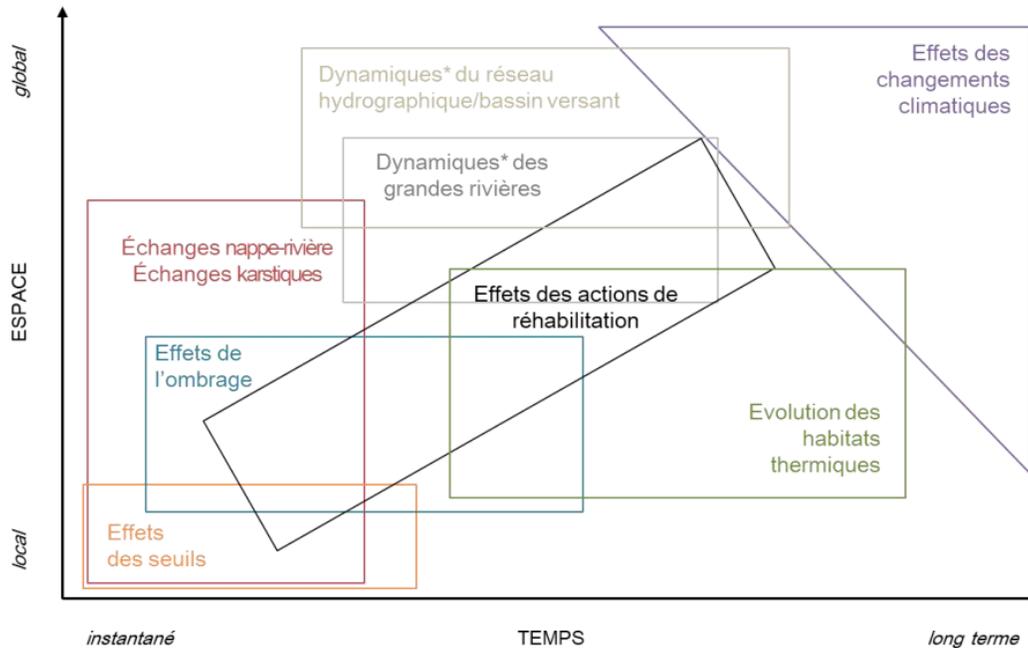
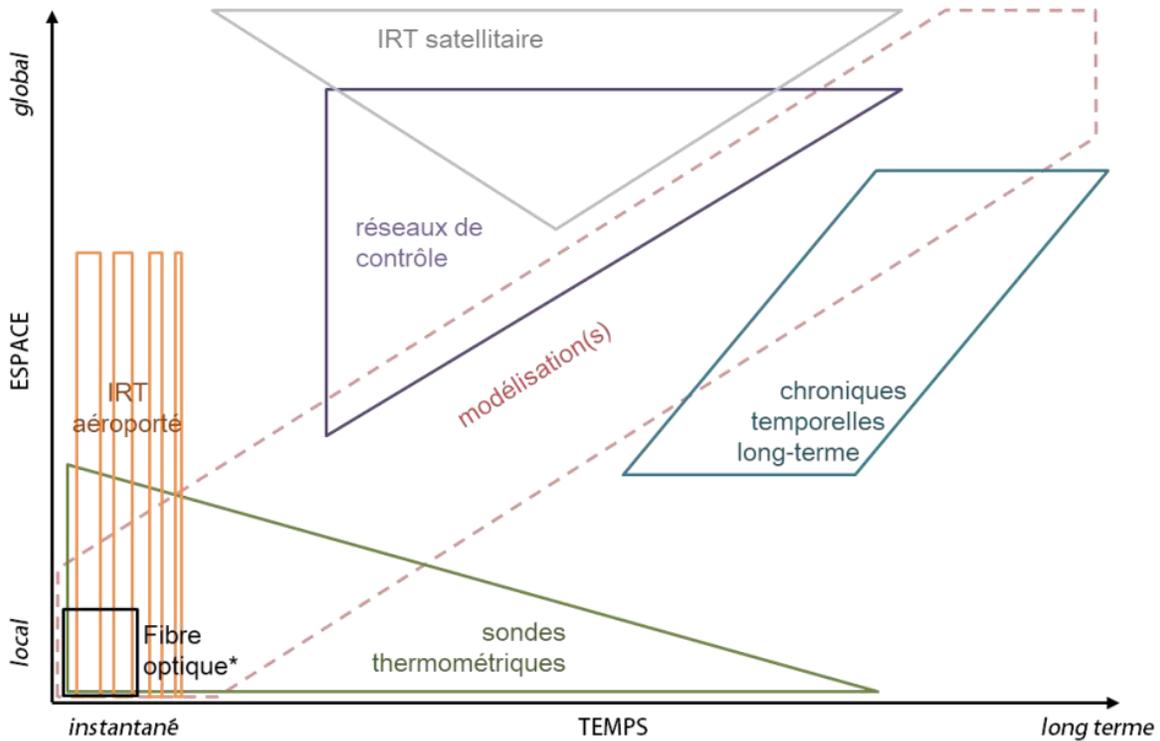


Figure 2-18 Interaction entre les différents facteurs physiques identifiés dans la littérature, notamment par Caissie (2006). Ce graphique présente la dynamique de ces facteurs et les positionne selon les échelles spatio-temporelles. L'axe des ordonnées (Y) représente l'échelle spatiale, allant de local à global, tandis que l'axe des abscisses (X) indique l'échelle temporelle, du court au long terme. (Marteau, et al., 2023).



Dans le cadre des recherches sur la température de l'eau, Marteau et al. (2023) soulignent la difficulté, mais aussi la complémentarité des différents types de données géospatiales et leurs échelles (Figure 2-19). Ils proposent ainsi une approche multi-outil, jugée essentielle, car les hydrosystèmes subissent diverses pressions (urbanisation, agriculture, etc.). Ces pressions, amplifiées par les changements globaux, modifient leur impact sur les cours d'eau, rendant leur détection et analyse plus difficile. Face à la multiplication des enjeux thermiques, l'adaptation ou le développement d'outils innovants devient donc crucial.

Figure 2-19 Interaction des différents types d'outils et de données liés aux fluctuations de la température de l'eau, mettant en évidence leur complémentarité à l'échelle spatio-temporelle. L'axe des ordonnées (Y) représente l'échelle spatiale, allant de local à global, tandis que l'axe des abscisses (X) indique l'échelle temporelle, du court au long terme (Marteau, et al., 2023).



En tenant compte des éléments décrits dans la littérature et du contexte dynamique des refuges thermiques et des zones de refroidissement, nous avons identifié dans la littérature les principales catégories de facteurs et leurs variables influençant le refroidissement des cours d'eau : hydrographiques, hydrogéologiques, géologiques, géomorphologiques, forestiers et atmosphériques (Tableau 2.4) (Caissie, 2006; Monk, et al., 2013; Dugdale, et al., 2013 O'Sullivan, et al., 2019b; Bergeron, et al., 2020; Sullivan, et al., 2021; Fakhari, et al., 2022; Marteau, et al., 2023).

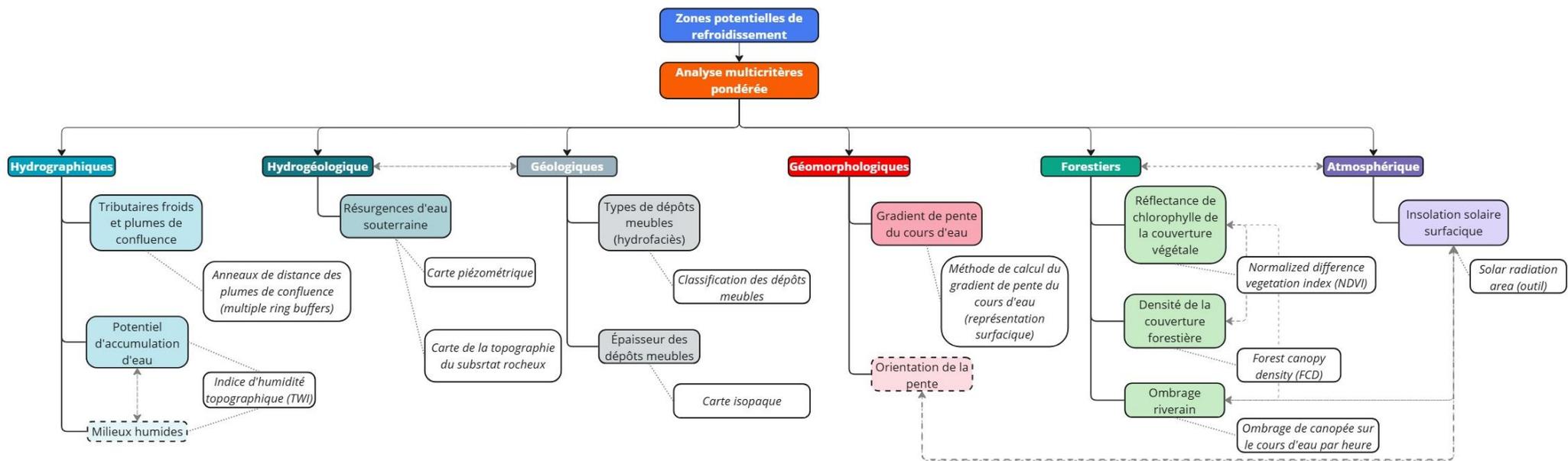
Tableau 2.4 Synthèse des facteurs physiques et variables influençant les variations de température des cours d'eau en lien avec les zones de refroidissement et les refuges thermiques

Facteurs physiques et variables					
Hydrographique			Hydrogéologique	Géologique	
Tributaires froids et plumes de confluence	Potentiel d'accumulation d'eau	↔ Milieux humides	Résurgences d'eau souterraine	Types de dépôts meubles (hydrofaciès)	Épaisseur des dépôts meubles
Les tributaires froids, influencés par la couverture forestière, la pente et l'altitude, apportent de l'eau fraîche et stable aux cours d'eau principaux. À leur confluence, ils créent des refuges thermiques, essentiels pour des espèces comme le saumon. Ces zones permettent de maintenir des conditions favorables, surtout en période de canicule.	Le potentiel d'accumulation d'eau est évalué à l'aide de l'indice d'humidité topographique (Topographic Wetness Index, TWI), qui reflète la capacité du terrain à retenir l'humidité. Cet indice quantifie l'effet de la topographie sur l'écoulement et l'accumulation de l'eau en fonction de la pente et de l'accumulation hydrique à un point donné. Le TWI est également utile pour identifier les milieux humides, mais il présente une précision d'environ 80%, ce qui en fait un outil indicatif plutôt qu'une méthode parfaitement exacte	Les plans d'eau et la végétation absorbent la chaleur, contribuant ainsi à stabiliser les variations de température de l'eau. De plus, l'évapotranspiration des milieux humides joue un rôle dans le refroidissement de l'environnement, renforçant cet effet stabilisateur.	Les résurgences d'eau souterraine constituent le deuxième facteur le plus important influençant la température de l'eau. Elles représentent un mécanisme clé dans la formation de refuges thermiques, contribuant ainsi à la stabilité spatiotemporelle des conditions thermiques dans les cours d'eau.	À l'aide des types de dépôts meubles et de leur épaisseur, il est possible de localiser et valider les résurgences d'eau souterraine, ainsi que d'identifier les aquifères.	
Géomorphologique		Forestier			Atmosphérique
Gradient de pente du cours d'eau	Orientation de la pente	Réflectance de chlorophylle de la couverture végétale	Densité de la couverture forestière	Ombrage riverain	Insolation solaire surfacique
Plus la pente est abrupte, plus le cours d'eau circule rapidement, réduisant ainsi son exposition au rayonnement solaire et limitant le temps nécessaire pour qu'il se réchauffe.	L'orientation de la pente influence directement le niveau d'ensoleillement qu'une surface reçoit : une exposition accrue au soleil entraîne une augmentation de la chaleur absorbée.	La couverture forestière joue un rôle important dans la régulation des températures de l'eau en absorbant la chaleur et en fournissant de l'ombrage sur les cours d'eau. Cet ombrage s'avère particulièrement utile en période de canicule et d'été, car il contribue à maintenir les conditions thermiques			L'augmentation de la température de l'eau est directement liée à l'énergie solaire qu'elle reçoit. Plus l'eau est exposée au soleil, plus sa température augmente. Par ailleurs, cette énergie absorbée par l'eau influence également la température de l'air, créant ainsi un lien étroit entre les deux.

2.4 MODÉLISATION DES FACTEURS PHYSIQUES

L'analyse s'appuie sur six facteurs principaux, chacun décliné en variables spécifiques : hydrographique (2 variables), hydrogéologique (1 variable), géologique (2 variables), géomorphologique (2 variables), forestier (3 variables) et atmosphérique (1 variable). Des indicateurs ont été identifiés pour chaque variable, permettant leur représentation spatiale en vue de leur intégration finale dans l'AMCp (Figure 2-20). Les sections suivantes présenteront en détail l'influence de chaque facteur sur la température de l'eau, ainsi que les travaux antérieurs pertinents, suivis de la méthodologie utilisée pour le traitement des données associées aux indicateurs.

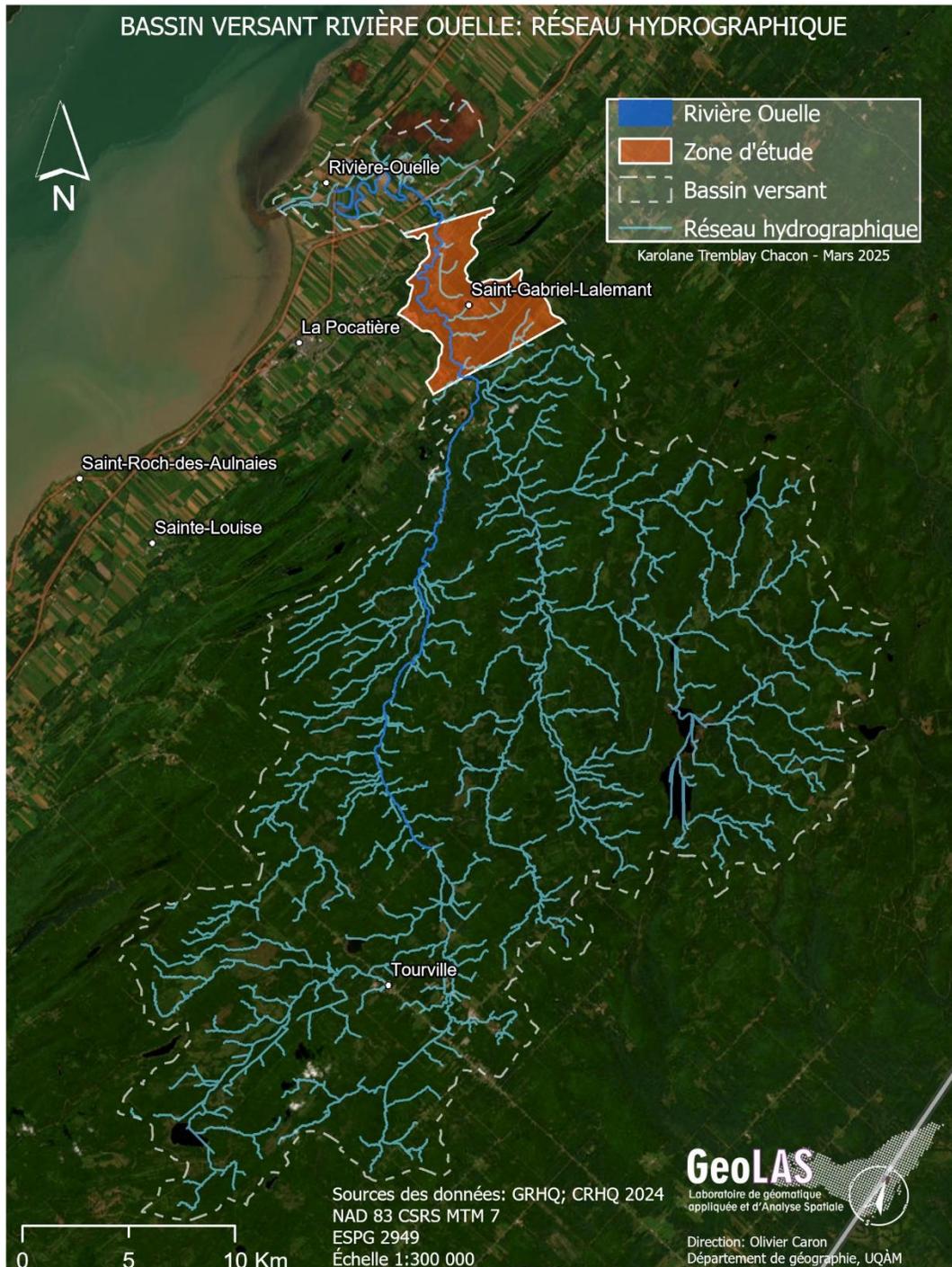
Figure 2-20 Schématisation des facteurs physiques, variables et indicateurs identifiés pour la formule de l'AMC pondérée. Les cases blanches représentent les éléments qui seront modélisés pour représenter les variables associées à chaque facteur physique.



2.4.1 Hydrographique

Les facteurs hydrographiques regroupent les caractéristiques des écoulements de surface et la structure hydrologique du bassin versant, éléments clés pour analyser la variabilité thermique des rivières (O'Sullivan, et al., 2019b; Bergeron, et al., 2020). Dans le bassin versant de la rivière Ouelle, le réseau hydrographique englobe une gamme de cours d'eau, allant des petits ruisseaux aux rivières plus importantes, principalement en amont, avec une densité des tributaires qui diminue progressivement à mesure que l'on se rapproche de l'embouchure. (Figure 2-21). La zone d'étude, peu alimentée par des affluents naturels, est principalement drainée par des canaux agricoles redirigeant l'eau vers le cours d'eau principal. La méthodologie appliquée au facteur hydrographique repose sur l'étude de deux variables: les tributaires froids, évalués à l'aide des anneaux de distance des plumes de confluence (*multiple ring buffers*), et le potentiel d'accumulation d'eau, mesuré par l'Indice d'Humidité Topographique (TWI - *Topographic Wetness Index*). Dans le cadre de cette étude, nous identifions les tributaires froids à partir de données hydrologiques et thermiques, ainsi que de l'analyse de la topographie et de la couverture forestière.

Figure 2-21 Le réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Ouelle est représenté par des lignes bleu pâle, tandis qu'un polygone orange marque les limites du bassin versant. La zone d'étude, quant à elle, est identifiée par des contours noirs. En amont de cette zone, le réseau hydrographique affiche une densité élevée. Cependant, dans la zone d'étude et vers l'embouchure, le réseau devient nettement moins dense, étant majoritairement composé de lignes de drainage issues des champs agricoles. Un encadré blanc permet un agrandissement précis de cette zone, offrant une meilleure visualisation du réseau hydrographique à l'embouchure.



Les tributaires froids jouent un rôle essentiel dans la régulation thermique des cours d'eau, particulièrement en période de chaleur intense. Leur petite taille, combinée à des apports significatifs d'eaux souterraines et à l'ombrage offert par la végétation riveraine, limite l'influence du rayonnement solaire. Ces affluents présentent ainsi des températures plus fraîches que les tronçons principaux, contribuant à la création de RT de confluence et à la stabilisation des variations de température dans les rivières principales (Gonia et al., 2006; Caissie, 2006; Dugdale et al., 2015; O'Sullivan et al., 2019b). L'influence de ces tributaires est essentielle pour créer des RT de confluence, garantissant ainsi la survie des espèces aquatiques sensibles, comme le saumon atlantique, lors des périodes de stress thermique (Dugdale, et al., 2013; Bergeron, et al., 2020; Linnaansaari, et al., 2023). Bien que dans la littérature les confluences de tributaires froids soient souvent mentionnées comme un type de RT, ils ne sont pas systématiquement les plus fréquents dans les rivières (Caissie, 2006; Linnansaari, et al., 2023).

Comme mentionné dans le chapitre précédent, les RT résultent de différents processus physiques. En été, l'eau froide provient principalement de l'apport des eaux souterraines, des écoulements de base, des interactions hyporhéiques et des tributaires dont les bassins sont protégés par un couvert forestier dense. Ces caractéristiques à l'échelle du paysage jouent un rôle essentiel dans la formation et la répartition des habitats thermiques propices aux refuges (Alexander, et al., 2003; Mellina, et al., 2002; Poole et al., 2008; Story et al., 2003; Monk et al., 2013). Leur efficacité dépend de divers facteurs, notamment leur taille, le différentiel thermique par rapport au cours d'eau principal, leur profondeur, la vitesse du courant et les caractéristiques biotiques présentes (Caissie, 2006; Kurylyk, et al., 2015; Gendron, 2013; Linnansaari, et al., 2023).

Les RT formés aux confluences se créent lorsqu'une rivière froide se mélange à une rivière principale plus chaude. La taille du panache d'eau froide, et par conséquent du refuge thermique, dépend de la quantité d'eau froide apportée par le tributaire, du débit de la rivière et des dynamiques hydrodynamiques spécifiques (Linnansaari, et al., 2023). Des études ont démontré que les confluences où le différentiel thermique avec la rivière principale est plus prononcé influencent davantage la présence estivale du saumon atlantique (Corey et al., 2023; Linnansaari et al., 2023). Ces vastes zones sont considérées comme des habitats thermiques essentiels, offrant un refuge aux populations de salmonidés lorsque la température des autres sections de la rivière devient trop élevée pour leur survie (Sullivan et al., 2021; Linnansaari et al., 2023).

Plus précisément, L'influence des tributaires sur la température du cours d'eau principal est modulée par plusieurs facteurs physiques, notamment la géomorphologie, la géologie et la végétation, comme l'indiquent O'Sullivan et al. (2019b). En appliquant des modèles de régression par moindres carrés partiels (PLS), l'étude d'O'Sullivan, et al. (2019b) a mis en évidence le lien étroit entre la température des rivières et les caractéristiques paysagères, tout en soulignant que ces relations varient selon les spécificités physiographiques des bassins versants. Par exemple, dans les bassins versants de Clearwater Brook et Burnthill Brook, situés dans les Miramichi Highlands, des facteurs tels que l'exposition au rayonnement solaire, les types de dépôts géologiques (graviers, sables, et silt mineur), les zones de contact géologiques et la pente maximale du bassin étaient fortement corrélés avec la température de la rivière (O'Sullivan et al., 2019b). Cette analyse souligne l'importance d'intégrer d'autres facteurs et d'examiner leur interconnexion dans notre méthodologie afin de mieux appréhender la variabilité thermique des rivières. En particulier, l'influence des tributaires froids joue un rôle clé dans la formation des refuges thermiques de confluence, contribuant ainsi à la survie des espèces aquatiques sensibles, comme le saumon atlantique, lors des périodes de stress thermique (Dugdale et al., 2013; Bergeron et al., 2020; Linnansaari et al., 2023).

Par ailleurs, les milieux humides (MH) influencent la température des cours d'eau en emmagasinant de la chaleur, ce qui peut entraîner un réchauffement du cours d'eau. Cependant, cet effet est réduit par les apports d'eau souterraine (O'Sullivan et al., 2019b). Dans le bassin versant de la rivière Cains, des facteurs tels que l'altitude, la proportion de rivière traversant des MH et leur superficie sont positivement corrélés avec des températures élevées des tributaires. Les zones humides, exposées au rayonnement solaire, se réchauffent rapidement en été, mais cet effet peut être compensé par les apports souterrains (Winter et al., 1998; O'Sullivan et al., 2019b). En période de sécheresse, la déconnexion hydrologique entre les sources de la rivière et les MH peut intensifier cette élévation de température (Devito, et al., 1999; O'Sullivan et al., 2019b).

Dans ce contexte, O'Sullivan et al. (2019b) ont montré que l'augmentation des températures des tributaires dans le bassin de la rivière Cains varie selon la localisation géographique. Par exemple, parmi leurs observations, les sections amont, dotées de dépôts profonds favorisant les flux souterrains, restent plus fraîches, contrairement aux sections inférieures à faible capacité de stockage d'eau souterraine, qui présentent un réchauffement plus marqué (Winter et al., 1998;

Rampton, 1984; Wondzell, et al., 2013; O'Sullivan et al., 2019b). Il est important de souligner que les MH ne contribuent pas à la formation de RT, à différence des tributaires.

Ainsi, il ressort que les tributaires jouent un rôle essentiel dans le régime thermique des rivières, tandis que les MH et les zones d'accumulation d'eau contribuent également de manière significative à cette dynamique. D'une part, ces milieux peuvent contribuer au refroidissement des cours d'eau, à condition que des critères spécifiques, tels que les apports d'eau souterraine facilitée par les dépôts meubles, soient présents. D'autre part, ils peuvent également accumuler de la chaleur et provoquer un réchauffement du cours d'eau. L'effet des MH sur la température dépend largement de leur interaction avec d'autres facteurs physiques, qu'il est crucial de prendre en compte pour mieux comprendre leur potentiel de refroidissement (O'Sullivan et al., 2019b). En effet, bien que les MH absorbent de la chaleur et puissent réchauffer l'eau, cet effet est atténué, voire annulé, lorsqu'il existe des apports d'eau souterraine. Ces observations soulignent à nouveau l'importance d'intégrer l'ensemble des facteurs physiques dans l'évaluation du régime thermique des cours d'eau.

Les technologies modernes, telles que l'utilisation de caméras thermiques et des technologies géospatiales, l'identification précise des RT devient plus aisée. Pour des solutions économiques, l'utilisation d'orthophotographies en période de couverture glaciaire ou d'imagerie satellite (Linnansaari et al., 2023; O'Sullivan et al., 2019a) est efficace, mais peut être limitée par la résolution et la disponibilité des données. Un exemple de méthode utilisant les technologies géospatiales est l'étude de Monk et al. (2013), qui ont combiné des TIR géoréférencées avec des variables géospatiales pour identifier les facteurs influençant les RT dans les affluents des rivières principales. Cette approche leur a permis d'établir un lien entre la température médiane des sous-bassins, influencée par des éléments géographiques tels que la position topographique, la pente et la densité des MH et des forêts mixtes en amont. Cela souligne l'importance des RT pour la régulation thermique et la conservation des écosystèmes aquatiques face aux changements climatiques (Monk et al., 2013; Linnansaari et al., 2023).

2.4.1.1 Tributaires froids et plumes de confluence

Nous avons utilisé la couche vectorielle de type polyligne provenant de la base de données géospatiales du GRHQ (MERN, 2019) pour identifier les tributaires. Parallèlement, nous avons téléchargé les données des thermographes disponibles dans RivTemp pour les années 2018 à 2023. Cette période a été choisie en raison de la disponibilité des thermographes et leur période d'activité sur le tronçon de notre zone d'étude. Ces thermographes ont commencé leurs enregistrements à des moments variés, certains dès 2018, tandis que d'autres l'ont fait avant ou après cette période. Cependant, certaines séries de collecte se sont interrompues avant 2024.

L'objectif initial était de valider les écarts de température entre les tributaires et le cours d'eau principal à l'aide de données thermographiques afin d'identifier les tributaires froids. Cependant, comme l'illustrent la Figure 2-2 et la Figure 2-22 ces instruments n'ont pas été installés à chaque tributaire, et leur densité dans notre secteur reste relativement faible par rapport à l'ensemble du cours d'eau. Au total, nous avons recensé quatre thermographes dans la même zone, ce qui ne nous a pas permis de confirmer si les tributaires cartographiés présentaient une différence de température significative par rapport à la rivière principale. Malgré cette limitation, les thermographes ont tout de même permis d'estimer la température moyenne du cours d'eau au cours des années étudiées.

Figure 2-22 Distribution des thermographes (points rouges) placés aux confluences entre le cours d'eau principal (polygone bleu) et ses tributaires (lignes bleues). Le thermographe situé sur le cours d'eau principal est correctement positionné, tandis que celui proche du tributaire devrait être placé directement à la confluence ou légèrement en aval, afin de mieux observer les éventuelles variations de température et l'effet du tributaire sur le cours d'eau principal.



Nous avons utilisé les RT géolocalisés et caractérisés par Dugdale et al. (2013) sur la rivière Ouelle, en nous concentrant spécifiquement sur les RT de confluence (*tributary confluence*). Certains de ces RT se trouvent à proximité de tributaires déjà cartographiés, tandis que d'autres ne sont pas visibles dans le réseau hydrographique du GRHQ. Pour approfondir cette analyse, nous avons généré notre propre réseau hydrographique afin de mieux comprendre ces caractéristiques. Cependant, les résultats n'ont pas permis d'identifier de nouveaux cours d'eau. Nous émettons donc l'hypothèse qu'il pourrait s'agir de tributaires intermittents non cartographiés ou de ruissellements.

L'utilisation des tributaires par les espèces semble dépendre de leur apport en eau froide et des différences de température avec le cours d'eau principal. Wang, et al. (2020) ont observé que les truites arc-en-ciel privilégiaient certains RT en raison des écarts thermiques entre ces tributaires et le cours d'eau principal. Bien que certains RT de confluence n'aient pas été clairement identifiés, nous avons décidé de les inclure dans notre analyse en créant une seule couche vectorielle pour représenter les plumes de confluence, bien que le rôle de ces zones et le comportement des poissons à leur égard demeurent insuffisamment documentés (Wang, et al., 2020).

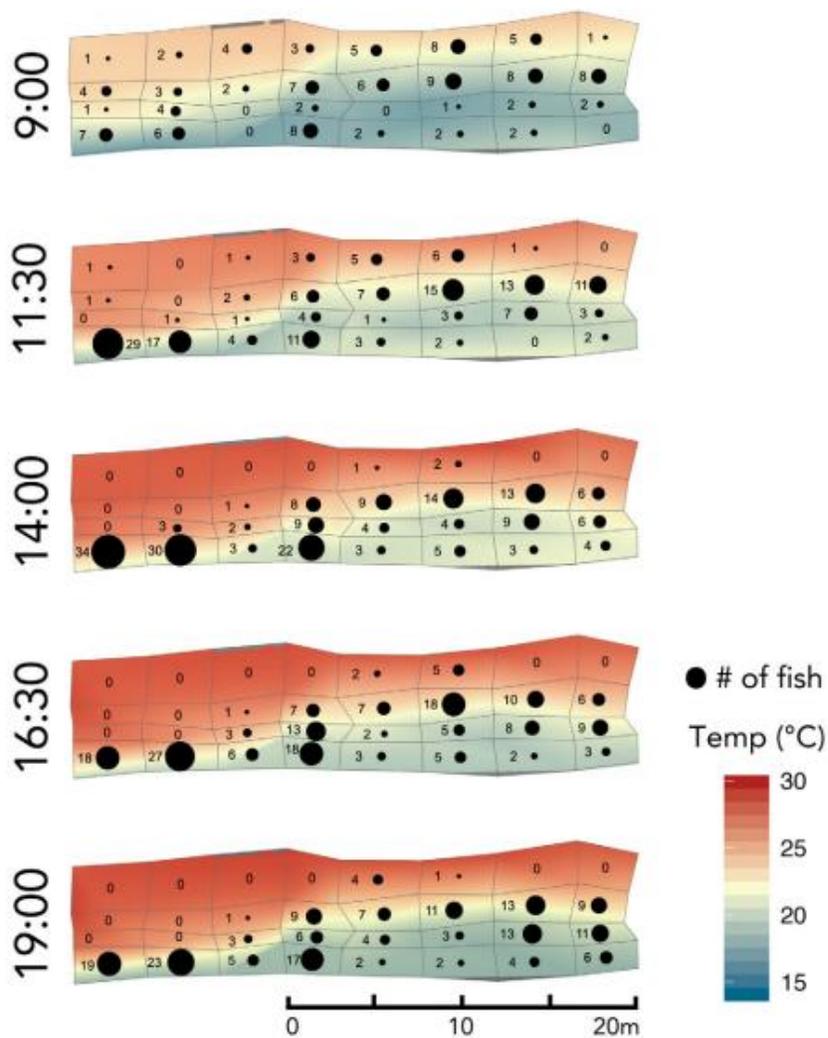
Dans l'étude de Wang, et al. (2020), qui a porté sur l'utilisation des confluences de tributaires comme RT pour la truite arc-en-ciel dans la rivière South Fork Eel en Californie, les chercheurs ont étudié trois aspects principaux : la caractérisation des profils thermiques des confluences, l'analyse des schémas d'occupation des truites en fonction des températures dans la plume de confluence, et la recherche de sélection de microhabitats. Les thermographes installés à travers chaque grille ont permis de mesurer la température et d'observer la répartition des poissons, afin d'analyser la relation entre les variations thermiques et l'utilisation des différentes sections de la plume de confluence par les truites. Les données de température ont également été interpolées pour mieux comprendre leur lien avec la densité des poissons par grille.

Les observations de Wang, et al. (2020) ont montré que la répartition des truites variait en fonction de la température et de la période estivale. Lorsque les températures du cours principal étaient fraîches, les truites se répartissaient de manière aléatoire sur la grille. Cependant, à mesure que l'été avançait, elles se rassemblaient sur certaines grilles, surtout celles situées à la limite de la plume d'eau froide, où les eaux du cours principal et du tributaire se mélangent. Les résultats ont révélé que les truites privilégiaient des microhabitats avec une température moyenne de 20,8 °C, bien que ces préférences puissent varier selon les conditions.

En nous inspirant de cette méthodologie, nous avons utilisé les données mentionnées précédemment. Pour simuler la plume et les grilles, nous avons opté pour une approche simplifiée en créant des anneaux de distance concentriques (*multiple ring buffers*) avec des intervalles de 10 m allant jusqu'à 90 m à partir des RT de confluence identifiée et des points de contact entre tributaires et cours d'eau principal. L'analyse de la distribution des poissons et de l'interpolation des températures a montré que la majorité des poissons se concentraient au début de la confluence

et restaient à proximité (Figure 2-23). En conséquence, nous avons décidé de conserver uniquement les lignes des buffers plutôt que de maintenir l'approche des grilles. En raison du manque d'informations précises, comme la température des tributaires, cette simplification s'est avérée plus pertinente. Nous avons ajusté ces zones tampon en fonction de la numérisation du cours d'eau afin de délimiter précisément la plume. Enfin, nous avons rastérisé ce résultat pour l'intégrer dans l'AMC pondérée, car il s'agissait d'une couche vectorielle.

Figure 2-23 Représentation des grilles aux confluences entre le cours d'eau principal et ses tributaires, illustrant le nombre de poissons recensés par grille en fonction de la température enregistrée à différentes heures de la journée. On observe que la majorité des poissons se concentrent principalement au début de la confluence, même si ces grilles ne sont pas toujours les plus froides. Les grilles affichant des températures plus fraîches sont ensuite les plus fréquentées, tandis que celles dépassant les 22 °C sont très peu occupées (Wang et al., 2020).



2.4.1.2 Potentiel d'accumulation d'eau et milieux humides

Comme mentionné précédemment, les travaux de Monk et al. (2013) ont utilisé des TIR associées à d'autres types de données géospatiales (matricielles et vectorielles) pour identifier les facteurs clés déterminant la localisation des RT de confluence. Cependant, en raison de l'impossibilité d'accès à ces TIR, nous avons privilégié d'autres alternatives méthodologiques pour notre étude. Aussi, nous voulions prioriser des données ouvertes, plutôt que des données difficiles d'accès ou payantes.

Afin d'identifier les milieux humides (MH) potentiels, nous avons utilisé l'Indice d'Humidité Topographique (TWI - *Topographic Wetness Index*), un outil efficace pour évaluer les zones ayant un fort potentiel d'accumulation d'eau (Esri, 2024a). Bien qu'il existe des efforts de cartographie des milieux humides, notamment ceux de Canards Illimités Canada et du MELCCFP, dont les dernières mises à jour datent de 2024, nous avons considéré que l'indice TWI offrait une meilleure précision (Varin, 2021). En effet, cette approche prend en compte les caractéristiques physiques du terrain et couvre l'ensemble du territoire ainsi que les berges, pixel par pixel (MFFP, 2020; MFFP, 2021; Varin, 2021), contrairement aux couches vectorielles, qui restent soumises à une certaine subjectivité liée à la photo-interprétation. Les valeurs de l'indice TWI varient généralement entre 0 et 25. Puis les valeurs de 15 et plus reflètent l'accumulation d'eau dans une zone et sont généralement associées aux MH (Varin, 2021; MFFP, 2020). Cet indice s'avère utile pour la détection des milieux hydriques, bien qu'elle nécessite de prendre en compte divers facteurs, comme les types de MH et leur contexte géomorphologique (Varin, 2021).

Varin (2021) propose deux approches pour cette identification : une analyse des proportions de polygones couverts par des classes naturelles de valeurs de TWI et une analyse par pixel des valeurs de TWI utilisant un modèle CART (algorithme d'intelligence artificielle). Les résultats des deux approches se sont avérés satisfaisants. D'après ses résultats, dans le premier secteur étudié, la première approche identifie 76 % des polygones de MH, tandis que la deuxième approche atteint une précision de 80 %. En revanche, dans le deuxième secteur, la première approche identifie 22 % des polygones, tandis que la deuxième approche présente une faible classification en raison du déséquilibre du nombre de pixels par catégorie de milieu humide. Ainsi, les résultats obtenus par Varin (2021) indiquent que le TWI peut être utilisé pour identifier certains types de MH dans des

territoires glaciaires, en particulier dans les zones avec des dépôts de type till, mais avec certaines réserves à prendre en compte. En effet, Varin (2021) précise que des confusions subsistent entre certains types de MH, ce qui limite la précision de l'outil. Bien que le TWI présente un potentiel intéressant, il ne peut être utilisé de manière définitive pour détecter les MH dans les basses-terres du Saint-Laurent (BTSL), et doit être considéré comme une estimation plutôt qu'une méthode entièrement fiable. Pour le calcul du TWI, l'indice se base sur la relation entre la capacité d'une zone à recevoir de l'eau et celle à la drainer. Cette relation est exprimée par l'équation suivante (Formule 2.1) (Esri, 2024a) :

Formule 2.1 Calcul de l'indice d'humidité topographique (TWI), où a correspond à l'aire de bassin spécifique et $\tan(B)$ représente la pente locale (Beven, et al., 1979; Esri, 2024a).

$$TWI = \ln\left(\frac{a}{\tan(B)}\right)$$

Concernant les étapes de traitement des données, la première consiste à calculer un raster de pente spécifique au TWI à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) haute résolution. Ensuite, un raster d'aire de bassin spécifique est généré à partir du même MNT. Les résultats intermédiaires peuvent être sauvegardés, et un raster de TWI est créé en appliquant l'équation via l'algèbre raster. Cette approche permet de générer des cartes précises pour identifier les zones potentiellement humides (ESRI, 2024a; MFFP, 2020). D'autres approches, telles que celle de Higginbottom et al. (2018), recommandent l'utilisation de l'Indice Topographique Composé (CTI) pour évaluer l'humidité locale d'un site et son potentiel pour la restauration des MH. Selon leur modèle, les résultats sont cohérents avec la répartition des MH à l'échelle régionale et montrent une influence notable des paramètres topographiques et des sols.

Cependant, pour cette étude, nous avons choisi d'utiliser le TWI disponible dans le système Forêt Ouverte, produit par le MFFP, en acceptant cette marge d'erreur mentionnée antérieurement (MFFP, 2021). Ces couches matricielles sont dérivées de modèles numériques de terrain obtenus grâce aux données LiDAR aériennes, ce qui permet d'obtenir une cartographie précise des MH potentiels, ces sites sont identifiés avec des valeurs de 16 ou plus dans la symbologie officielle (MFFP, 2021).

2.4.2 Hydrogéologique

Les facteurs hydrogéologiques influencent directement la dynamique des eaux souterraines, lesquelles jouent un rôle majeur dans le maintien des températures basses des cours d'eau grâce aux résurgences d'eaux souterraines. Ces résurgences, qui alimentent les rivières en eau fraîche, sont particulièrement importantes dans le contexte du changement climatique, où les températures de l'eau de surface peuvent atteindre des niveaux critiques. Dans cette étude, deux indicateurs hydrogéologiques sont modélisés pour représenter la variable des résurgences d'eau souterraine : la cartographie de l'élévation du substrat rocheux et celle des niveaux piézométriques. Ces deux éléments se complètent et permettent de mieux comprendre la distribution spatiale des nappes d'eau souterraine.

Dans *Ground Water and Surface Water: A Single Resource* par Winter et al. (1998), les eaux souterraines sont divisées en deux zones principales: la zone non saturée et la zone saturée. Dans la première, les espaces entre les particules de sol ou les fissures rocheuses contiennent à la fois de l'air et de l'eau, mais cette eau, retenue par des forces capillaires, ne peut pas être extraite par des puits. La partie supérieure, appelée zone d'eau du sol, facilite l'infiltration grâce aux racines des plantes et aux galeries d'organismes. L'eau y est soit absorbée par les plantes, soit évaporée. En revanche, dans la zone saturée, tous les espaces poreux du sol et des roches sont remplis d'eau, formant ce que l'on appelle l'eau souterraine, qui alimente les nappes phréatiques. La nappe phréatique, qui correspond à la limite supérieure de cette zone, permet l'extraction de l'eau via des puits.

La profondeur de la nappe phréatique varie selon les endroits : elle peut être très proche de la surface, près des lacs ou rivières, ou beaucoup plus profonde, atteignant plusieurs centaines de mètres. Cette profondeur change également au fil du temps, notamment en fonction des précipitations, qui rechargent la nappe. Pour cartographier cette nappe, on mesure le niveau d'eau dans différents puits, puis on utilise ces données pour créer des courbes de niveau. Ces courbes aident à estimer la direction dans laquelle l'eau souterraine s'écoule, généralement en suivant un trajet perpendiculaire aux courbes (Winter, et al., 1998).

L'eau souterraine circule dans un système tridimensionnel, combinant des mouvements verticaux et horizontaux. Ces flux sont influencés par la charge hydraulique, qui dépend de l'altitude et de la

pression de l'eau. L'eau qui s'infiltré en surface peut se déplacer de façon complexe à l'intérieur du système souterrain. Des piézomètres permettent de mesurer la charge hydraulique à différentes profondeurs et d'étudier ces mouvements. Les écoulements locaux, intermédiaires et régionaux se croisent, interagissent et influencent mutuellement le flux global de l'eau à travers le système, créant ainsi des dynamiques complexes (Winter, et al., 1998).

Enfin, les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface dépendent du gradient hydraulique et de la perméabilité de l'aquifère. Par exemple, les sols sableux, plus perméables que les argiles, facilitent l'écoulement. Les systèmes locaux influencent fortement les eaux de surface, tandis que les flux profonds, plus lents et chimiquement chargés, participent aussi à la composition des eaux réceptrices (Winter, et al., 1998).

2.4.2.1 Résurgences d'eau souterraine

Les résurgences d'eau souterraine jouent un rôle crucial dans la création de refuges thermiques pour les poissons d'eau froide, comme le saumon atlantique, en réduisant les températures estivales des cours d'eau et en atténuant les variations thermiques à court terme. Elles sont influencées par la géologie locale, la profondeur des aquifères et les flux d'eaux souterraines, qui dépendent de la topographie et de la composition des dépôts superficiels (Briggs et al., 2018; O'Sullivan et al., 2019b). Ces interactions modifient les régimes thermiques des rivières et soutiennent des écosystèmes aquatiques complexes (Brigg, et al., 2018). Les eaux souterraines profondes, en particulier, ont un effet plus marqué sur le refroidissement des cours d'eau, car elles maintiennent des températures proches de la moyenne annuelle, tandis que les eaux peu profondes, influencées par des roches peu perméables, offrent une réduction thermique plus faible (Kobayashi, 1985; Briggs et al., 2018). Par exemple, un apport de 25 % d'eaux souterraines profondes peut réduire la température de l'eau de -2.0 °C, tandis que les apports d'eaux peu profondes entraînent une diminution moins significative (Briggs et al., 2018).

Bergeron et al. (2020) soulignent que la majorité des RT sont alimentés par les eaux souterraines, ce qui est également le cas de la rivière Ouelle. En effet, Linnansaari et al. (2023) ont identifié plusieurs types de refuges thermiques importants pour les salmonidés, notamment les résurgences

d'eaux souterraines (Wilbur, et al., 2020; Linnansaari, et al., 2023), les alcôves souterraines (Huntsman, 1942; Gendron, 2013; Linnansaari, et al., 2023), et les points de décharge hyporhéiques (Ebersole, et al., 2001; Linnansaari, et al., 2023), ainsi que d'autres « *patches* » d'eau froide (*cold-water patches*) (Ebersole, et al., 2007; Dugdale, et al., 2013; Kurylyk, et al., 2015; Sullivan, et al., 2021; Linnansaari, et al., 2023). Bien que les résurgences d'eaux souterraines soient des refuges efficaces pour les salmonidés, elles représentent de petits secteurs froids à échelle fine et ont une capacité limitée à abriter de grandes quantités de poissons en raison de leur superficie et profondeur réduites (Ebersole, et al., 2001; Ebersole, et al., 2003; Ebersole, et al., 2007; Linnansaari, et al., 2023). Les habitats froids sont souvent localisés près des résurgences d'eaux souterraines, des confluences avec des tributaires froids ou dans des piscines en profondeur thermiquement stratifiées, qui sont essentielles pour la survie des poissons dans des conditions climatiques changeantes (Ebersole et al., 2003; Koycheva, 2003; O'Sullivan, et al., 2019b). Cependant, les dépôts superficiels peu profonds et les roches-mères de faible perméabilité limitent la capacité de stockage des aquifères et augmentent leur sensibilité aux variations de température de l'air (Winter et al., 1998; Kurylyk et al., 2014; O'Sullivan, et al., 2019b). Enfin, dans des contextes géologiques spécifiques comme les Appalaches, les temps de résidence des eaux souterraines sont courts, influençant la capacité des zones de résurgence à agir comme refuges thermiques à long terme (Plummer et al., 2001; Briggs et al., 2018).

O'Sullivan et al. (2019a) ont développé une méthode pour identifier les apports d'eaux souterraines dans les rivières gelées en utilisant des données satellitaires publiques et des images TIR, tout en comparant la précision des données satellitaires avec celle des TIR (Figure 2-24). En appliquant une classification supervisée, ils ont pu délimiter les zones d'apport d'eau souterraine avec une précision élevée (coefficient kappa de 96,77) (Figure 2-25). Leur étude a confirmé que ces apports peuvent être identifiés dans les systèmes fluviaux tempérés du nord pendant l'hiver. Les résultats ont également montré que les panaches thermiques étaient plus longs et plus étroits en hiver, probablement en raison des différences saisonnières dans les régimes de dispersion. Cette méthode est simple et utile pour la gestion des régimes thermiques des cours d'eau lorsque la rivière est gelée. Cependant, cette méthode présente certaines limites, notamment en termes de précision des données et d'accès aux informations. En effet, l'accès aux données hivernales peut être restreint, et leur résolution spatiale élevée n'est pas toujours disponible, ce qui peut affecter la précision des

résultats. Considérant la taille des résurgences, comme illustré dans la Figure 2-26 le niveau de résolution des images est crucial pour l'application de cette méthode. Dans leur étude, les auteurs ont utilisé des images de Google Earth Pro, mais recommandent également l'utilisation de WorldView-3 ou World-View 4 pour obtenir la meilleure précision. Cette méthode s'avérait notre premier choix ; cependant, en raison de l'accessibilité limitée aux images et des coûts associés, nous avons dû opter pour une autre approche (O'Sullivan, et al., 2019b).

Figure 2-24 L'image (A) montre une image satellitaire hivernale où une fine distinction apparaît entre la berge et le cours d'eau, visible sous forme de petites ranures noires, tandis que la couverture de glace est blanche. L'image (B) représente une image thermique où les zones en rouge foncé correspondent aux résurgences d'eaux souterraines, qui sont généralement plus chaudes en hiver. L'image (C) compare les deux résultats, montrant que le niveau de précision entre les deux est comparable. L'image (A) semble plus précise, car elle identifie clairement les zones sans glace, suggérant ainsi des résurgences potentielles (O'Sullivan, et al., 2019a).

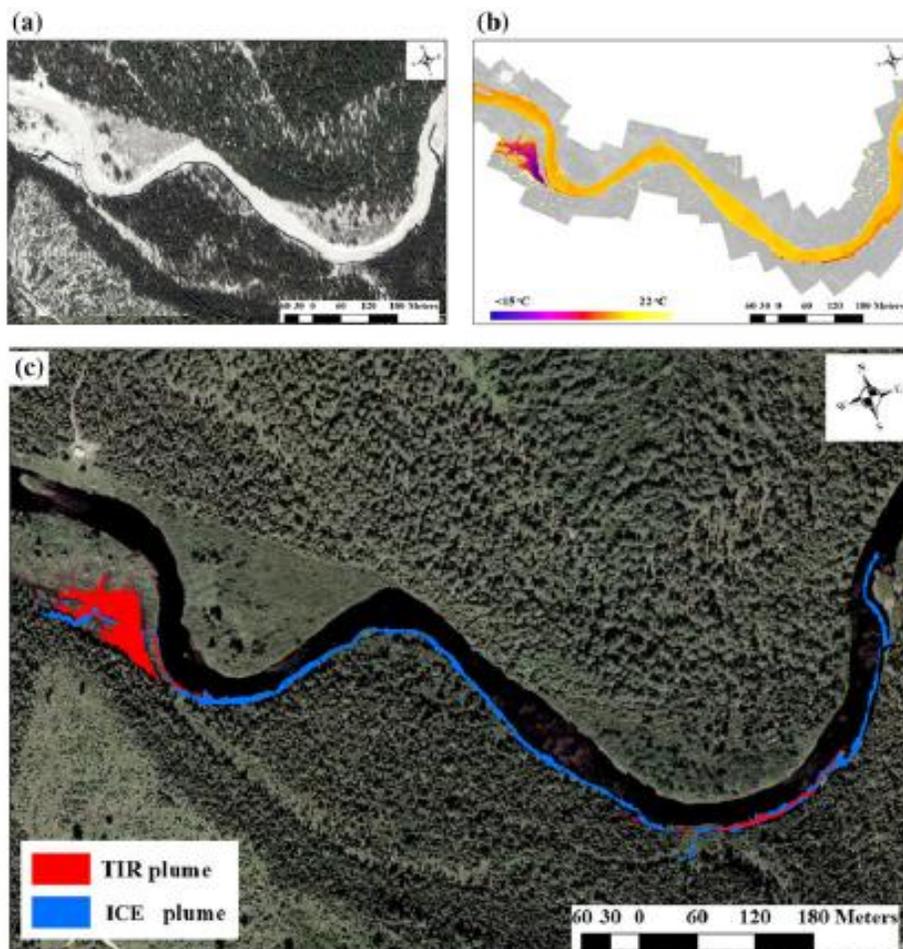


Figure 2-25 Comparaison des résultats entre les images TIR et les images satellites hivernales pour l'identification des plumes de résurgences d'eaux souterraines (O'Sullivan et al., 2019a).

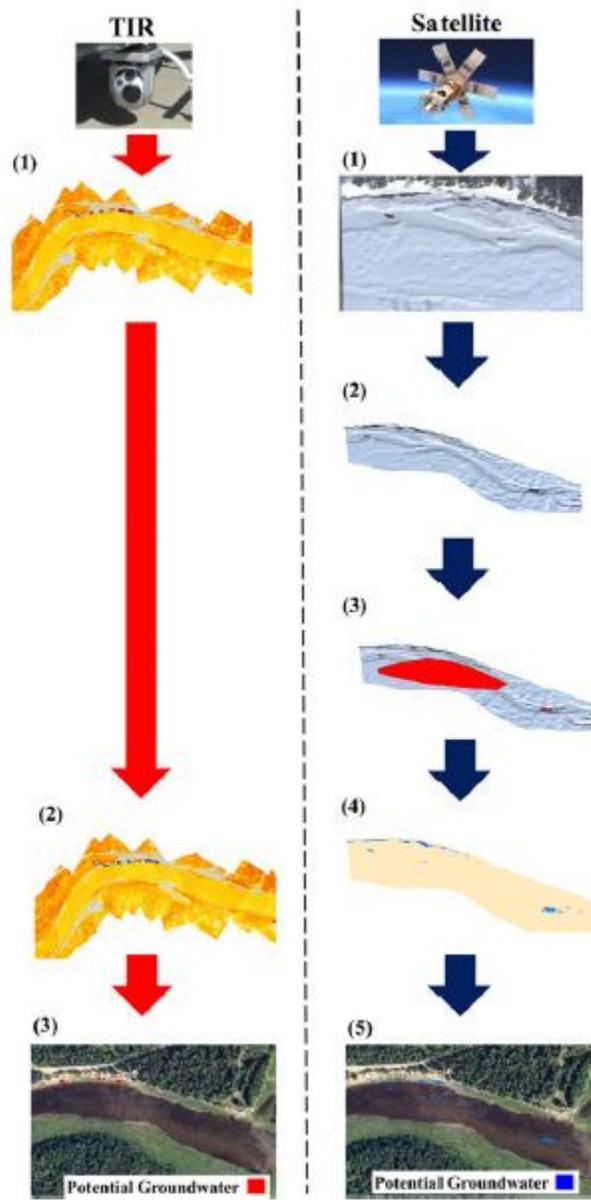
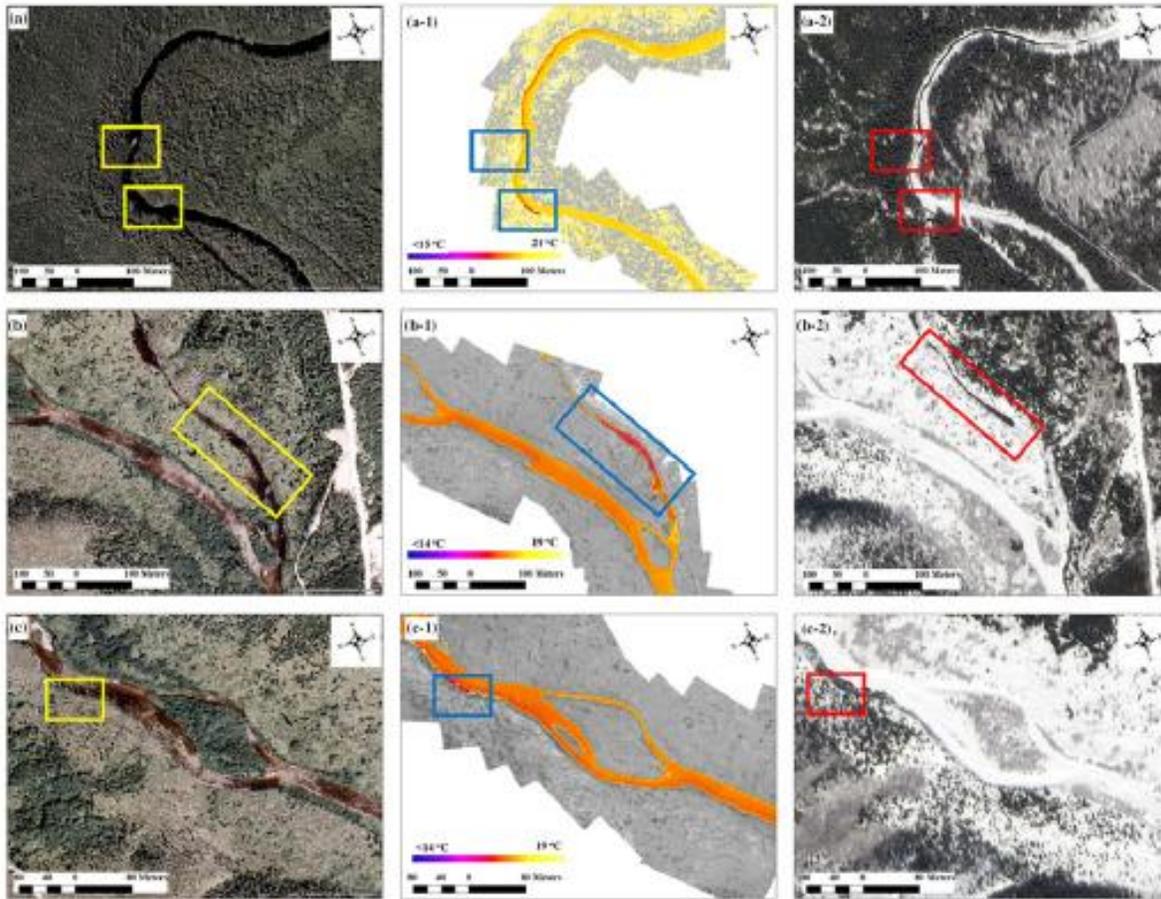


Figure 2-26 Dans cette figure, différentes identifications des plumes de résurgences d'eaux souterraines en été sont présentées dans la première colonne, comparée à des images prises au même endroit dans la deuxième colonne à l'aide de TIR. La troisième colonne montre des images satellites hivernales. Ces trois colonnes permettent de comparer les résultats d'identification des plumes de résurgences d'eaux souterraines. On observe qu'il y a peu de différence entre les résultats obtenus à partir des TIR et des images satellites hivernales (O'Sullivan, et al., 2019a).



Dans un autre domaine lié aux eaux souterraines, Briggs et al. (2018) ont utilisé des mesures sismiques passives pour évaluer l'épaisseur variable des sédiments aquifères colluviaux et alluviaux le long d'un ruisseau de tête soutenant des truites de ruisseau dépendantes de l'eau froide, dans le parc national de Shenandoah, VA, USA. Les résultats ont montré que la température de l'aquifère peu profond était sensible à la propagation de la chaleur de surface. Les modèles numériques ont prédit que les températures de l'aquifère étaient modulées par les températures de l'air locales, mais cette capacité de refroidissement pourrait diminuer avec le réchauffement climatique, affectant ainsi la capacité des sections de ruisseau à servir de RT pour les espèces de poissons d'eau froide.

Enfin, Briggs et al. (2022), ont étudié l'influence de la profondeur de la couche de la roche-mère sur la qualité et la résilience des habitats d'eau froide en été dans des ruisseaux de montagne. En mesurant la profondeur de la roche-mère le long de huit ruisseaux dans le même parc national, ils ont constaté que cette profondeur influençait les températures estivales et les schémas de déconnexion des canaux, tels que le dessèchement du lit des ruisseaux. Ils ont découvert que la profondeur de la roche-mère était mal caractérisée par les cartes de sols existantes et que des variations locales de l'hydrogéologie des vallées influençaient ces processus hydrologiques cruciaux. Cependant, bien que ces méthodes soient intéressantes, elles pourraient s'avérer plus complexes à explorer ou à envisager dans le cadre de notre étude. Par conséquent, nous nous sommes inspirés des approches de traitement des données des Projets d'acquisition de connaissance des eaux souterraines (PACES), en particulier le PACES NEBSL, pour réaliser des cartes piézométriques et de la topographie du substrat rocheux (Buffin-Bélanger et al., 2015).

Malheureusement, il n'y a pas de PACES qui ait été effectuée dans notre région d'étude (Figure 2-27), nous avons donc dû réaliser l'ensemble du processus de collecte et de traitement des données. Pour ce faire, nous avons utilisé la BD du SIH. Cette BD regroupe seize (16) champs d'information, tels que la description lithologique, la profondeur, la méthode de forage, le matériau de tubage et le niveau d'eau. Ces données proviennent principalement de rapports de forages effectués par des puisatiers pour des installations de captage d'eau potable destinées aux résidences privées (MELCC, 2022; Données Québec, 2024). Les données sont présentées sous forme de tableau, où chaque ligne correspond à un forage identifié par une clé primaire, soit le numéro de puits (Tableau 2.5). Parmi les champs d'information, nous avons sélectionné trois : la profondeur du puits, la stratification lithologique et le niveau d'eau.

Dans le cadre de notre zone d'étude, nous avons retenu les forages réalisés dans les municipalités suivantes et leurs villes : Kamouraska (La Pocatière, Rivière Ouelle, Saint-Gabriel-Lalemant, Saint-Pacôme, Sainte-Anne-de-la-Pocatière, Saint-Onésime, Saint-Philippe-de-Néri) et Islet (Tourville). À partir des informations présentées précédemment, l'utilisation des cartes piézométriques et de la topographie du substrat rocheux, ainsi que des lignes équipotentielles issues des cartes piézométriques et des courbes de niveau dérivées de la topographie du substrat rocheux,

permet d'identifier le sens de l'écoulement des eaux souterraines. Celui-ci se fait perpendiculairement à ces lignes (Figure 2-28), et les ruptures de pente sur ces lignes peuvent indiquer les sites potentiels de résurgence (Winter et al., 1998; Buffin-Bélangier et al., 2015).

Figure 2-27 Projets PACES déjà réalisés, représentés par des polygones orange, tandis que les polygones rouges indiquent ceux qui sont en cours. Cependant, il est à noter que la carte n'a pas été mise à jour depuis sa date de publication (Gouvernement du Québec, 2018).

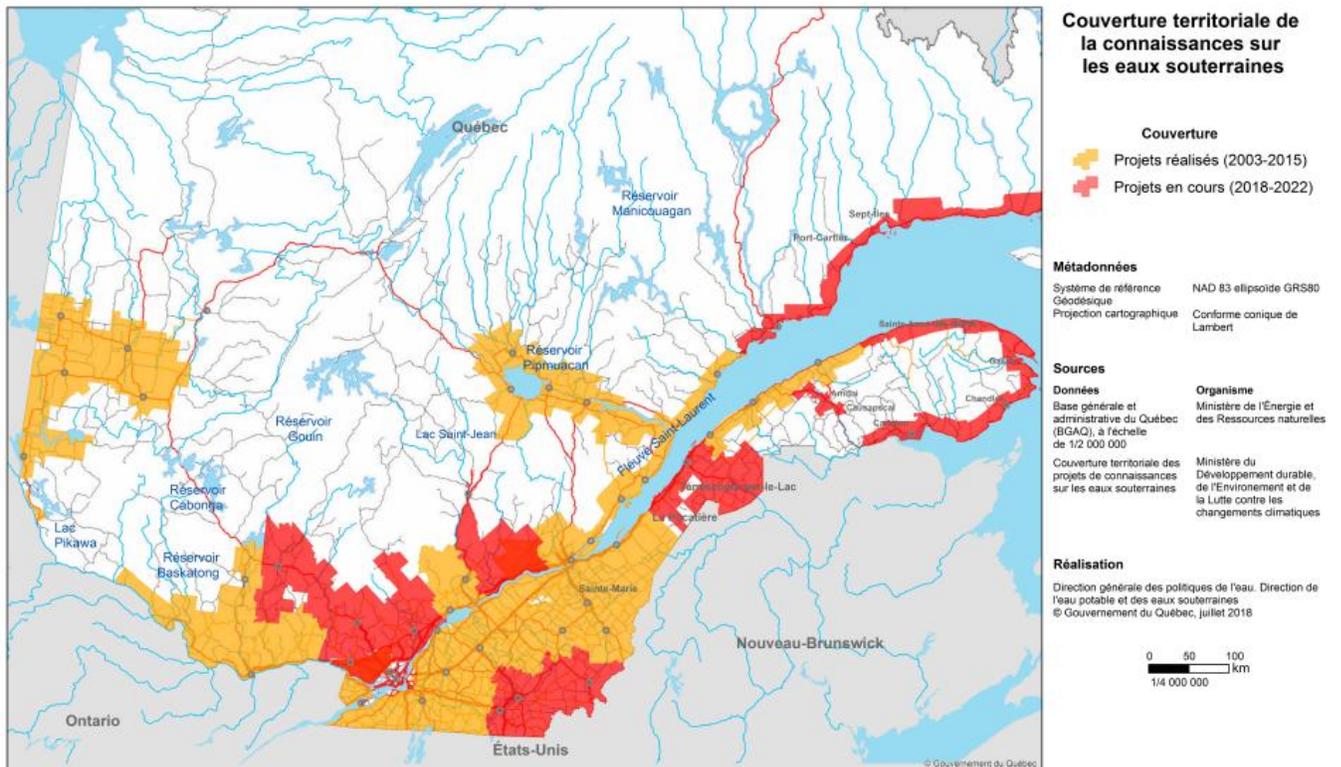
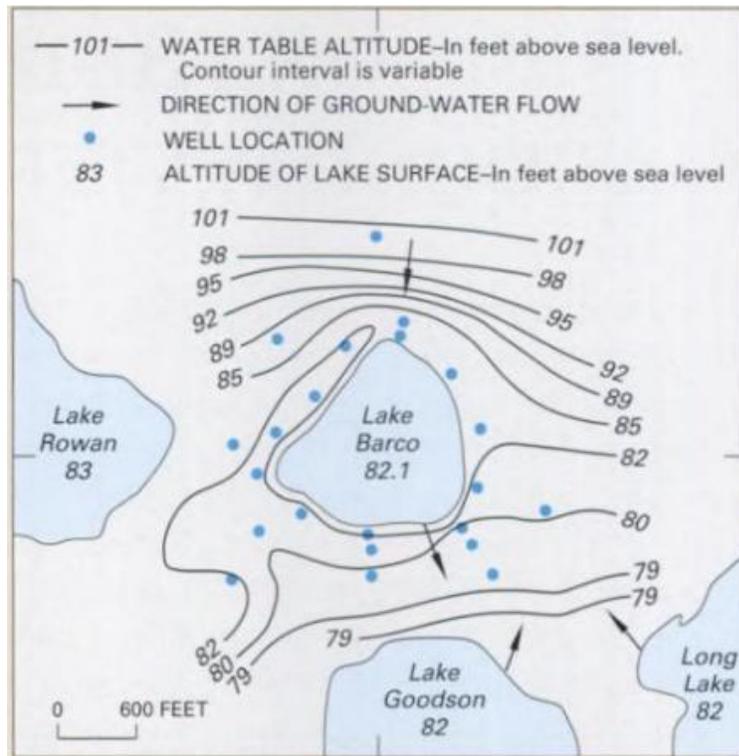


Tableau 2.5 Exemple de la table des puits de forage de la base de données du SIH : On observe la colonne # qui identifie le numéro de la ligne, suivie de deux colonnes de coordonnées x et y, de l'identifiant unique du puits, de la profondeur totale du forage, du niveau d'eau (si disponible) et de sa profondeur. Viennent ensuite la séquence de la stratigraphie identifiée dans le forage, l'épaisseur de chaque ligne stratigraphique et l'identification du type de dépôt. Ces trois dernières colonnes (séquence, épaisseur et description) se répètent jusqu'à ce que toutes les lignes stratigraphiques des types de dépôts soient identifiées dans le forage.

#	COORDONNEE x (m)	COORDONNEE y (m)	IDENTIFIANT DU PUITS	PROFONDEUR (m)	NIVEAU D'EAU A LA FIN DES TRAVAUX (m)	SEQUENCE STRATIGRAPHIQUE	EPAISSEUR COUCHE (m)	DESCRIPTION MATERIAU	SEQUENCE STRATIGRAPHIQUE	EPAISSEUR COUCHE (m)	DESCRIPTION MATERIAU
1	340692	5239590	2010-150- 36410023	47.3	-3.05	1	1.5	SABL_Inconnu	2	45.7	SHLE_Inconnu
2	340768	5239490	2000-110- 36409556	47.3	-6.1	1	0.6	DEPO_Inconnu	2	46.6	ROCH_Inconnu
3	341162	5239800	2002-110- 36400806	47.3	-3.05	1	3.7	REMB_Inconnu	2	43.6	ROCH_Inconnu
4	341360	5239960	1978-100- 11202945	9.1	Inconnu	1	0.3	REMB_Inconnu	2	1.8	SABL_Inconnu
5	341420	5240030	2006-150- 36410029	32	Inconnu	1	0.6	SABL_Inconnu	2	31.4	SHLE_Inconnu

Figure 2-28 Exemple du sens de l'écoulement des eaux souterraines (flèches) par rapport aux lignes équipotentielles (lignes noires), définies à partir des points de forage (points bleus) (Wondzell et al, 2013).



2.4.2.1.1 Cartographie de l'élévation du substrat rocheux

La cartographie de l'élévation du substrat rocheux est un élément clé pour comprendre la dynamique des eaux souterraines dans le bassin versant. Les formations rocheuses influencent non seulement la direction et la vitesse des flux souterrains, mais elles conditionnent également la localisation des résurgences. Par exemple, des substrats rocheux fracturés facilitent les remontées d'eau souterraine vers la surface, créant des RT dans les cours d'eau (Winter, et al., 1998; Buffin-Bélanger et al., 2015; Bergeron, et al., 2020). B. Dans cette étude, les formations géologiques ont été cartographiées à partir de données géologiques régionales et ont été intégrées dans le modèle pour simuler les flux souterrains.

Pour cette carte, nous avons reclassé et clarifié les informations issues de la base de données du SIH. Concrètement, nous avons décliné chaque ligne de forage en fonction de ses lignes de séquences identifiées, de sorte que chaque séquence soit présentée dans une ligne individuelle. Une nouvelle colonne a également été ajoutée (« Roc ») pour indiquer si le forage atteint le roc, en remplissant cette colonne par « y » pour oui ou « n » pour non, ce qui signifie respectivement « contact » ou « non-contact » avec le substrat rocheux. Nous disposons d'un total de 1223 forages, qui, lorsqu'ils sont déclinés en séquences, donnent un total de 1286 lignes. Parmi celles-ci, nous avons identifié 1138 lignes qui touchent le roc. Par la suite, nous avons effectué un tri excluant uniquement les forages qui atteignent le roc.

Cela nous a permis de connaître les profondeurs et les niveaux où commence le substrat rocheux. Nous avons conservé les identifiants uniques de puits, ainsi que les coordonnées afin de pouvoir établir des jointures au besoin, et d'être en mesure de les représenter spatialement dans ArcGIS Pro (Figure 2-29). Cette nouvelle couche, nous l'avons créée en utilisant l'outil *XY Table to points* (Table XY vers point), que nous avons nommés « Forages_roc_interpolation ». Finalement, nous avons également utilisé l'outil *Contour* (Isoligne) sur la couche résultante de la topographie du substrat rocheux afin de créer les courbes de niveau. Celles-ci permettront d'identifier les bris de pentes associés aux résurgences d'eau souterraine, mais aussi d'avoir une idée du sens de l'écoulement, qui se fait de façon perpendiculaire aux contours (Winter et al., 1998 ; Buffin-Bélanger et al., 2015).

Figure 2-29 Exemple de la table créée pour l'interpolation des valeurs de profondeur (en mètres) de forage touchant le roc. On y identifie la colonne « num_ligne », permettant de suivre de manière précise le transfert des données originales des feuilles du SIH vers la nouvelle table créée. On y retrouve également les coordonnées x et y, l'identifiant unique du puits, la profondeur du puits, ainsi que la colonne « roc », qui indique si le puits touche ou non le roc.

	A	B	C	D	E	F
1	Num_ligne	X	Y	ID_puits	Profondeur	Roc
2	A1	338275	5247590	2005-150-36410062	7.9	y
3	A2	338725	5248440	1985-300-10000030	43.6	n
4	A3	339430	5246670	1984-100-28804310	0.6	y
5	A4	339501	5247100	1985-300-10000028	17.1	n
6	A5	339758	5250370	1985-300-10000038	30.9	n
7	A6	340011	5246730	2019-150-36410043	39	y
8	A7	340106	5247880	1987-100-36400675	6.1	y
9	A8	340150	5250840	1985-100-36405808	2.4	y
10	A9	340362	5247590	1984-100-36404312	3	y
11	A10	340362	5247590	1984-100-36404313	3	y

2.4.2.1.2 Cartographie du niveau piézométrique

La carte piézométrique représente les niveaux d'eau souterraine à travers le bassin versant. Elle est utilisée pour identifier les zones de recharge et de décharge des nappes phréatiques, permettant de localiser les points où les résurgences sont les plus probables. Cette information est essentielle pour modéliser l'impact des eaux souterraines sur la température des rivières, car les zones de décharge sont souvent associées à des RT. Les données piézométriques utilisées dans cette étude proviennent du SIH et ont été combinées avec les données topographiques pour cartographier précisément les zones de résurgence. Le traitement des données a été similaire à celui utilisé pour le substrat rocheux. Cependant, cette fois, nous avons ciblé les valeurs de niveau d'eau, soit les niveaux piézométriques. Nous avons suivi le même processus en créant une couche de points à l'aide des coordonnées x et y et de l'outil *XY Table to Point*, puis en interpolant ces valeurs avec l'outil *Topo to Raster* (Topo vers Raster) (Figure 2-30).

Figure 2-30 Exemple de la table créée pour l'interpolation des valeurs de profondeur (en mètres) de forage qui atteignait de l'eau souterraine. On y identifie la colonne « num_ligne », permettant de suivre de manière précise le transfert des données originales des feuilles du SIH vers la nouvelle table créée. On y retrouve également les coordonnées x et y, l'identifiant unique du puits, la profondeur du puits, ainsi que la colonne « eau », qui indique si le puits atteint l'eau ou non.

Num_ligne	X	Y	ID_puits	Profondeur	Eau
A1	338275	5247590	2005-150-36410062		n
A2	338725	5248440	1985-300-10000030	0.3	y
A3	339430	5246670	1984-100-28804310		n
A4	339501	5247100	1985-300-10000028		n
A5	339758	5250370	1985-300-10000038	2.44	y

2.4.3 Géologie du Quaternaire

Les caractéristiques géologiques du bassin versant, telles que la composition et l'épaisseur des dépôts meubles, influencent directement les processus d'infiltration et d'écoulement des eaux, ainsi que leur capacité à se refroidir en circulant dans le sol. Deux variables géologiques majeures sont prises en compte dans cette étude : les types de dépôts meubles (regroupés en hydrofaciès) et leur épaisseur, car elles affectent la dynamique hydrologique et la capacité des eaux à s'infiltrer, se refroidir, puis resurgir dans les cours d'eau. En effet, les dépôts superficiels peu profonds, ayant un potentiel d'accumulation limité (Winter et al., 1998), favorisent des trajectoires d'écoulement proches de la surface (Dunne, et al., 1978; Winter, et al., 1998).

Cela rend l'eau plus sensible aux variations de la température de l'air, entraînant des réchauffements en été et des refroidissements en hiver (Kurylyk et al., 2014; Briggs et al., 2017; O'Sullivan, et al., 2019b). La distribution des aquifères et des aquitards dépend de la lithologie, de la stratigraphie et de la structure géologique. Ces éléments influencent la géométrie des systèmes hydrogéologiques, comme les aquifères régionaux dans les roches sédimentaires, les aquifères de surface (sédiments alluviaux), ou dans les structures géologiques (failles et déformations). Les inconformités, zones stratigraphiques altérées ou fracturées, favorisent le stockage ou la recharge, tandis que dans les terrains complexes, l'analyse structurale aide à localiser les aquifères. Ceci met en évidence

l'importance de mettre en relation des facteurs hydrogéologiques avec les facteurs géologiques (Hamblin, 1976; Freeze et al., 1979).

Chaque type de dépôt présente des caractéristiques uniques en fonction de sa nature et de son origine. Dans le CHAPITRE 1, les différents types de dépôts présents dans la zone d'étude ont déjà été identifiés. Voici donc une description de ces dépôts, en lien avec leur perméabilité, leurs capacités de résurgence d'eau, d'accumulation et leurs autres propriétés hydrogéologiques. Ces éléments jouent un rôle déterminant dans la gestion des eaux souterraines et leur circulation dans la région étudiée.

Selon Ferlatte et al. (2014), les sédiments alluviaux, formés par le transport et le dépôt de matériaux par les cours d'eau, peuvent être composés de gravier, de sable ou d'argile. Lorsqu'ils sont suffisamment grossiers, ces sédiments peuvent constituer des aquifères. Après le retrait des glaciers, les eaux de fonte ont transporté de grandes quantités de sédiments qui se sont accumulées dans des plans d'eau temporaires, tels que les mers postglaciaires (e.g. Goldwaith, Champlain). Ces dépôts, tels que les sables littoraux et les deltas, peuvent également former de grands aquifères. En revanche, les argiles et les silts, issus des mers et lacs proglaciaires, ont une faible conductivité hydraulique, mais une capacité de stockage d'eau importante. Ils agissent donc comme des aquitards, limitant la recharge des nappes phréatiques tout en offrant une protection contre l'infiltration des contaminants. Enfin, les tills glaciaires, constitués de roches broyées et de fragments issus du passage des glaciers, sont généralement peu perméables, bien que les tills « remaniés », où les particules fines ont été lessivées par les eaux fluvio-glaciaires, puissent présenter une perméabilité plus élevée. Ces différents dépôts jouent un rôle clé dans l'accumulation, la circulation et la gestion de l'eau souterraine dans la région étudiée.

2.4.3.1 Hydrofaciès : classification des dépôts meubles

Nous avons classé (ou regroupé) les dépôts en hydrofaciès, c'est-à-dire en unités aux propriétés hydrauliques similaires en termes de porosité et de perméabilité, afin d'identifier les sites les plus propices aux résurgences des eaux souterraines (Klingbeil, et al., 1999). En effet, la nature des dépôts, tels que les sables, les graviers, ou les argiles sont essentiels pour comprendre comment l'eau de surface interagit avec le sol et la roche en dessous. Les dépôts perméables, tels que les

sables et graviers, permettent à l'eau de s'infiltrer rapidement et de se refroidir au contact du sol avant de revenir dans le réseau hydrographique. En revanche, les dépôts argileux ou imperméables limitent cette infiltration et favorisent un écoulement de surface plus rapide, ce qui peut entraîner un réchauffement plus important de l'eau. Dans cette étude, les types de dépôts meubles ont été cartographiés à partir de données géologiques détaillées et intégrés dans le modèle pour simuler leur impact sur les flux hydrologiques et thermiques. Bien que la carte écoforestière identifie certains dépôts meubles dans la région, sa précision reste limitée (MRNF, 2017; MRNF, 2024). De plus, comme mentionné précédemment, aucune étude PACES n'a été réalisée dans ce secteur (Gouvernement du Québec, 2018). Afin de pallier cette lacune, nous avons réinterprété ces dépôts à l'aide des données de relief ombragé (*Hillshade*) générées à partir du MNT disponible dans Forêt Ouverte. Nous avons également utilisé le « Guide d'utilisation du LiDAR pour l'interprétation des dépôts de surface et des bancs d'emprunt » (MFFP, 2017), afin d'identifier les formes et textures caractéristiques de certains types de dépôts de surface. Enfin, grâce à la littérature, nous avons pu déterminer la séquence chronologique de l'accumulation et de l'évolution de ces dépôts (Dionne et al., 2001; Bélanger, 1983; Dionne, 2002; Bourque, 2010; Bérubé et al., 2021).

2.4.3.2 Épaisseur des dépôts meubles

L'épaisseur des dépôts meubles est également un facteur déterminant pour la régulation thermique. Une plus grande épaisseur de dépôts meubles permet un refroidissement plus important de l'eau par infiltration dans les couches profondes, alors qu'une couche mince permet à l'eau de circuler plus rapidement vers la surface sans bénéficier d'un refroidissement significatif. Dans cette étude, l'épaisseur des dépôts meubles a été estimée à partir de relevés géologiques (forages) et intégrée dans la modélisation des flux hydrologiques. De manière similaire aux cartes de la piézométrie et de la topographie du substrat rocheux effectués antérieurement, nous nous sommes inspirés de la méthode que celle employée pour le PACES-NEBSL (Buffin-Bélanger et al., 2015).

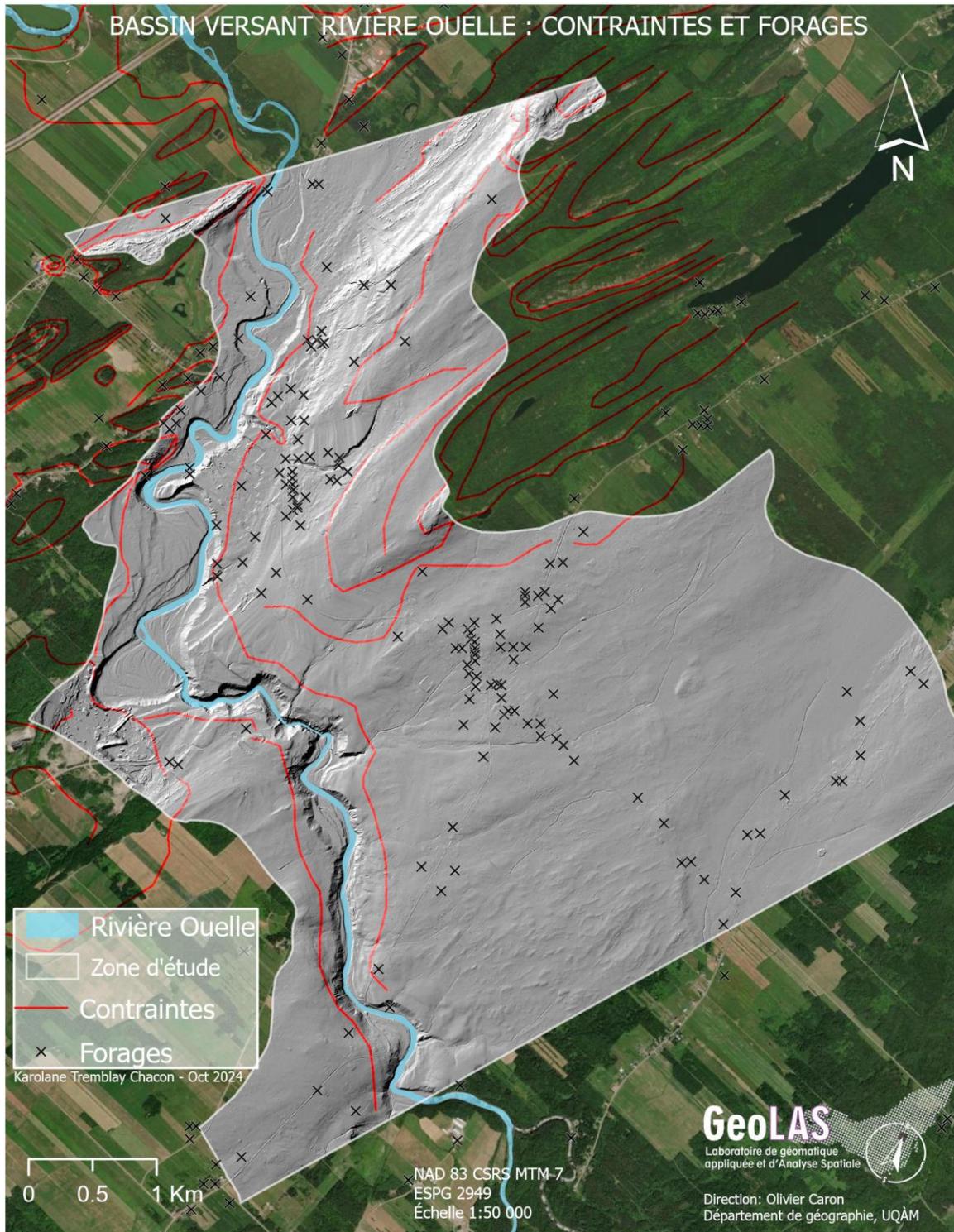
Cependant, pour la carte de l'épaisseur des sédiments, l'interpolation repose sur l'utilisation des épaisseurs totales des sédiments, calculées par lignes. Nous avons également créé une colonne « Top_m » qui indique la valeur où commence la séquence lithologique, jusqu'à la fin de chaque ligne dans la colonne « Bottom_m », identifiée par l'identifiant unique du puits (Figure 2-31). Les

valeurs sont en mètres, puis nous avons utilisé la colonne Bottom_m pour l'interpolation. De plus, avant de procéder à l'interpolation de ces valeurs, afin d'assurer que la distribution des dépôts soit logique, nous avons identifié une série de contraintes correspondant à des zones où les dépôts sont plus minces (Figure 2-32).

Figure 2-31 Exemple de la table créée pour l'interpolation des valeurs d'épaisseur des dépôts meubles montre plusieurs éléments clés. On y trouve la colonne « num_ligne », qui permet de suivre avec précision le transfert des données originales des feuilles du SIH vers la nouvelle table. Cette table contient également les coordonnées x et y, l'identifiant unique du puits, ainsi que les épaisseurs des dépôts mesurées du début à la fin, spécifiées dans les colonnes « Top_m » et « Bottom_m » en mètres. Enfin, une colonne description est incluse pour fournir des informations complémentaires sur chaque ligne.

	A	B	C	D	E
1	Num_ligne	ID_puits	Top_m	Bottom_m	Description
2	A1	2005-150-36410062	2.4	7.9	ARGL/GRA_Inconnu
3	A2	1985-300-10000030	0	43.6	ARGL_Inconnu
4	A3	1984-100-28804310	0	0.6	SABL_Inconnu
5	A4	1985-300-10000028	0	17.1	ARGL_Inconnu
6	A5	1985-300-10000038	3.5	30.9	ARGL_Inconnu
7	A6	2019-150-36410043	30.5	39	SABL_Inconnu
8	A7	1987-100-36400675	0	6.1	ARGL_Inconnu
9	A8	1985-100-36405808	0	2.4	TERR_Inconnu
10	A9	1984-100-36404312	0	3	ARGL_Inconnu
11	A10	1984-100-36404313	0	3	ARGL_Inconnu

Figure 2-32 Distribution des forages pour l'interpolation des épaisseurs de dépôts et les contraintes identifiées pour assurer la logique de la distribution des valeurs. Ces contraintes permettent de minimiser les erreurs dues à une distribution inégale des forages.



2.4.4 Géomorphologique

Les facteurs géomorphologiques, et en particulier la pente et l'orientation du relief, influencent directement la dynamique des écoulements et l'exposition des cours d'eau au rayonnement solaire. Le gradient de pente du cours d'eau joue un rôle majeur dans la vitesse des flux et leur capacité à évacuer ou à accumuler la chaleur. Plus la pente est raide, plus les écoulements sont rapides, limitant ainsi l'échauffement de l'eau par le rayonnement solaire.

La pente d'un terrain joue un rôle majeur dans la gestion thermique des cours d'eau en affectant la vitesse de l'écoulement. Dans les zones à forte pente, l'eau s'écoule rapidement, réduisant ainsi l'exposition prolongée au rayonnement solaire et favorisant des températures plus basses. À l'inverse, les terrains plats permettent à l'eau de stagner plus longtemps à la surface, ce qui conduit à une plus grande accumulation thermique. Les vallées à pentes abruptes peuvent intensifier l'impact thermique des rivières sur leurs berges en raison du mouvement d'air froid qui descend le long des pentes lors des journées chaudes (Moore et al., 2005; Tsai, et al., 2017). Dans les vallées à faible pente, cependant, l'impact thermique est moins marqué, et certaines études n'ont observé aucune différence de température entre les sites riverains et non-riverains (Tsai, et al., 2017). Toutefois, Brooks, et al. (2009) montrent aussi que l'influence thermique des rivières reste significative, même dans des zones avec des pentes modérées, comme celles des sites ruraux et urbains, avec des pentes respectives de 7,7 % et 3,5 %. Cela suggère qu'il s'agit plutôt d'un facteur qui dépend des circonstances spécifiques.

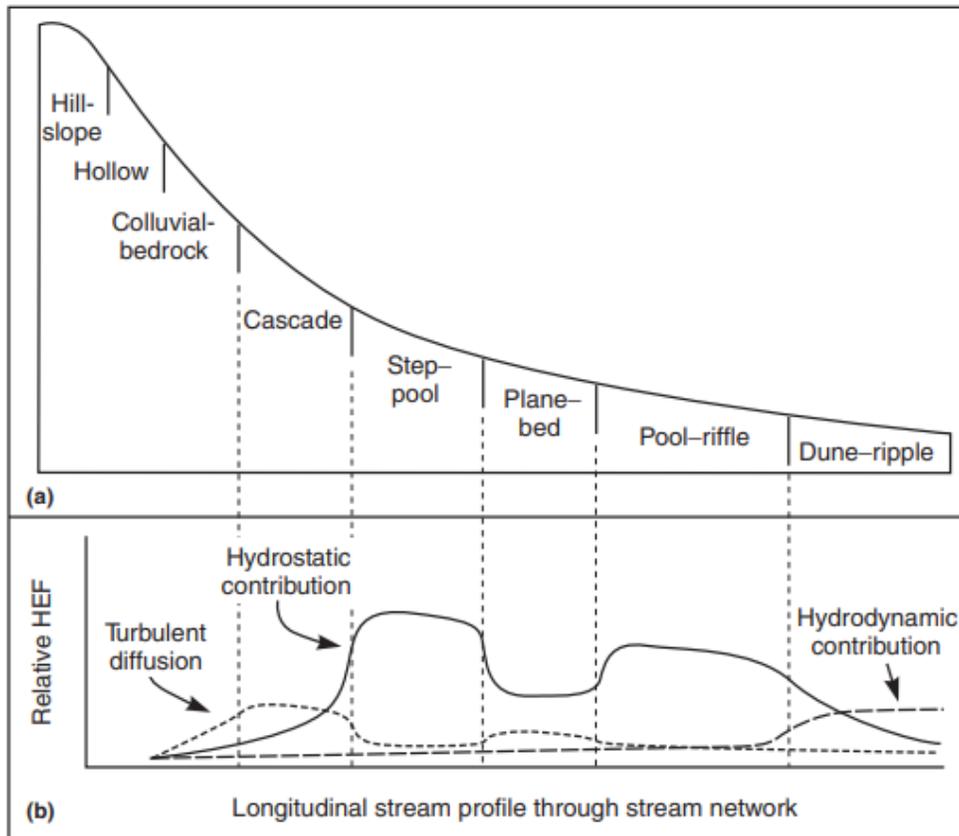
Par ailleurs, un autre facteur géomorphologique important est l'orientation des pentes dans le bassin versant qui influence de manière significative sur l'échange d'énergie et, par conséquent, sur la température des cours d'eau. Les sections de rivière orientées vers le sud sont plus exposées au rayonnement solaire, ce qui peut entraîner un réchauffement accru de l'eau. Garner et al. (2017) ont montré que cette orientation affecte l'efficacité de l'ombre fournie par la canopée riveraine. Par exemple, une couverture forestière de 30 % peut s'avérer aussi efficace qu'une couverture de 60 % lorsqu'elle ombrage le cours d'eau aux heures critiques d'ensoleillement (c'est-à-dire le matin et le soir, lorsqu'il est orienté vers le sud-est et le sud-ouest). En revanche, une couverture dense est moins efficace si elle n'apporte pas d'ombre durant ces périodes (Garner et al., 2017).

Une étude de Bilir et al. (2021) a approfondi cet effet en comparant les températures sur les pentes nord et sud de la réserve Angelo Coast Range de l'Université de Californie. Les chercheurs ont observé que les pentes sud peuvent être jusqu'à 7 °C plus chauds que les pentes nord en septembre, ce qui souligne l'importance de l'orientation dans la régulation thermique des cours d'eau. Ainsi, l'orientation de la pente est un facteur crucial, en particulier dans les écosystèmes sensibles au réchauffement, pour moduler la température de l'eau par l'ombrage végétal.

Finalement, l'échange hyporhéique résulte principalement des gradients de pression qui poussent l'eau à travers le lit du cours d'eau (Figure 2-33). La quantité d'eau pénétrant dans la zone hyporhéique dépend de la pente du gradient de pression et de la conductivité hydraulique du lit et de l'aquifère sous-jacent. Ces gradients peuvent être générés par divers processus, mais deux d'entre eux, les processus hydrostatiques et hydrodynamiques, sont les plus influents. Dans les cours d'eau à forte pente, des formes de chenaux comme les séquences de cascades ou de plans de bassin créent des gradients hydrostatiques très prononcés. En raison de la rugosité du lit et de la faible profondeur de l'eau, les vitesses d'écoulement dans ces cours d'eau plus petits et plus abrupts sont généralement plus lentes que dans les cours d'eau à faible pente et plus larges (Leopold, et al., 1953; Wondzell et al., 2013).

Par contre, dans les cours d'eau à faible pente, il est plus difficile pour les processus naturels de provoquer des changements importants dans le gradient longitudinal thermique. Dans ces cas, l'écoulement interagit avec les formes du lit telles que les dunes ou les ondulations, et les forces hydrodynamiques prennent alors le relais pour générer des gradients de pression. Ainsi, les effets hydrostatiques dominent dans les chenaux à forte pente, tandis que les processus hydrodynamiques prédominent dans ceux à faible pente. En outre, comme les types de chenaux et les gradients longitudinaux varient systématiquement au sein des réseaux de cours d'eau, on s'attend à ce que les effets hydrostatiques soient plus prononcés en amont, avec une prédominance des processus hydrodynamiques en aval (Wondzell et al., 2013).

Figure 2-33 (Graphique a) la répartition des différents types de canaux le long d'un ruisseau en montagne, en fonction du gradient de pente, et (b) comment les processus hydrostatatiques et hydrodynamiques influencent l'échange d'eau entre le lit du ruisseau et la zone hyporhéique, en fonction du type de canal (Wondzell, et al., 2013).



2.4.4.1 Gradient de pente du cours d'eau

Différentes méthodes permettent de calculer le gradient de pente d'un cours d'eau, certaines reposant sur des outils SIG comme ArcHydro dans ArcGIS Pro, utilisant des paramètres tels que la direction d'écoulement, les dépressions, l'accumulation d'écoulement et les lignes de courant (Yager, 2002). D'autres approches, comme celle de Gohen et al. (2018), utilisent le script Python GloRS (Global River-Slope) pour automatiser ce calcul à l'échelle mondiale à partir d'un MNT. Toutefois, cette méthode perd en précision avec des MNT de faible résolution ou lorsque la taille des pixels inclut à la fois la rivière et son environnement, influençant la fiabilité des résultats (Moore et al., 1991; Gohen et al., 2018).

Le gradient de pente, calculé en divisant la différence d'altitude entre deux points par la longueur du segment, peut être déterminé à partir de données de terrain, de photographies aériennes ou d'un MNT. Gohen et al. (2018) soulignent que la longueur des segments influence la précision et recommandent de les ajuster au contexte géographique. Dans cette étude, leur méthode a été simplifiée et adaptée à ArcGIS Pro pour un traitement manuel sans script. Le calcul du gradient de pente a été réalisé en deux étapes : (1) déterminer les gradients pour chaque segment et (2) rastériser les résultats pour leur intégration dans la formule de l'AMC pondérée.

Indépendamment de la méthode choisie, la formule pour calculer le gradient de pente reste la même et est couramment utilisée en géomorphologie fluviale (Endreny, 2003; Gohen et al., 2018). Ce calcul consiste à diviser la différence d'altitude entre les points amont et aval d'un segment de rivière par la longueur de ce segment. Les paramètres nécessaires peuvent être obtenus sur le terrain, via des photographies aériennes combinées à une carte topographique, ou en utilisant un MNT. Dans leur méthode, Gohen et al. (2018) expliquent qu'ils ont utilisé la même formule, en divisant le réseau hydrographique en segments à chaque confluence. Cependant, ils soulignent que certains segments peuvent être trop longs, ce qui peut réduire la précision du résultat. Il revient donc à l'utilisateur de déterminer la distance appropriée pour chaque segment dans le contexte.

Nous avons donc choisi de simplifier leur méthode et de l'adapter à ArcGIS Pro, ce qui nécessite un travail plus manuel, sans recourir à un script. Le calcul du gradient de pente et son traitement de pour l'inclure dans la formule de l'AMC pondérée se divise en deux parties : la première consiste

à déterminer le gradient de pente, tandis que la seconde consiste à rasteriser le résultat afin de l'intégrer dans la formule de l'AMC pondéré.

2.4.4.1.1 Calcul du gradient de pente

Dans la formule, $P1$ correspond à l'altitude maximale située en amont du segment, $P2$ à l'altitude minimale située en aval du segment, et DS représente la distance du segment entre les deux points, soit la longueur du segment (Formule 2.2) (Endreny, 2003; Gohen et al., 2018). Pour les données, nous avons utilisé le MNT dérivé des données LiDAR, disponible dans la zone de forêt ouverte, avec une résolution de 1 m x 1 m pour obtenir les valeurs des paramètres (Endreny, 2003; Gohen et al., 2018; MFFP, 2020). De plus, nous avons intégré les données du GRHQ, qui fournissent une géodatabase (gdb) vectorielle offrant un réseau hydrographique détaillé sous forme de polygones, que nous avons adapté à la zone d'étude, où le tronçon de rivière étudié mesure 1 351,6 m (MERN, 2019).

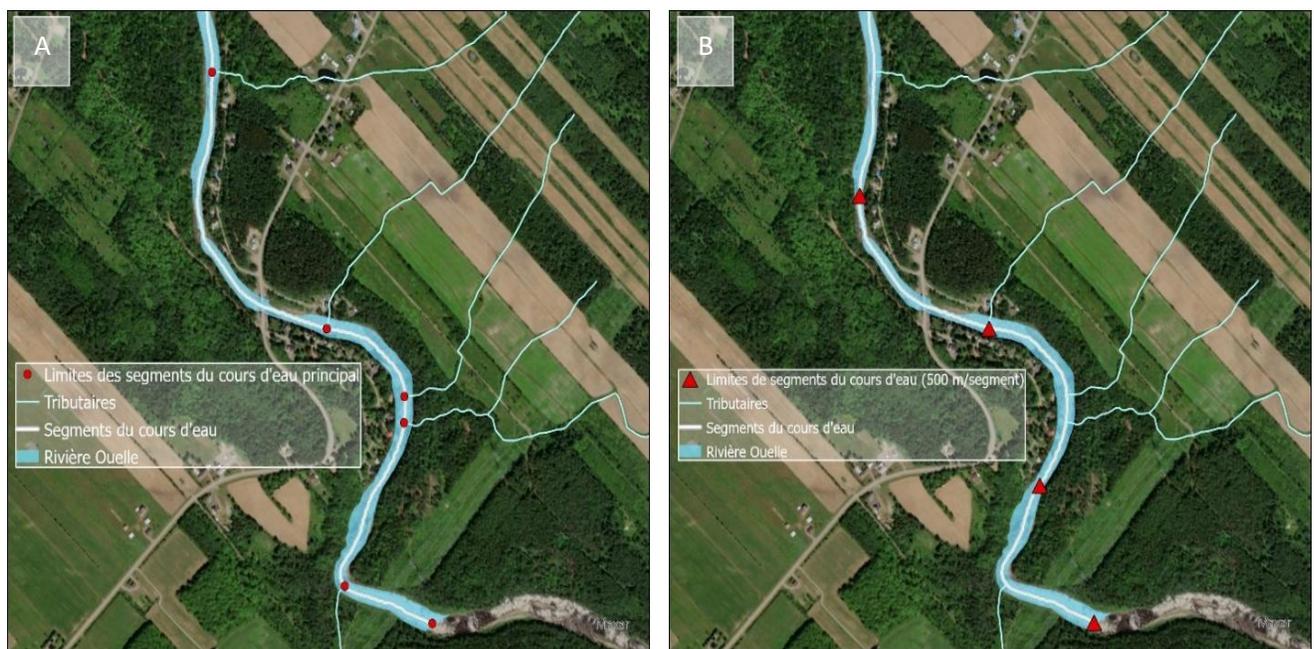
Formule 2.2 Calcul du gradient de pente où $P1$ représente le point amont du segment, $P2$ représente le point en aval du segment et DS représente la distance du segment, multipliés par 100 pour avoir un résultat en pourcentage.

$$\text{Gradient de pente} = \frac{(P1 - P2)}{DS} * 100$$

2.4.4.1.1.1 Étape 1 : Numérisation des segments

Pour définir les segments, deux approches ont été envisagées. La première consistait à établir des segments naturels en fonction des confluences, en attribuant un point à chaque confluence. Cette méthode a impliqué la création de deux couches à partir du réseau hydrographique linéaire : une pour le cours d'eau principal et une pour les confluences. Ensuite, l'outil *Intersect* (Intersection) a permis de créer une couche de points représentant les intersections entre le cours d'eau principal et les confluences. Cependant, les distances entre ces points étaient très variées, ce qui a rendu difficile la comparaison entre les segments (Figure 2-34).

Figure 2-34 Image (A): Segmentation du cours d'eau selon les points de confluence entre le cours d'eau principal et ses tributaires, représenté par une ligne blanche. Les segments présentent des variations de longueur, ce qui peut compliquer leur comparaison. Les points rouges marquent les limites amont et aval de chaque segment, certaines assumant un double rôle en délimitant à la fois la fin d'un segment et le début du suivant. La rivière Ouelle (polygone bleu pâle) et ses tributaires (lignes bleu pâle) sont également identifiés; Image (B): Segmentation du cours d'eau réalisée tous les 500 m, permettant une comparaison aisée entre les segments selon les valeurs de pente qui leur seront attribuées, mais aussi en fonction des liens établis avec d'autres facteurs physiques. Les limites des segments sont représentées par des triangles rouges, jouant également un rôle double en marquant à la fois la fin d'un segment et le début du suivant. La distribution des tributaires par segment, déjà observée précédemment, est également mise en évidence.



La deuxième option, qui a été retenue, consistait à créer des segments égaux en générant des points (couche points) à intervalles réguliers le long du cours d'eau principal, à l'aide de l'outil *Generate Points Along Lines* (Générer des points le long des lignes). Une distance de 500 mètres entre chaque point a été choisie (Figure 2-34). Cet outil permet de générer des points espacés régulièrement sans découper la polygône du cours d'eau. En activant les options « Include end points » et « Add accumulated distance and sequence fields », nous avons pu créer une nouvelle couche de points qui se trouvent au début et à la fin de chaque tronçon du cours d'eau, créer une colonne pour les distances cumulées et visualiser la distance entre chaque point (Figure 2-34).

Dans la table attributaire, nous avons créé une nouvelle colonne intitulée « Elevationp », pour attribuer un identifiant unique à chaque point utilisant des lettres de A à Z. Afin de garantir des mesures précises entre les points *P1* et *P2* de chaque segment, la couche linéaire du cours d'eau a été découpée en fonction des points. La distance entre ces derniers a été vérifiée, restant généralement constante à 500 m, à l'exception de quelques variations : certains segments mesuraient 499 m, tandis que le dernier atteignait 350 m. Cette démarche a permis de déterminer avec précision les valeurs du paramètre *L* pour chaque segment.

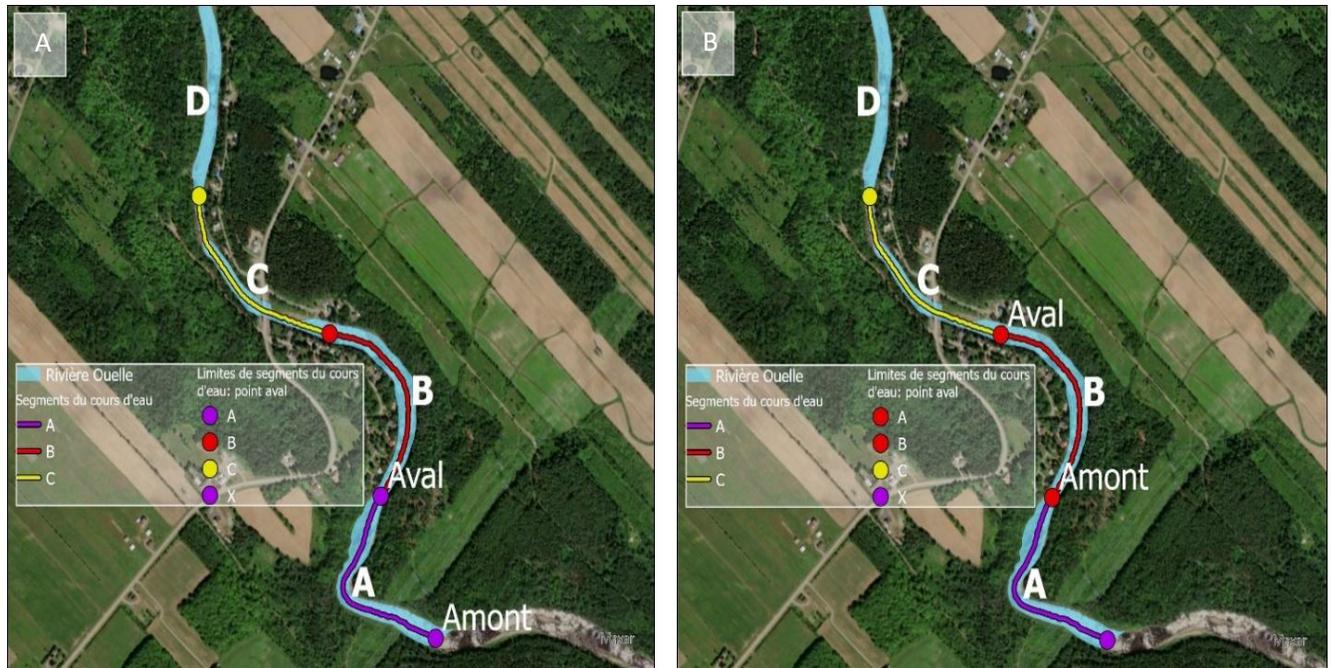
2.4.4.1.1.2 Étape 2 : Paramètres *P1* et *P2*

Ensuite, nous avons extrait les valeurs d'altitude du MNT pour chaque point identifié en utilisant l'outil *Extract Values to Points* (Extraction de valeurs vers des points). Cet outil a généré une nouvelle colonne intitulée « RASTERVALU », qui indique la valeur d'altitude du MNT à chaque emplacement des points. Les valeurs inscrites dans cette colonne sont cruciales pour obtenir les paramètres *P1* et *P2*, nécessaires pour le calcul du gradient de pente.

2.4.4.1.1.3 Étape 3 : Calcul du gradient de pente

En utilisant la même couche de points des étapes 1 et 2, nous avons créé une nouvelle colonne intitulée « Streamgrad », où nous avons inscrit les résultats du calcul du gradient de pente (Formule 2.2). Pour ce faire, il est important de noter que tous les points, à l'exception du premier et du dernier de la série, jouent un double rôle. Pour chaque segment, le premier point amont et le premier point aval sont utilisés pour calculer le gradient de pente. Ensuite, le point aval du premier segment devient le point amont du segment suivant, et ainsi de suite (Figure 2-35 **Error! Reference source not found.**). Dans la colonne « Elevationp », le premier point de la série a été nommé « X ». Ce choix permet d'éviter toute confusion ou erreur lors des jointures par clé, puisque le résultat du calcul du gradient de pente est attribué au point aval du segment. L'identifiant unique « X » garantit ainsi une cohérence dans les associations et facilite les opérations de jointure. Enfin, nous avons créé une deuxième colonne, « Streamgrad100 », qui représente les valeurs du gradient en pourcentage, obtenues en multipliant le résultat par 100.

Figure 2-35 Image (A): Points A (P1) et B (P2) du segment A : La ligne violette correspond au segment A, la ligne rouge au segment B et la ligne jaune au segment C. Les délimitations de ces segments sont marquées par des points de la même couleur que le segment correspondant : les points violets indiquent les limites amont et aval du segment A, tandis qu'un point rouge marque la fin du segment B et un point jaune celle du segment C. Image (B): Points B (P1) et C (P2) du segment B : Ici, on observe que le point aval du segment A, initialement violet, devient un point rouge, marquant ainsi la délimitation amont du segment B. Ce processus de transition des points est appliqué systématiquement à chaque segment identifié, assurant une continuité logique entre les segments successifs.

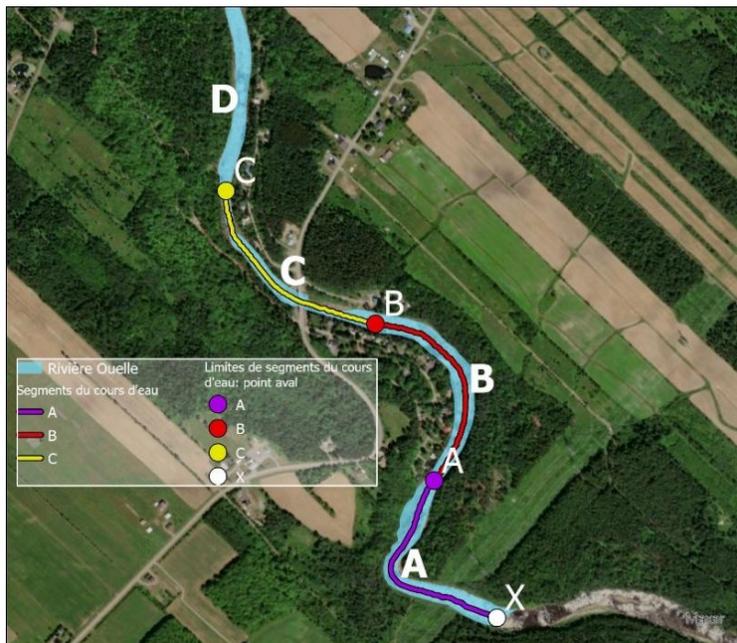


2.4.4.1.1.4 Étape 4 : Segmentation de la surface du cours d'eau et caractérisation

La nouvelle numérisation de la surface du cours d'eau (couche polygone), mentionnée au début du mémoire, a été découpée en segments à l'aide des points délimitant le début et la fin de chaque segment. Une colonne intitulée « ID_Segment » a ensuite été ajoutée pour attribuer un identifiant unique à chaque segment surfacique, en veillant à ce que ces identifiants correspondent à ceux des points présents dans la couche points. Ensuite, à l'aide de l'outil *Join Field* (Joindre un champ), une jointure par clé a été effectuée entre la colonne « Elevationp » de la couche points et la colonne « ID_Segment » de la couche polygone. Cette opération a permis d'associer l'identifiant unique (clé) du point aval de chaque segment à l'identifiant unique qui lui correspond au segment polygone, transférant ainsi les attributs pour caractériser la couche polygone. Lors de l'attribution

de l'identifiant unique à chaque segment surfacique, il est essentiel de l'associer au point aval du segment. Cela signifie que l'identifiant unique du segment doit correspondre à celui du point aval, qui contient le résultat du calcul du gradient de pente. Cette correspondance garantit le bon fonctionnement de la jointure par clé entre les couches (Figure 2-36).

Figure 2-36 Représentation spatiale des entités à joindre par clé, où le point blanc (X) représente le point amont du segment A. Ce point a été identifié de manière distincte, car il est le seul à ne pas comporter de valeurs cumulatives pour le calcul du gradient de pente et ne marque pas la fin d'un segment précédent. Nous avons décidé que le point aval contiendrait les informations nécessaires pour le calcul du gradient de pente du segment correspondant, c'est pourquoi le nom du segment a été attribué au point aval délimitant la fin du segment. Cela a également facilité les jointures par clé en assurant leur logique. Ainsi, on observe que le point contenant l'information sur le gradient de pente du segment A (en violet) se situe en aval du segment A, et de même pour le segment B (en rouge) et son point respectif.



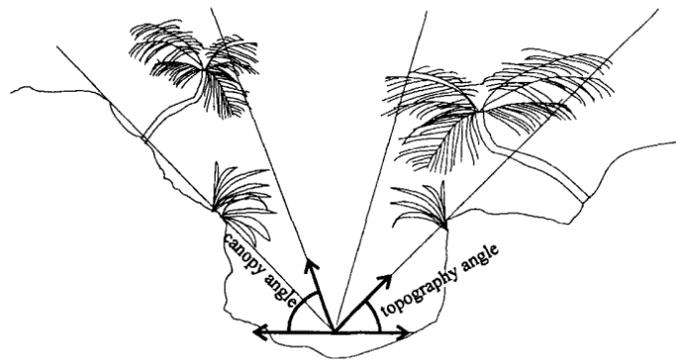
2.4.5 Forestier

Le facteur forestier est essentiel pour le refroidissement des cours d'eau grâce à l'ombrage fourni par la végétation riveraine, ce qui favorise la formation de zones de refroidissement sur le cours d'eau (Rutherford, et al., 1997; Ebersole, et al., 2003; Grégoire, et al., 2007; Gagnon, et al., 2007; Bond, et al., 2015; Tsai, et al., 2017; Kalny, et al., 2017; Garner, et al., 2017; Dralle, et al., 2018; Wang, et al., 2020; AGRCQ, 2024). L'efficacité de cet ombrage dépend principalement de la densité et de la santé de la couverture forestière, de la largeur de la bande riveraine, ainsi que de la distance entre la végétation et le cours d'eau (Sridhar et al., 2004; Grégoire et al., 2007; Dussault et al., 2013; Tsai et al., 2017; Garner et al., 2017; AGRCQ, 2024). Pour un effet significatif, la bande riveraine ne doit pas être située à plus de 30 m de la rivière, avec une largeur comprise entre 7,5 m et 30 m (Gagnon, et al., 2007; Budd, et al., 1987; Castelle, et al., 1994; Gagnon, et al., 2007; Dussault, et al., 2013). Dans les zones de conservation, comme l'habitat du saumon atlantique, une largeur de 60 m est recommandée pour maximiser l'effet de régulation thermique, limiter le ruissellement et réduire l'érosion sédimentaire (Gouvernement du Canada, 1990; Gouvernement du Québec, 2010; Gouvernement du Québec, 2013; Gauthier, 2001; Dussault et al., 2013; FQSA, 2022b; AGRCQ, 2024).

Les effets de la canopée sur la température de l'eau sont complexes et nuancés, car plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour que l'ombrage riverain ait un impact significatif sur la température. Des études suggèrent que la canopée peut contribuer au refroidissement de l'eau en bloquant les flux d'énergie solaire, soit par une couverture végétale très dense, soit par une canopée moins dense offrant de l'ombre pendant les périodes de fort ensoleillement (Rutherford et al., 1997; Ebersole, et al., 2003; Bond, et al., 2015; Garner et al., 2017; Kalny et al., 2017). Dans les deux cas, cette couverture réduit les gains d'énergie solaire, entraînant un refroidissement progressif de l'eau à mesure qu'elle s'écoule en aval (Garner et al., 2017; Rutherford et al., 1997; Kalny et al., 2017). Autrement dit, bien qu'une canopée dense et continue soit clairement importante pour offrir de l'ombrage, une canopée moins dense et plus dispersée peut également jouer un rôle significatif dans des contextes extrêmes, comme les canicules et les étiages. Cela s'explique par le fait qu'une canopée bien positionnée pour fournir de l'ombre, en particulier lors des vagues de chaleur, a un effet plus marqué (Garner et al., 2017; Rutherford et al., 1997; Kalny et al., 2017). D'une part, l'efficacité de l'ombrage dépend de la pente de la topographie, qui influence l'inclinaison des arbres

et, par conséquent, la réduction de la radiation solaire directe sur le cours d'eau (Figure 2-37) (Rutherford, 1997).

Figure 2-37 Illustration démontrant que, pour protéger un cours d'eau des rayons solaires (représentés par des lignes), la présence de canopée sur les rives est essentielle, mais son efficacité dépend également de l'angle d'inclinaison et de la pente de la topographie. La simple disponibilité de la canopée ne suffit pas : elle doit être située à proximité et orientée à des angles spécifiques pour limiter efficacement le réchauffement de l'eau par l'insolation surfacique (Rutherford, 1997).



D'autre part, l'orientation du cours d'eau influence également les échanges énergétiques et la température de l'eau. Une étude a démontré cela en simulant les effets de la végétation sur la température des cours d'eau orientés dans diverses directions (Garner et al., 2017). Les différences climatiques influencées par l'orientation des pentes sont également significatives. Une étude menée sur les pentes nord et sud adjacentes à la réserve Angelo Coast Range de l'Université de Californie a révélé que la pente sud peut être jusqu'à 7 °C plus chauds que la pente nord en septembre (Bilir et al., 2021). Ainsi, une couverture végétale de 30 % peut être aussi efficace qu'une couverture de 60 % si elle protège le cours d'eau durant les périodes où le soleil est au sud-est ou au sud-ouest (Garner et al., 2017). En revanche, une couverture de 60 % peut être moins efficace si elle ne fournit pas d'ombre durant ces périodes spécifiques (Garner et al., 2017). Bien que la végétation riveraine aide à limiter l'augmentation de la température de l'eau, son effet est plutôt limité sur les températures minimales quotidiennes (Garner et al., 2014; Moore et al., 2005; Rutherford et al., 2004).

L'étude de Bond et al. (2015) a été menée sur la Salmon River, le deuxième plus grand affluent de la rivière Klamath, dans le nord de la Californie, aux États-Unis. Le modèle Heat Source utilisé dans cette recherche montre que la réduction de la température de l'eau due à l'ombrage riverain dépend également d'autres paramètres, tels que la vitesse du cours d'eau et sa morphologie. Selon les prédictions du modèle, les températures moyennes journalières des cours d'eau augmentent de 0,23 °C/km, 0,45 °C/km et 0,68 °C/km respectivement pour des augmentations de 2 °C, 4 °C et 6 °C de la température moyenne annuelle de l'air. L'intégration du paramètre de reforestation dans le modèle montre qu'une reforestation partielle des zones riveraines réduit l'augmentation de la température de 0,11 °C/km, tandis qu'une reforestation complète permet une diminution de 0,26 °C/km. De plus, les effets de refroidissement dus à l'ombrage riverain augmentent lorsque le débit du cours d'eau diminue. Par exemple, avec une reforestation complète, le modèle prévoit un refroidissement de 0,26–0,27 °C/km aux débits actuels, de 0,29–0,31 °C/km avec une réduction de débit de 14,8 %, de 0,39–0,40 °C/km avec une réduction de 38,3 %, et de 0,66–0,68 °C/km avec une réduction de 71 %, quels que soient les scénarios de température de l'air (Bond et al., 2015). Tout comme la densité de la couverture forestière, l'effet de l'ombrage semble être subjectif, car il paraît plus marqué à faible débit, mais peut devenir moins significatif lorsque le débit est plus élevé.

De manière générale, les bandes riveraines peuvent réduire la température des cours d'eau de 1 à 3 °C selon les conditions environnementales et l'efficacité de l'implantation (Blann et al., 2002; Tsai et al., 2017). En limitant les apports thermiques et en modifiant le microclimat local, la végétation riveraine joue un rôle clé dans la régulation thermique, essentiel pour le maintien des écosystèmes aquatiques et la préservation des habitats sensibles (Ebersole et al., 2003; Johnson et al., 2000).

En simulant l'ombrage de la canopée à l'aide de couvertures artificielles (bâches), Ebersole et al. (2003) ont démontré que cet ombrage joue un rôle essentiel en limitant l'impact de la radiation solaire sur les caractéristiques thermiques et chimiques des zones d'eau froide en bordure des cours d'eau. Cette expérience a révélé que la perte de cet ombrage peut entraîner un réchauffement notable et une réduction du volume des habitats aquatiques, soulignant ainsi l'importance de préserver ces zones de refroidissement pour maintenir l'équilibre thermique essentiel à certaines espèces (Ebersole et al., 2003). En parallèle, la gestion des rivières privilégie de plus en plus l'utilisation de la végétation riveraine pour moduler les apports d'énergie à l'eau et réduire les

extrêmes thermiques. Ceci souligne l'importance de prendre en compte les effets de la canopée dans une perspective de refroidissement des cours d'eau (Gomi, et al., 2006; Johnson, et al., 2000; Hannah, et al., 2008; Imholt, et al., 2011; Imholt, et al., 2012; Garner et al., 2015; Garner, et al., 2017).

En résumé, la végétation riveraine influence la température des cours d'eau de trois façons principales. D'abord, 1) elle absorbe une partie du rayonnement solaire, réduisant ainsi la température maximale de l'eau durant les journées ensoleillées. Ensuite, 2) elle émet un rayonnement thermique qui compense partiellement le refroidissement nocturne, augmentant la température minimale de l'eau. Enfin, 3) elle modifie le microclimat environnant, affectant l'évaporation, la conduction et la température du sol, ce qui influe indirectement sur la température de l'eau (Rutherford, et al. 1997).

Pour intégrer le facteur forestier dans notre AMCp, nous avons identifié trois variables : la réflectance de chlorophylle de la végétation (qui suggère l'état de « santé » de la végétation), la densité de la canopée et l'ombrage riverain. Afin de répondre au sous-objectif 1 et de modéliser ces variables, nous avons choisi les méthodes suivantes respectivement : produire le NDVI, cartographier l'indice de densité de la couverture forestière (FCD - *Forest Canopy Density*) et de modéliser l'ombrage cumulatif par heure sur le cours d'eau, pixel par pixel.

En ce qui concerne le traitement des données liées au facteur forestier, nous avons utilisé l'imagerie satellite Sentinel-2 issue de la plateforme Copernicus. Nous avons principalement utilisé les bandes B02 (bleu), B03 (vert), B04 (rouge), B08 (proche infrarouge) et B11 (infrarouge à ondes courtes) qui sont toutes définies par défaut avec le type de pixel « unsigned short/ entier non signé court », ce qui complique les calculs des indices. Pour résoudre ce problème, nous avons converti les valeurs en format « float/ nombre à virgule flottante » à l'aide de l'outil *Float* (Flottant). L'outil *Raster Calculator* (Calculatrice raster) a été employé pour appliquer les formules de télédétection nécessaires aux analyses forestières. En complément, des données LiDAR, notamment le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et le Modèle de Hauteur de Canopée (MHC), disponibles sur la plateforme Forêt Ouverte, ont également été exploitées. Nous avons utilisé les outils *Hillshade* et *Raster Calculator* pour la modélisation de l'ombrage.

2.4.5.1 Réflectance de chlorophylle de la couverture végétale

Les indicateurs de végétation reposent sur la réflexion spectrale des plantes dans les gammes rouges et proche infrarouge, permettant de mesurer la réflectance de chlorophylle de la couverture végétale (Azizi, et al., 2008; Abdollahnejad, et al., 2017). Parmi ces indices, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI- *Normalized Difference Vegetation Index*) est particulièrement utile pour suivre les tendances à long terme de la végétation et pour détecter les changements dans les zones riveraines, notamment les impacts des événements naturels et des activités humaines (Pace, et al., 2022; Zaimes, et al., 2019 ; Nagler, et al., 2015; Peng, et al., 2012;). Le NDVI évalue la densité et la continuité de la végétation, influençant ainsi l'ombrage et la température de l'eau (Garner, et al., 2017). L'indice permet également d'estimer, sous réserve, la « santé végétale » à partir de la capacité de réflectance de la chlorophylle de la végétation Celle-ci est mesurée en comparant la quantité de lumière réfléchiée dans les bandes proche infrarouge (NIR) et rouge : plus la végétation à une forte concentration de chlorophylle, plus elle reflète de lumière proche infrarouge et moins elle réfléchit de lumière rouge (Azizi, et al., 2008; Pace, et al., 2022; ; Namasivayan, et al., 2024).

Les valeurs du NDVI varient de -1,0 à 1,0 ; des valeurs proches d'un (1) indiquent une forte concentration et réflectance de chlorophylle, ce qui suggère une végétation dense et « en bonne santé », tandis que des valeurs proches de zéro (0) ou négatives correspondent à des zones non végétalisées (Namasivayan, et al., 2024; Pace, et al., 2022; Huang, et al., 2021; Giridharan, et al., 2022). La formule pour calculer le NDVI a été appliquée à l'aide de l'outil *Raster Calculator* (Calculatrice raster), en utilisant les bandes proche infrarouge (Sentinel-2 : NIR = B08) et rouge (Sentinel-2 : Rouge/Red = B04) (Formule 2.3, Figure 2-38) (Namasivayam et al., 2024; Pace, et al., 2022; Abdollahnejad, et al., 2017;).

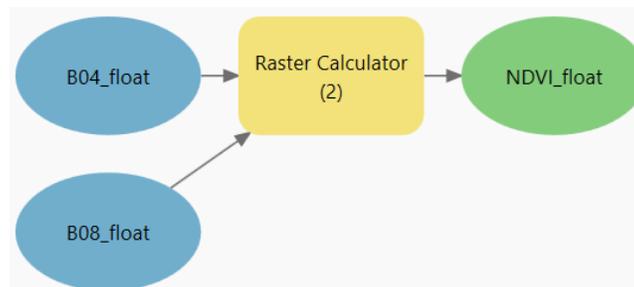
Formule 2.3 Calcul de l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) en utilisant les bandes spectrales proche infrarouge (NIR) et rouge (RED). Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B08 pour le proche infrarouge et B04 pour le rouge. Finalement, un exemple de la formule de l'indice NDVI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B08 pour la bande proche infrarouge et B04 pour la bande rouge).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

$$= \frac{(B08 - B04)}{(B08 + B04)}$$

$$= NDVI = \text{Float}("%B08_float%" - "%B04_float%")/\text{Float}("%B08_float%" + "%B04_float%")$$

Figure 2-38 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Les données utilisées (bandes rouge B04 et proche infrarouge B08) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte.



2.4.5.2 Densité de la couverture forestière

L'indice de densité de la couverture forestière (FCD - *Forest Canopy Density*) (Formule 2.4) permet une analyse quantitative de la densité des forêts pour mesurer la proportion de couvert végétal (ombre, feuillage, branches) dans une zone forestière en exprimant la densité du couvert forestier en pourcentages. Ce modèle est utilisé pour suivre les changements de densité du couvert forestier au fil du temps et pour évaluer la progression des activités de reboisement. La densité de la canopée influence directement l'ombrage au sol, qui peut affecter des paramètres comme la

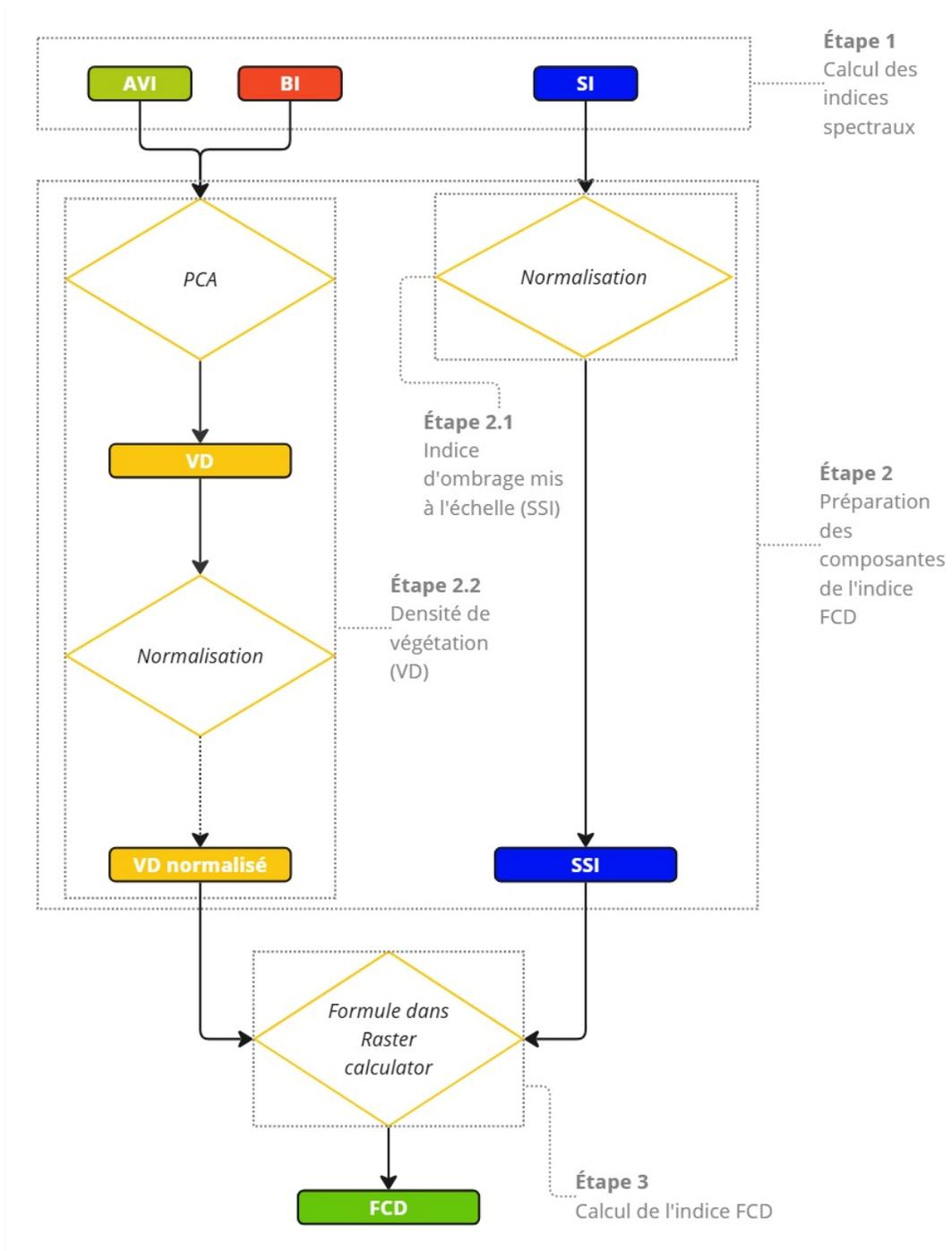
température des cours d'eau et les habitats environnants. Le FCD calcule la densité du couvert forestier pour chaque pixel en se basant sur quatre indicateurs : l'indice de végétation avancée (*Advanced Vegetation Index* - AVI) (Formule 2.5), l'indice de sol nu (*Bare Soil Index* - BSI) (Formule 2.6), l'indice d'ombrage du couvert forestier (*Shadow Index/ Canopy Shadow Index* - SI) (Formule 2.7), et l'indice thermique (*Thermal Index* - TI) (Abdollahnejad, et al., 2017; Rikimaru et al., 2002; Godinho et al., 2016; Falensky, et al, 2020).

Les satellites équipés de capteurs thermiques, tels que Landsat-8 ou Landsat-7, sont généralement privilégiés pour le calcul de l'indice FCD (Biradar et al., 2005; Falensky et al., 2020; Loi et al., 2017). Dans ce mémoire, les données Sentinel-2 ont été retenues malgré l'absence de capteurs thermiques (ESA, 2015). Cette limitation n'entrave pas l'analyse, comme l'indique l'étude de Namasivayam et al. (2024), qui a également utilisé les images Sentinel-2 sans l'inclusion de l'indice TI. Contrairement à leur méthode, nous n'avons pas utilisé l'outil *Weighted Overlay* (Superposition pondérée), mais avons plutôt appliqué la formule pour l'indice FCD (Formule 2.4) (Biradar, et al., 2005; Falensky, et al., 2020; Loi, et al., 2017; Abdollahnejad, et al., 2017). Ainsi, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Falensky et al. (2020), d'Abdollahnejad et al. (2017), et de Loi et al. (2017) pour suivre les étapes de traitement des données, en particulier pour la création des composantes de la formule du FCD, soit la densité de végétation (*Vegetation Density* - VD) et l'indice d'ombrage mis à l'échelle (*Scaled Shadow Index* - SSI) (Formule 2.8). La Figure 2-39 résume l'enchaînement des étapes pour produire le FCD, en commençant par le calcul des indices spectraux mentionnés, suivi de la préparation des composantes de l'indice du FCD et enfin de l'application de la formule FCD (Formule 2.4).

Formule 2.4 Calcul de l'indice FCD (Forest Canopy Density) en utilisant les paramètres SSI (*Scaled Shadow Index*) et VD (*Vegetation Density*)

$$FCD = \sqrt[3]{SSI * VD + 1 + 1}$$

Figure 2-39 Processus opérationnel pour le calcul de l'indice FCD (Forest Canopy Density). Étape 1: calcul des indices AVI (*Advanced Vegetation Index*, rectangle vert pâle), BI (*Bare Soil Index*, rectangle orange), et SI (*Shadow Index*, rectangle bleu). Étape 2: prépare les composantes VD (*Vegetation Density*, rectangle jaune) via une PCA (Principal Component Analysis) et une normalisation, et SSI (rectangle bleu) par une normalisation. Étape 3: calcul de l'indice FCD final en utilisant les paramètres issus de l'étape 2, c'est-à-dire le VD normalisé (rectangle jaune) et le SSI (rectangle bleu), pour obtenir la couche finale de FCD (rectangle vert).



2.4.5.2.1 Étape 1 : Calcul des indices spectraux

Pour cette étude, nous avons adopté l'indice de densité de la couverture forestière (FCD - *Forest Canopy Density*), qui repose sur trois indices complémentaires : l'*Advanced Vegetation Index* (AVI), le *Bare Soil Index* (BSI) et le *Shadow Index* (SI). L'AVI, particulièrement adapté aux environnements forestiers denses, met en évidence la végétation, tandis que le BSI permet d'identifier les sols nus dans des zones mixtes forestières et agricoles. Le SI, quant à lui, évalue l'ombrage créé par la hauteur et la densité des arbres, offrant une perspective sur la couverture forestière. Bien que d'autres indices, tels que l'*Hyperspectral Bare Soil Index* (HBSI) ou le *Modified Bare Soil Index* (MBI), aient été envisagés, leur usage s'est avéré moins pertinent dans le contexte québécois en raison des spécificités spectrales et des objectifs ciblés. La combinaison de ces indices fournit une analyse détaillée de la densité forestière et de la continuité de la canopée, permettant d'identifier avec précision les zones les mieux protégées des rayons solaires.

2.4.5.2.1.1 Advanced vegetation index (AVI)

L'AVI est un indice basé sur la réflectance spectrale, utilisé pour évaluer la qualité de la végétation, de manière similaire au NDVI (Namasivayam, et al., 2024; Nandy et al., 2003). À différence du NDVI, qui peut manquer de précision pour détecter les variations fines du couvert végétal, l'AVI est conçu pour mieux distinguer ces différences de densité du couvert forestier. Il est particulièrement sensible aux variations de texture de la végétation et à la densité des forêts, ce qui le rend plus efficace pour des évaluations détaillées (Namasivayam, et al., 2024; Loi, et al., 2017; Sahana et al., 2015). Même si le NDVI est largement utilisé pour évaluer la santé des forêts, il ne détecte pas toujours les variations subtiles de densité du couvert. L'AVI, en revanche, utilise une méthode basée sur la réponse infrarouge, permettant de mieux discerner ces différences fines. Cet indice est plus sensible aux variations de densité forestière et aux types de végétation, offrant ainsi une analyse plus précise (Azizi et al., 2008; Abdollahnejad et al., 2017; Loi, et al., 2017). C'est pour cette raison que nous avons choisi d'inclure les deux indices dans la formule de notre AMC.

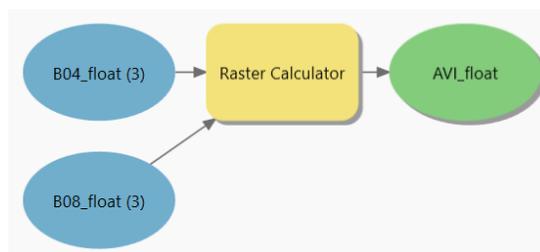
La formule pour calculer l'AVI a été appliquée à l'aide de l'outil *Raster Calculator* (Calculatrice raster), en utilisant les bandes proche infrarouge (Sentinel-2 : NIR = B08) et rouge (Sentinel-2 : Rouge/Red = B04) (Formule 2.5, Figure 2-40) (Namasivayam et al., 2024; Pace, et al., 2022;

Abdollahnejad et al., 2017; Loi, et al., 2017). Pour appliquer la formule de l'AVI, il faut déterminer la valeur maximale de l'image, qui varie selon la profondeur de couleur utilisée : 255 pour 8 bits, 65 535 pour 16 bits, et jusqu'à 4 294 967 295 pour 32 bits entiers. Pour les images en 32 bits flottants, la valeur maximale peut être beaucoup plus grande et dépend de la norme de représentation des nombres flottants et varie sur chaque bande. Chaque profondeur de couleur définit un intervalle différent de valeurs possibles pour les pixels, ce qui impacte la valeur maximale obtenue. Pour garantir un résultat uniforme et minimiser les erreurs, nous avons sélectionné des images avec une profondeur de couleur de 16 bits, dont la valeur maximale est fixée à 65 535.

Formule 2.5 Calcul de l'indice AVI (*Advanced Vegetation Index*) utilisant les bandes spectrales proche infrarouge (NIR) et rouge (RED). Dans la formule, MaxValue correspond à la valeur maximale observée parmi les pixels de la bande spectrale. Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B08 pour le proche infrarouge et B04 pour le rouge. Finalement, un exemple de la formule de l'indice AVI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B08 pour la bande proche infrarouge et B04 pour la bande rouge).

$$\begin{aligned}
 AVI &= [(NIR + 1)(MaxValue - RED)(NIR - RED)]^{1/3} \\
 &= [(B08 + 1)(65535 - B04)(B08 - B04)]^{1/3} \\
 &= Float(("%B08_float (3)%" + 1) * (65535 - "%B04_float (3)%") * ("%B08_float (3)%" \\
 &\quad - "%B04_float (3)%") * 1/3
 \end{aligned}$$

Figure 2-40 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice AVI. Les données utilisées (bandes rouge B04 et proche infrarouge B08) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte.



2.4.5.2.1.2 Bare Soil Index (BSI)

Le BSI est un indice de réflectance spectrale utilisé pour évaluer les conditions et variations des sols exposés tout en prenant en compte la couverture végétale (Loi et al., 2017; Abdollahnejad et al., 2017; Namasivayam et al., 2024; Nguyen et al., 2021; Valentini, et al., 2024). Il mesure la proportion de sol nu, ce qui permet de différencier les sols agricoles des non agricoles (Abdollahnejad et al., 2017; Valentini, et al., 2024). Il permet de mesurer les variations de la couverture végétale, depuis les terrains complètement dégarnis jusqu'aux canopées les plus denses, en utilisant une méthode de calcul normalisée comparable à celle de l'AVI (Azizi et al., 2008). Le BI est calculé en combinant plusieurs bandes spectrales : les bandes visibles (bleu et rouge), la bande proche infrarouge (NIR), et la bande infrarouge à ondes courtes (SWIR) (Loi et al., 2017; Namasivayam et al., 2024; Fasil et al., 2022; Valentini, et al., 2024). Les bandes SWIR et rouge sont employées pour évaluer la composition minérale du sol, tandis que les bandes bleues et NIR sont utilisées pour mettre en évidence la présence de la végétation (Loi et al., 2017; Roy, et al., 1996). Ce mélange de bandes permet de capturer les variations à la fois du sol et de la végétation, offrant ainsi une vue complète des conditions de sol nu et de la couverture végétale (Namasivayam et al., 2024). En outre, le BI peut aussi servir d'indicateur indirect du couvert forestier sur une période donnée, fournissant ainsi des informations précieuses sur les conditions de couverture végétale et forestière (Namasivayam et al., 2024).

Cependant, différentes formules sont proposées pour analyser le sol nu, utilisant des indices tels que l'*Hyperspectral Bare Soil Index* (HBSI), une variation du *Bare Soil Index* (BSI), le *Soil Bareness Index* (SBI), le *Modified Bare Soil Index* (MBI), et le *Bareness Index* (BI) (Tableau 2.6). Bien que ces indices portent des noms similaires, leurs formules varient en fonction du contexte de la zone d'étude et des résultats espérés (Salas, et al., 2023). En général, les indices de sol nu sont construits à partir de diverses longueurs d'onde allant du visible (RGB), au NIR, au SWIR et finalement à l'infrarouge thermique combinant deux, trois ou quatre bandes (Nguyen et al., 2021).

Tableau 2.6 Synthèse des différentes formules utilisées pour le calcul de l'indice de sol nu. Chaque formule est adaptée au contexte du territoire, le choix étant principalement influencé par les facteurs forestiers et anthropiques. La formule retenue est mise en évidence en orange dans le tableau.

Nom de l'indice	Sources	Formule
Bare Soil Index (BSI) <i>* Formule utilisée dans le cadre du mémoire</i>	Valentini, et al., 2024 Loi, et al, 2017 Falensky, et al., 2020 Rikamaru, et al. 2002	$BSI = \frac{(SWIR + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR + Red) + (NIR + Blue)}$
Hyperspectral Bare Soil Index (HBSI)	Salas, et al., 2023	$HBSI = \frac{(SWIR2 + GREEN) - (NIR + BLUE)}{(SWIR2 + GREEN) + (NIR + BLUE)}$
Bare Soil Index (BSI)	Abdollahnejad, et al., 2017 Azizi, et al., 2008	$BSI = \frac{(NIR + GREEN) - RED}{(NIR + GREEN) + RED}$
Modified Bare Soil Index (MBI)	Nguyen, et al. 2021	$MBI = \frac{(SWIR1 - SWIR2 - NIR)}{(SWIR1 + SWIR2 + NIR)} + f(0.5)$
Bareness Index (BI) <i>* Présenté comme Soil Bareness Index (SBI) dans leur étude, mais correspond à la formule du BI.</i>	Namasivayam, et al., 2024	$BI/SBI = \frac{(SWIR-RED)-(NIR+RED)}{(SWIR+RED)+(NIR+RED)}$

En revanche, bien que l'*Hyperspectral Bare Soil Index* (HBSI) partage des similitudes avec le BSI, il se distingue par l'utilisation des bandes vertes et bleues au lieu des bandes rouges et bleues, en plus des bandes SWIR et NIR. Ces bandes permettent une meilleure détection des caractéristiques spécifiques des minéraux du sol, comme les oxydes de fer et les argiles, qui ne sont pas aussi bien capturées avec les bandes du BI. Cette différence améliore l'évaluation des conditions du sol en offrant une vue plus détaillée des propriétés minérales et organiques du sol (Salas, et al., 2023).

Azizi et al. (2008) ainsi qu'Abdollahnejad et al. (2017) adoptent une approche distincte pour le calcul du *Bare Soil Index* (BSI), intégrant la bande verte tout en excluant la bande bleue. Leur méthode repose sur l'utilisation des bandes SWIR2, rouge et verte pour évaluer la variation du BSI, permettant ainsi d'identifier les zones de dégradation et d'érosion des sols. Associé au NDVI, cet indice facilite également la distinction entre le sol nu et la couverture végétale, en particulier dans les zones agricoles intensives (Salas et al., 2023).

En revanche, Namasivayam et al. (2024) privilégient le *Bareness Index* (BI), qui repose sur les bandes SWIR, NIR et rouge. Contrairement au BSI, le BI est un indice non-ratio conçu spécifiquement pour détecter les zones non végétalisées et urbaines (Salas et al., 2023 ; Nguyen et al., 2021 ; Lin et al., 2005). Par ailleurs, Koroleva et al. (2017) ont développé une méthode basée sur l'espace spectral rouge-NIR afin de discriminer le sol nu. Toutefois, cette approche présente certaines limites, car le chevauchement des signatures spectrales complique la différenciation entre le sol nu et d'autres types de couvertures terrestres (Nguyen et al., 2021).

Par ailleurs, le Modified *Bare Soil Index* (MBI) n'utilise pas la bande bleue et est particulièrement recommandé pour les environnements de forêt et climat tropicale (Nguyen, et al., 2021). Ce MBI utilise les bandes SWIR et NIR obtenues à partir de Landsat 8 (OLI—*Operational Land Imager*). L'indice proposé a été testé sur deux types de sols nus différents en Thaïlande et au Vietnam, où de vastes zones de sols nus apparaissent pendant la période de jachère agricole, rendant difficile la distinction entre sols nus et zones urbaines (Nguyen, et al., 2021).

En tenant compte de ces éléments, nous avons choisi de poursuivre avec le BSI utilisé par Loi et al. (2017), Falensky et al. (2020), et Valentini et al. (2024). Bien que nous ayons initialement envisagé la méthode de Namasivayam et al. (2024), notre contexte forestier au Québec présente des différences significatives, car l'indice recommandé s'applique principalement aux forêts tropicales. Le caractère hautement anthropisé et aménagé du bassin versant de la rivière Ouelle, avec ses routes et champs agricoles, rend pertinent l'inclusion de la bande bleue, comme l'indiquent les exemples précédents. En effet, comme l'indique Valentini et al. (2024), le BSI, qui inclut cette bande, est particulièrement adapté aux contextes agricoles. Notre choix s'appuie donc sur les besoins et les spécificités du territoire.

La formule pour calculer le *Bare Soil Index* (BSI) a été appliquée à l'aide de l'outil *Raster Calculator* (Calculatrice raster), en utilisant les bandes bleue (Sentinel-2: Bleu/Blue = B02), rouge (Sentinel-2 : Red/Rouge = B04), proche infrarouge (Sentinel-2: NIR = B08) et infrarouge à ondes courtes (Sentinel-2 : SWIR = B11) (Formule 2.6, Figure 2-41).

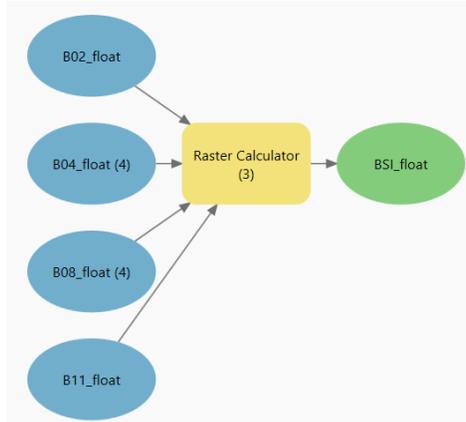
Formule 2.6 Calcul de l'indice BSI (*Bare Soil Index*) en utilisant les bandes spectrales infrarouge à ondes courtes (SWIR), rouge (RED), bleu (BLUE) et proche infrarouge (NIR). Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B11 pour l'infrarouge à ondes courtes, B04 pour le rouge, B02 pour le bleu, et B08 pour le proche infrarouge. Finalement, un exemple de la formule de l'indice BSI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B11 pour la bande infrarouge à ondes courtes, B04 pour la bande rouge, B02 pour la bande bleue, et B08 pour la bande proche infrarouge).

$$BSI = \frac{(SWIR + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR + RED) + (NIR + BLUE)}$$

$$= \frac{(B11 + B04) - (B08 + B02)}{(B11 + B04) + (B08 + B02)}$$

$$= \text{Float}((\text{"\%B11_float\%"} + \text{"\%B04_float (4)\%"} - (\text{"\%B08_float (4)\%"} + \text{"\%B02_float\%"})) / ((\text{"\%B11_float\%"} + \text{"\%B04_float (4)\%"} + (\text{"\%B08_float (4)\%"} + \text{"\%B02_float\%"})))$$

Figure 2-41 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice BSI. Les données utilisées (bandes infrarouge à ondes courtes B11, rouge B04, proche infrarouge B08 et bleue B02) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte.



2.4.5.2.1.3 Shadow Index (SI)

Le SI est un indicateur spectral utilisé pour évaluer l'ombrage généré par la canopée ou d'autres structures et peut être appliqué pour mesurer l'intensité de l'ombrage sur différentes surfaces, telles que les cours d'eau. Cet indice tient compte de la disposition des couronnes d'arbres, qui créent des motifs d'ombre influençant les réponses spectrales de la forêt (Azizi et al., 2008; Namasivayam et al., 2024). Dans les jeunes peuplements forestiers d'âge uniforme, le SI est généralement faible en raison d'une ombre moindre, tandis que les forêts matures et denses présentent un SI plus élevé, montrant des valeurs spectrales plus plates et faibles, contrastant avec celles des zones ouvertes ou des prairies (Huemmrich, 1996; Namasivayam et al., 2024). Le SI permet ainsi de distinguer les densités de couvert forestier, avec des valeurs plus élevées dans les zones de canopée dense. Il est calculé à partir des bandes spectrales rouge, bleue et verte, ce qui aide à déduire la couverture réelle du couvert forestier (Roy et al., 1996; Bera et al., 2020).

La formule pour calculer le *Shadow Index* (SI) a été appliquée à l'aide de l'outil *Raster Calculator*, (Calculatrice raster) en utilisant les bandes bleue (Sentinel-2: Bleu/Blue = B02), verte (Sentinel-2 : Green/Vert = B03), rouge (Sentinel-2 : Red/Rouge = B04) (Formule 2.7, Figure 2-42).

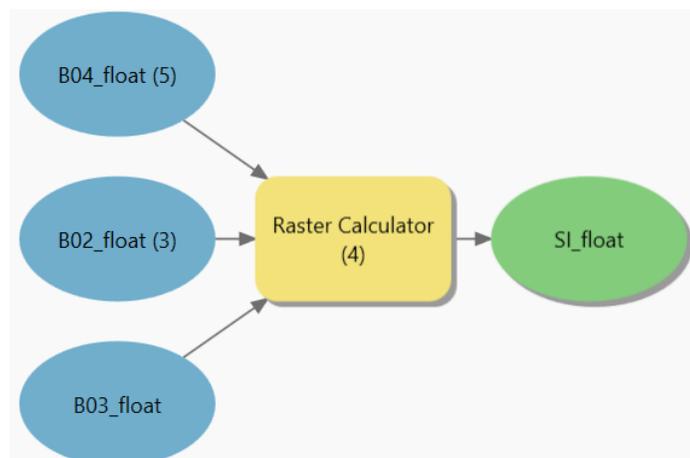
Formule 2.7 Calcul de l'indice SI (*Shadow Index*) en utilisant les bandes spectrales rouge (RED), vert (GREEN), et bleu (BLUE). Dans la formule, *MaxValue* correspond à la valeur maximale observée parmi les pixels de la bande spectrale. Suivi d'un exemple de la formule avec les bandes spectrales de Sentinel-2, soit B04 pour le rouge, B03 pour le vert, et B02 pour le bleu. Finalement, un exemple de la formule de l'indice SI appliquée dans l'outil Raster Calculator d'ArcGIS Pro, en utilisant les bandes spectrales de Sentinel-2 (B04 pour la bande rouge, B03 pour la bande verte, et B02 pour la bande bleue).

$$SI = [(MaxValue - RED)(MaxValue - GREEN)(MaxValue - BLUE)]^{1/3}$$

$$= [(MaxValue - B04)(MaxValue - B03)(MaxValue - B02)]^{1/3}$$

$$SI = ((65535 - "%B04.tiff%") * (65535 - "%B03.tiff%") * (65535 - "%B02_blue.tiff%")) * 1/3$$

Figure 2-42 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'indice SI. Les données utilisées (bandes rouge B04, verte B03, et bleue B02) sont représentées par des ellipses bleues, l'étape de traitement réalisée avec l'outil Raster Calculator est symbolisée par un rectangle jaune, et le résultat final est montré par une ellipse verte.



2.4.5.2.2 Étape 2 : Préparation des composantes de l'indice Forest Canopy Density (FCD)

Comme présenté dans la Formule 2.4, le FCD repose sur deux composantes : la densité de végétation (VD), obtenue à partir des indices AVI et BI, et l'indice d'ombrage mis à l'échelle (SSI) (Biradar et al., 2005; Falensky et al., 2020; Loi et al., 2017; Abdollahnejad et al., 2017). Pour rendre les indices compatibles avec la formule du FCD, les composantes VD et SSI subissent d'abord une transformation linéaire pour réduire les redondances et optimiser l'information, suivie d'une normalisation. Cette approche uniformise les indices avant leur intégration dans le calcul du FCD.

2.4.5.2.2.1 Shadow Scaled Index (SSI)

Le traitement des données pour produire le *Shadow scaled index* (SSI) varie en fonction des images spectrales et des indices disponibles. En général, cela inclut une analyse en composantes principales (PCA), intégrant l'indice thermique (TI) et le SI, suivie d'une normalisation (Abdollahnejad et al., 2017; Falensky et al., 2017). Cependant, en l'absence de TI, deux options sont possibles : soit une transformation linéaire peut être réalisée sans cet indice (Akaike, et al., 2016; Loi et al., 2017; Namasivayam et al., 2024), soit une simple normalisation (Chanket, et al. 2019). Ainsi, nous avons suivi la méthodologie de Chanket et al. (2019) et normalisé les valeurs du SI à l'aide d'une formule les ramenant entre 0 et 100 (Formule 2.8), afin de les rendre compatibles avec le résultat de la deuxième composante de l'indice FCD, le VD, ce qui nous a permis d'obtenir le SSI.

Formule 2.8 Calcul de l'indice SSI (*Scaled Shadow Index*) en utilisant le résultat du calcul de l'indice SI. Dans la formule, MaxValue et MinValue correspondent respectivement aux valeurs maximales et minimales observées parmi les pixels du résultat. Suivi d'un exemple de la formule avec les valeurs du résultat de l'indice SI calculé antérieurement.

$$\begin{aligned} SSI &= \frac{(SI - MinSI)}{(MaxSI - MinSI)} * 100 \\ &= \frac{(SI - 0)}{(9.38207e + 13 - 0)} * 100 \end{aligned}$$

2.4.5.2.2.2 Vegetation Density (VD)

La densité de végétation (VD) évalue le taux de couverture végétale en combinant les indices de végétation ajusté (AVI) et de sol nu (BSI). Pour calculer cet indice, une analyse en composantes principales (PCA) est d'abord appliquée, permettant d'extraire la composante principale qui reflète la densité végétale. La PCA est une transformation mathématique qui sépare les éléments corrélés des éléments non corrélés, réduisant ainsi la redondance dans les données multi-bandes et facilitant l'analyse (Hotelling, 1993; Watkins, 2020).

Le PCA est utilisé pour améliorer et compresser les images de télédétection, en calculant la matrice de covariance des images et en décomposant leur spectre pour extraire les valeurs propres et leurs vecteurs correspondants (Chitroub, 2004). Cette étape a été réalisée avec l'outil *Principal Components* (Composantes principales), en sélectionnant les résultats des indices AVI et BI. Par défaut, deux composantes principales sont choisies dans l'outil, une pour chaque indice, générant ainsi la couche VD. Nous avons également vérifié l'exactitude des résultats à l'aide du logiciel R Studio, et les valeurs obtenues se sont avérées cohérentes.

Le résultat est ensuite normalisé sur une échelle de 0 à 100 % pour représenter la proportion de la surface occupée par la végétation, mais aussi pour l'intégrer dans le calcul du FCD (Formule 2.9) (Falensky, et al., 2017; Loi, et al., 2017; Abdollahnejad, et al., 2017). Cette opération est effectuée dans l'outil *Raster Calculator* (Calculatrice raster). Ici, « VD » correspond aux valeurs du raster obtenu après PCA, et MinVD et MaxVD sont respectivement les valeurs minimale et maximale de cette couche.

Le résultat, exprimé en pourcentage, facilite l'intégration de la densité végétale dans le calcul du FCD. Dans Raster Calculator, avec MinVD égal à 0 et MaxVD égal à 84 544,7, l'expression devient :

Formule 2.9 Normalisation du VD (Vegetation Density) en utilisant le résultat du calcul du VD. Dans la formule, MaxVD et MinVD correspondent respectivement aux valeurs maximales et minimales observées parmi les pixels du résultat. Suivi d'un exemple de la formule avec les valeurs du résultat de l'indice VD calculé antérieurement.

$$VD \text{ normalisé} = \frac{(VD - MinVD)}{(MaxVD - MinVD)} * 100$$

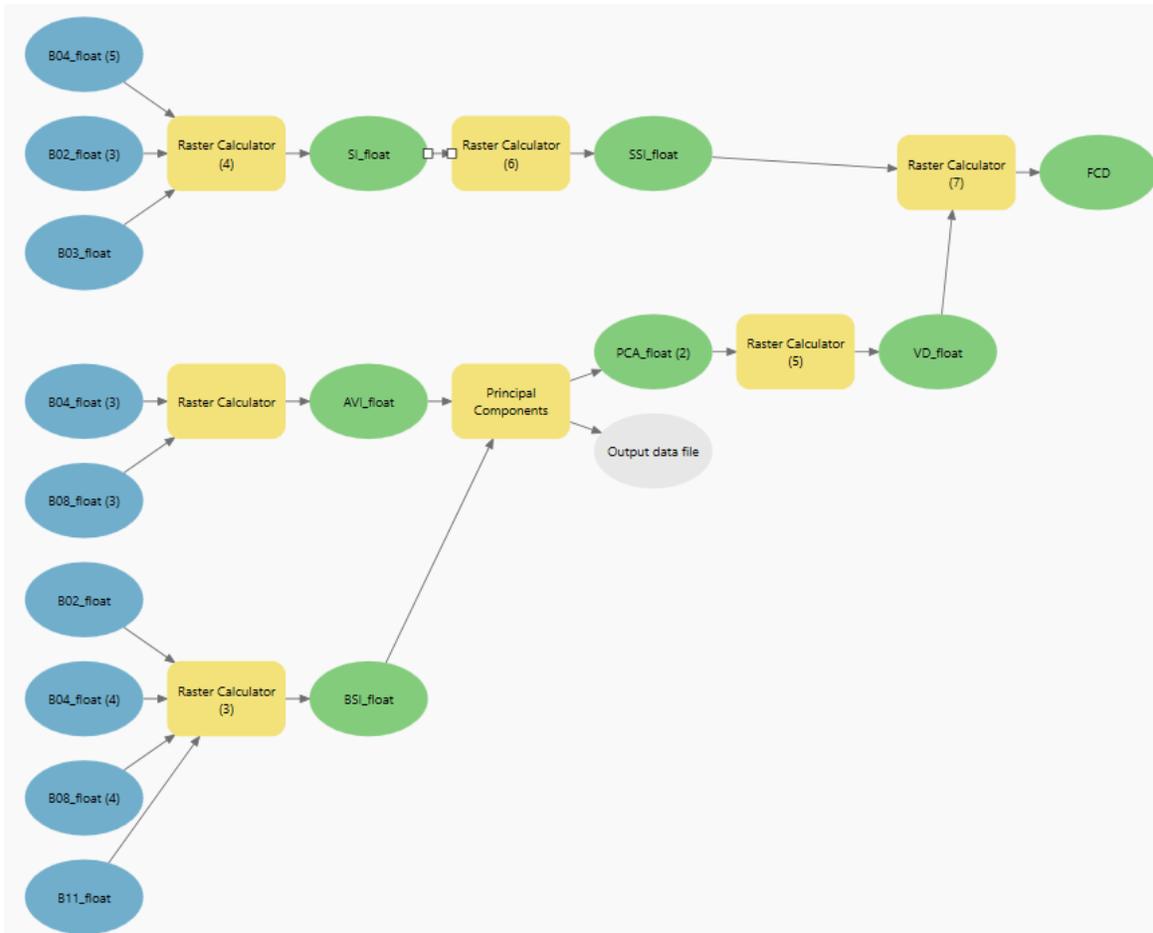
$$= \frac{(VD - 0)}{(84544.7 - 0)} * 100$$

2.4.5.2.3 Étape 3 : Calcul de l'indice Forest Canopy Density (FCD)

Enfin, les composantes SSI et VD sont combinées dans l'outil *Raster Calculator* pour calculer l'indice FCD, ce qui génère une couche dont les résultats sont exprimés en pourcentages (Figure 2-43) (Biradar et al.; Chanket et al., 2019).

Figure 2-43 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul des indices nécessaires (*Advanced Vegetation Index* - AVI, *Bare Soil Index* - BSI, *Shadow Index* - SI) pour obtenir l'indice final FCD (Forest Canopy Density). Les données d'entrée comprennent les bandes spectrales rouge (B04), bleue (B02), verte (B03), proche infrarouge (B08) et infrarouge à ondes courtes (B11) (ellipses bleues). Les étapes de traitement, représentées par des rectangles jaunes, incluent le calcul des indices individuels AVI, BSI et SI, réalisé dans l'outil Raster Calculator. La normalisation du SI pour produire le *Scaled Shadow Index* (SSI) est réalisée dans Raster Calculator. Les indices AVI et BSI sont ensuite combinés à l'aide de l'outil Principal Component pour générer le résultat nommé PCA (ellipse

verte). Ce dernier est normalisé dans Raster Calculator pour obtenir le *Vegetation Density* (VD). Enfin, le VD normalisé et le SSI sont intégrés dans Raster Calculator pour produire l'indice final FCD (ellipses vertes).



2.4.5.3 Ombrage riverain

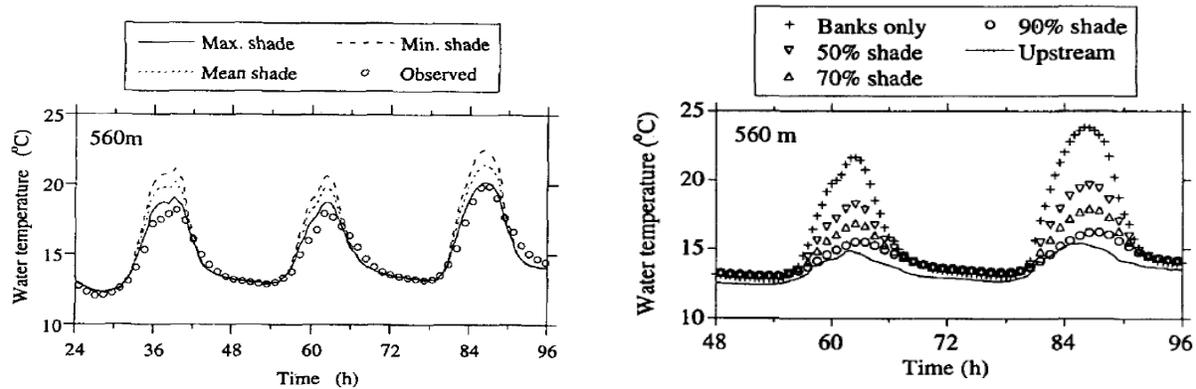
Plusieurs méthodes permettent de modéliser l'ombrage et d'évaluer ses effets thermiques. Autrement dit, ces techniques ne se limitent pas à la simulation de l'ombrage, mais permettent également d'analyser son influence sur les températures de surface ainsi que sur les propriétés thermiques des milieux aquatiques. Comme illustré dans l'analyse du facteur forestier, l'étude d'Ebersole et al. (2003) fournit un exemple de méthode de terrain pour évaluer les effets de l'ombrage riverain sur la température de l'eau. Les chercheurs ont réalisé des travaux sur le terrain pour évaluer les changements de température de l'eau ombragée à l'aide de thermographes dans les

rivières. Ils ont comparé des zones découvertes avec des zones couvertes par des bâches créant un ombrage simulant celui de la canopée. Les résultats ont révélé que l'ombrage artificiel réduisait les températures maximales quotidiennes de surface dans les zones d'eau froide de 2 à 4°C, soulignant l'impact majeur de la végétation riveraine sur les caractéristiques thermiques de ces zones.

Par ailleurs, pour étudier l'effet de l'ombrage sur la température de l'eau, les modèles informatiques offrent une approche complémentaire. Cependant, comme le soulignent Rutherford et al. (1997), en raison des défis posés par la géométrie de l'ombrage et les calculs de bilan thermique, les modèles informatiques s'avèrent particulièrement utiles pour quantifier l'impact de l'ombrage sur la température des cours d'eau. Certaines études ont quantifié les effets de l'ombrage sur la température de l'eau, en ajustant un facteur d'ombrage constant pour faire correspondre les températures observées et prédites (Rutherford, et al., 1997; Hockey, et al., 1982; Dymond, 1983). D'autres études ont modélisé l'ombrage riverain en utilisant un facteur constant, montrant que la plantation d'arbres le long des rives pouvait réduire les températures maximales quotidiennes de l'eau (Rutherford, et al., 1997; McBride, et al., 1993). D'autres travaux ont développé un modèle informatique pour calculer la radiation totale entrant dans les réservoirs, en prenant en compte les variations diurnes et saisonnières du soleil par rapport aux collines environnantes (Rutherford, et al., 1997; Mason, et al., 1983).

L'étude de Rutherford et al. (1997) a, quant à elle, développé un modèle informatique nommé STREAMLINE, destiné à prédire la température de l'eau dans les ruisseaux ombragés. Ce modèle, testé dans un petit ruisseau près de Hamilton, en Nouvelle-Zélande, simule les variations de température en tenant compte de l'ombrage, des caractéristiques du ruisseau et des conditions météorologiques. En utilisant seulement trois facteurs d'ombrage (l'angle de topographie, l'angle de canopée et le facteur d'ombrage de la canopée), le modèle a montré qu'un ombrage de 70% peut suffire pour maintenir des températures proches de 20°C, ce qui est crucial pour les organismes aquatiques sensibles (Figure 2-44).

Figure 2-44 Le graphique (A) illustre, à l'aide de quatre courbes distinctes, les variations de température au fil du temps, prévues et observées, en fonction des différents niveaux d'ombrage riverain sur le cours d'eau. Ce graphique



Finalement, l'approche qui nous intéresse le plus repose sur la géomatique. Sur le plan méthodologique, nous nous sommes principalement inspirés de l'étude de Yu, et al. (2020), qui analyse l'effet de l'ombrage des arbres urbains sur la température de surface terrestre (LST) pour atténuer les îlots de chaleur urbains (UHI). Pour modéliser l'ombrage des arbres, ils ont utilisé la fonction Hillshade dans un système d'information géographique (SIG), ce qui leur a permis de quantifier les variations spatio-temporelles de l'ombrage en tenant compte de la position du soleil et de la hauteur des arbres. Ensuite, ils ont évalué les conditions d'ombrage et d'illumination à l'échelle des pixels en fonction de la position du soleil et des conditions topographiques. Les valeurs d'ombrage du Hillshade vont de 0 (ombre totale) à 254 (pleine lumière) (Yu, et al.,2020). Afin de déterminer la couverture et la hauteur des arbres, les chercheurs ont utilisé des données de couverture terrestre et le modèle numérique de surface normalisé (nDSM) dérivé des nuages de points LiDAR. Ensuite, à l'aide du nDSM, ils ont extrait la hauteur des arbres en soustrayant le modèle numérique de terrain (MNT) du modèle numérique de surface (MNS) (Yu et al., 2020).

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons modélisé l'ombrage en utilisant les outils *Hillshade* et *Raster Calculator*, tout comme dans l'étude de Yu et al. (2020). Nous avons généré cet ombrage à partir du Modèle de Hauteur de Canopée (MHC), un produit dérivé du LiDAR disponible dans Forêt ouverte, avec une résolution de 1 mètre (MFFP, 2020). Ce raster fournit des valeurs numériques représentant la hauteur de la canopée forestière ainsi que d'autres éléments surélevés, tels que les bâtiments, en calculant la différence entre le modèle numérique de surface et le modèle numérique de terrain (MFFP, 2020).

Pour utiliser cet outil, trois variables essentielles doivent être complétées : le champ Azimuth, le champ Altitude et la case « Model shadows ». Il est important de s'assurer que la case « Model shadows » soit cochée :

- Azimuth : Il s'agit de l'angle azimutal de la source lumineuse, exprimé en degrés positifs de 0 à 360, mesurés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord. La valeur par défaut est de 315 degrés (ESRI).
- Altitude : Il représente l'angle de la source lumineuse au-dessus de l'horizon, exprimé en degrés positifs, avec 0 degré à l'horizon et 90 degrés directement au-dessus. La valeur par défaut est de 45 degrés (ESRI).

Ces paramètres permettent de modéliser correctement les ombres en fonction de la position du soleil. Pour déterminer les valeurs des paramètres « Azimuth » et « Altitude », nous avons sélectionné la même journée utilisée précédemment pour le choix de l'imagerie satellite, soit le 27 juillet 2024. Cette journée influence uniquement les valeurs de ces champs dans l'outil *Hillshade* (Ombrage). Les données nécessaires ont été obtenues à partir du site du *National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory Earth System Research Laboratories*, qui propose le NOAA Solar Calculator (NOAA, 2024). Ce calculateur fournit les informations requises en fonction des coordonnées (Latitude 47.426925, Longitude -70.036468), de la zone horaire (UTC -4 :00) et de la date choisie (27 juillet 2024). Dans le cadre de la modélisation de l'ombrage, nous avons opté pour une approche horaire.

Pour déterminer l'intervalle d'ensoleillement pertinent, nous avons effectué les étapes suivantes :

- 1) Identifié les heures d'ensoleillement quotidiennes pendant les mois d'été (juin, juillet, août) de 2020 à 2023, allant du lever au coucher du soleil (Tableau 2.7) : Les données ont été extraites du site du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – Global Monitoring Laboratory des Earth System Research Laboratories. Ainsi, nous avons identifié que la période d'ensoleillement s'étend de 4 h 45 à 20 h 40 (Tableau 2.7). Cependant, toutes les heures d'ensoleillement n'ont pas le même impact sur la température.

Tableau 2.7 Heures de lever et de coucher du soleil pour les mois d'été (juin à août) de 2020 à 2023

Mois	Heures de lever et de coucher du soleil	Année
Juin	4:45 am – 20:45 pm	2020
Juillet	4:45 am – 20:15 pm	
Août	5:15 am – 19:30 pm	
Juin	4:45 am – 20:45 pm	2021
Juillet	4:45 am – 20:15 pm	
Août	5:15 am – 19:30 pm	
Juin	4:45 am – 20:45 pm	2022
Juillet	4:45 am – 20:15 pm	
Août	5:15 am – 19:30 pm	
Juin	4:45 am – 20:45 pm	2023
Juillet	4:45 am – 20:15 pm	
Août	5:15 am – 19:30 pm	

2) Analysé les variations de la température moyenne par mois d'été de 2020 à 2023 et par jour : Cette analyse a pour but de déterminer les moyennes de température mensuelles et journalières, afin d'identifier les journées qui ne les dépassent pas. Cela nous permettra d'examiner les variations de température de l'air heure par heure et jour par jour durant les mois d'été, en nous concentrant sur les journées aux températures normales, tout en excluant celles présentant des températures extrêmes, qu'elles soient trop chaudes ou trop froides.

3) Analysé les variations de la température de l'air heure par heure et jour par jour durant les mois d'été de 2020 à 2023 : Cette analyse vise à identifier les moments où des changements significatifs de température se produisent, en lien avec les heures de lever et de coucher du soleil. Pour ce faire,

nous avons examiné la température moyenne journalière afin de sélectionner les journées dont la température correspond à cette moyenne ou ne la dépasse pas. Ensuite, nous avons analysé les valeurs horaires pour déterminer à quel moment des variations significatives se manifestent.

Nous définissons un changement significatif comme une variation d'au moins 1 °C dans un intervalle d'une heure, à partir de l'heure du lever du soleil jusqu'à celle du coucher. Pour l'heure du lever, nous avons observé la température autour de 5h00 (pour arrondir 4h45) et recherché le moment dans la série où un changement de température se produit, ce qui marquera le début de la période d'ensoleillement pour l'intervalle. Concernant l'heure du coucher, nous avons pris la température vers 20h00 (en arrondissant 20h45 et en excluant 21h00 car il y a peu ou pas de soleil), et nous avons examiné à quel moment une diminution significative de la température se produit entre l'heure précédente et celle du coucher. Nous avons choisi un intervalle d'une heure pour générer chaque couche d'ombrage. Bien que l'étude de Yu et al. (2020) ait utilisé des intervalles de 30 minutes, cette méthode aurait impliqué la création de 24 couches à combiner pour produire l'ombrage riverain cumulatif. En raison des contraintes technologiques et des capacités de l'ordinateur utilisé, nous avons préféré des intervalles horaires, limitant ainsi le nombre de couches tout en assurant une analyse pertinente et adaptée à nos objectifs.

Les données utilisées pour cette analyse proviennent du site d'Environnement et Ressources naturelles, dans la section Données historiques - Rapport de données horaires, et ont été collectées à la station La Pocatière, Québec, identifiée par le code climatologique 7054096.

4) Calculé la moyenne du nombre d'heures d'ensoleillement ayant un effet significatif sur la température dans la journée. Un exemple de cet exercice est illustré dans le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 Calcul des intervalles de la période d'ensoleillement importante pour être couverte par l'ombrage riverain

Date	T°C	Changement de température et période de réchauffement dans la journée	Moyenne du nb d'heures d'ensoleillement ayant un effet significatif sur la température dans la journée	Intervalle de la période d'ensoleillement et moyenne de la période d'ensoleillement début-fin
1	12	8 am à 6 pm = 10h	<p style="text-align: center;">Moyenne $(10+12+12+12+12+11+11+11+13+13+12+12+5+7+8)/15 = 10.7 \text{ heures} \approx 11 \text{ heures}$</p>	<p style="text-align: center;">Moyenne de l'heure du début d'ensoleillement $(8+6+6+7+7+8+8+7+6+6+6+6+12+8+11)/15 = 7.4 \approx 7 \text{ am}$</p> <p style="text-align: center;">Moyenne de l'heure de la fin d'ensoleillement $(6+6+6+7+7+7+7+6+7+7+6+6+5+3+7)/15 = 6.2 \approx 6 \text{ pm}$</p> <p style="text-align: center;">Intervalle de la période d'ensoleillement *: 7 am à 6 pm</p> <p style="text-align: center;">* où 6 am = 0, valeur de base pour le cumul du nombre d'heures d'ombrage par pixel</p>
2	17.4	6 am à 6 pm = 12h		
3	20.4	6 am à 6 pm = 12h		
4	22.7	7 am à 7 pm = 12h		
6	13.4	Journée froide		
7	18.6	7 am à 7 pm = 12h		
8	20.3	8 am à 7 pm = 11h		
9	20	8 am à 7 pm = 11h		
10	22.5	7 am à 6 pm = 11h		
13	16.6	6 am à 7 pm = 13h		
14	18.4	6 am à 7 pm = 13h		
25	23.4	6 am à 6 pm = 12h		
27	23.4	6 am à 6 pm = 12h		
28	18.5	12 pm à 5 pm = 5h		
29	17.3	8 am à 3 pm = 7h		
30	19.2	11 am à 7 pm = 8h		

En déterminant ainsi la durée d'ensoleillement et l'intervalle moyen affectant la température journalière, nous avons identifié les valeurs d'azimut et d'altitude du soleil pour chaque heure de l'intervalle dans le site du NOAA mentionné antérieurement. L'intervalle de la période d'ensoleillement inclut également une heure avant le changement de température significatif pour établir une valeur de départ dans le calcul de l'ombrage par heure et par pixel.

Cette couche sera initialement définie à 0, et les heures suivantes recevront une valeur de 1. Ainsi, l'outil *Raster Calculator* (Calculatrice raster) (Tableau 2.9) pourra additionner les pixels et illustrer la somme totale des heures d'ombrage. Il est important de noter que cette méthode ne prend pas en compte l'ombrage consécutif ou discontinu, mais représente la somme totale d'ombrage pendant la journée par pixel à une résolution de 1 m x 1m. Les valeurs de l'azimut et de l'altitude ont été arrondies pour s'adapter à l'outil *Hillshade* (Ombrage).

Tableau 2.9 Paramètres pour la modélisation de l'ombrage riverain (azimut et altitude)

Date	Poids (cummulatif)	Heure	Azimut	Azimut (arrondi)	Altitude	Altitude (arrondi)
19 juin 2020 Latitude 47.42586 Longitude -70.045227 UTC offset -4:00 Début de l'intervalle: 7h00 Fin de l'intervalle: 18h00	0	6h00	66.57	67	10.49	10
	1	7h00	76.77	77	20.07	21
	2	8h00	87.19	87	30.09	31
	3	9h00	98.62	99	40.2	40
	4	10h00	112.42	112	49.96	50
	5	11h00	130.91	131	58.6	59
	6	12h00	157.23	157	64.61	65
	7	13h00	190.26	190	65.74	66
	8	14h00	219.9	220	61.38	61
	9	15h00	241.11	241	53.52	54
	10	16h00	256.38	256	44.08	45
	11	17h00	268.54	269	34.04	34
12	18h00	279.23	279	23.95	24	

2.4.6 Atmosphérique

La radiation solaire est la principale source d'énergie qui influence de nombreux processus physiques et biologiques sur Terre (Huang et al., 2009). Par exemple, dans des régions comme Yellowstone en hiver, les populations de grands herbivores se concentrent davantage dans les zones recevant une radiation solaire élevée. Cependant, la modélisation de la radiation solaire devient plus complexe dans des zones montagneuses avec une topographie variée. Les variations spatiales

et temporelles de la radiation solaire sont difficiles à mesurer, et les données disponibles sont souvent limitées, car les stations météorologiques sont principalement situées dans des zones plates et peu peuplées, ne capturant pas correctement la diversité des conditions topographiques (Huang, et al., 2009).

Cette complexité s'étend également aux milieux aquatiques, où la radiation solaire joue un rôle déterminant dans les régimes de température des rivières. Son influence dépend de multiples facteurs, tels que la géomorphologie, l'hydrogéologie et les caractéristiques paysagères (Constantz, 1998; Soulsby et al., 2006; Winter et al., 1998; O'Sullivan, et al., 2019b). Selon Caissie (2006), les flux thermiques à l'interface eau/air sont principalement dus à la radiation solaire, à la radiation longue onde, à l'évaporation et au transfert de chaleur convectif. Dans les grandes rivières, les échanges thermiques de surface dominant en raison de l'exposition au soleil et au vent. En revanche, dans les petites rivières où la végétation riveraine est dense, ces flux sont atténués, laissant une plus grande part aux échanges thermiques provenant du fond de la rivière (Dong et al., 1998; Caissie, 2006).

Les températures des rivières, notamment dans les affluents, sont influencées par des variables paysagères comme l'exposition solaire et la géologie. O'Sullivan et al. (2019b) ont démontré que ces variables jouent un rôle clé, comme en témoignent les analyses basées sur TIR et les modèles de régression. Dans leur étude, l'analyse de la radiation solaire a été effectuée à l'aide de l'outil *Area Solar Radiation* (Rayonnement solaire zonal) d'ArcGIS, utilisant un MNT rééchantillonné à 10 m pour simuler l'ensoleillement d'une journée donnée (O'Sullivan et al., 2019b). Cette méthode a également été adoptée dans le cadre de notre étude pour assurer une approche comparable et pertinente.

Malgré l'importance de la radiation solaire dans la modélisation thermique, des limitations persistent. Les modèles sont parfois affectés par l'imprécision des données, en particulier les difficultés rencontrées par le LIDAR pour capter les surfaces d'eau, ce qui génère des incertitudes dans le MNT (Yan, 2023). Bien que l'analyse de la radiation solaire sur le bassin versant reste adéquate, il serait pertinent d'explorer des méthodes plus simples et adaptées aux données ouvertes pour améliorer la précision des résultats.

2.4.6.1 Insolation solaire surfacique

Afin d'estimer l'énergie solaire reçue sur la topographie du bassin versant, notamment sur les berges de la rivière et la surface du cours d'eau, nous avons utilisé l'outil *Area Solar Radiation* (Rayonnement solaire zonal). Cet outil calcule le rayonnement solaire entrant à partir d'une couche matricielle, en l'occurrence le MNT. Il est conçu pour des analyses à des échelles locales. Cette méthode a également été utilisée dans le cadre de l'étude de O'Sullivan et al. (2019) afin de mesurer l'insolation solaire surfacique et de mieux comprendre le régime thermique des rivières.

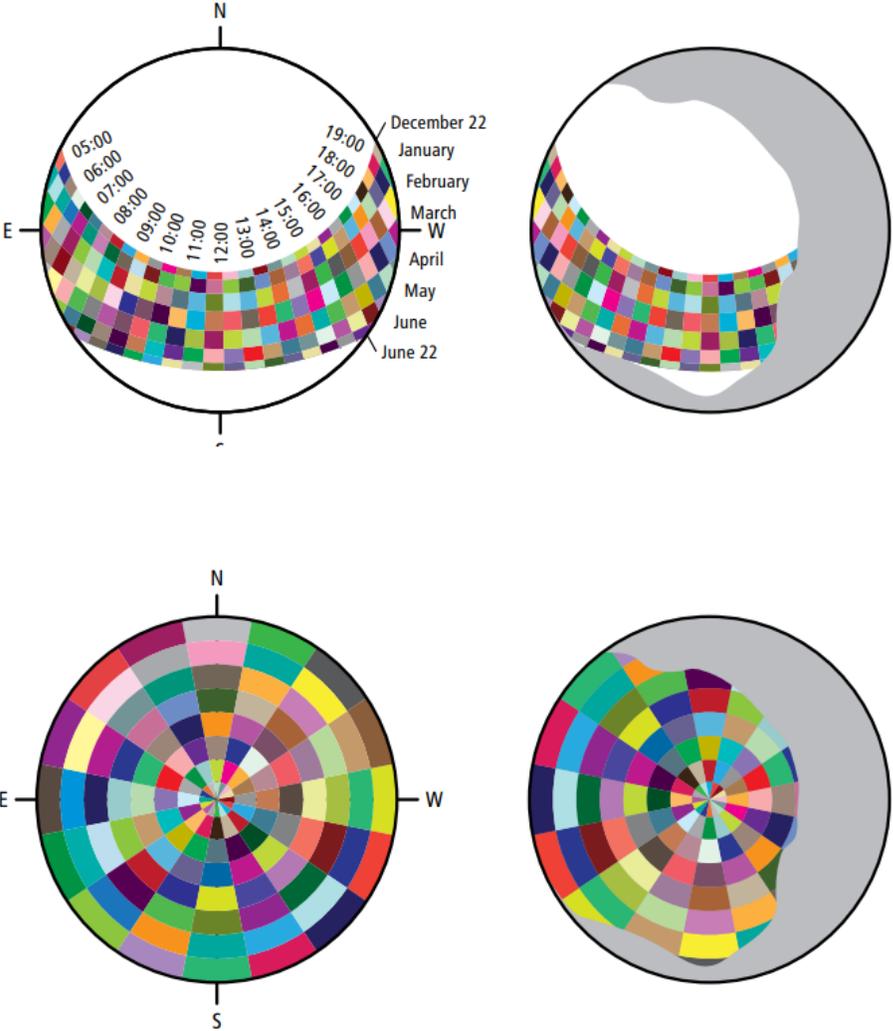
L'outil propose plusieurs paramètres liés à la topographie et au rayonnement solaire. Pour la topographie, la pente et l'orientation (inclinaison et exposition) sont automatiquement calculées à partir du MNT intégré. La topographie constitue un facteur clé influençant la variabilité spatiale du rayonnement solaire reçu. Dans des environnements topographiquement complexes, comme les régions montagneuses aux reliefs marqués et aux orientations variées, l'ombre portée et l'exposition des surfaces au soleil sont plus susceptibles de varier, rendant nécessaire l'ajustement des paramètres pour mieux représenter les conditions locales (Figure 2-45) (Huang et al., 2009).

Concernant le rayonnement solaire, il est possible de choisir le type de couverture nuageuse, qu'elle soit uniforme ou personnalisée. Parmi les autres options associées figurent les directions liées au champ de vision, les divisions zénithales (secteurs dans le ciel) et les divisions azimutales orientées par rapport au nord. Cette variabilité peut également être influencée par des facteurs tels que la latitude du site, la couverture nuageuse locale au moment des mesures et les variations de l'angle solaire liées à l'heure et à la période de l'année, étant tous des paramètres ajustables dans l'outil (Huang et al., 2009).

Pour tous ces paramètres, nous avons opté pour les valeurs par défaut recommandées. Cette décision repose sur le fait que la topographie de la zone étudiée est peu complexe, caractérisée par des pentes faibles et une surface relativement plane, ainsi que par la journée choisie pour modéliser l'insolation solaire basée sur le choix de l'imagerie satellite qui avaient une couverture nuageuse maximale de 10 % (Huang et al., 2009). Ainsi, le seul paramètre que nous avons spécifiquement choisi est la date, qui doit être inscrite en date julienne. Nous avons utilisé la même date que celle retenue pour l'imagerie satellite et l'ombrage riverain, soit le 27 juillet 2024, correspondant au 209e

jour de l'année (année bissextile). L'insolation solaire peut être calculée sur différentes périodes et intervalles, tels que des heures, des jours ou des mois. Nous avons opté pour la période d'ensoleillement discutée dans la section sur l'ombrage riverain, soit de 6h00 à 18h00.

Figure 2-45 Illustration des paramètres topographiques comprenant l'orientation de la pente et la division azimuthale. En haut à gauche, une carte solaire, calculée pour une latitude de 45 degrés nord et basée sur la date du solstice, montre les mois et les heures. En haut à droite, cette carte est combinée à une carte de visibilité afin d'estimer le rayonnement solaire direct. En bas à gauche, une carte du ciel illustre les secteurs définis par 8 divisions zénithales et 16 divisions azimuthales, chaque secteur étant coloré pour représenter l'origine du rayonnement diffus. Enfin, en bas à droite, la superposition de la carte solaire et de la carte de visibilité est utilisée pour affiner le calcul du rayonnement solaire direct. (Huang, et al., 2009)



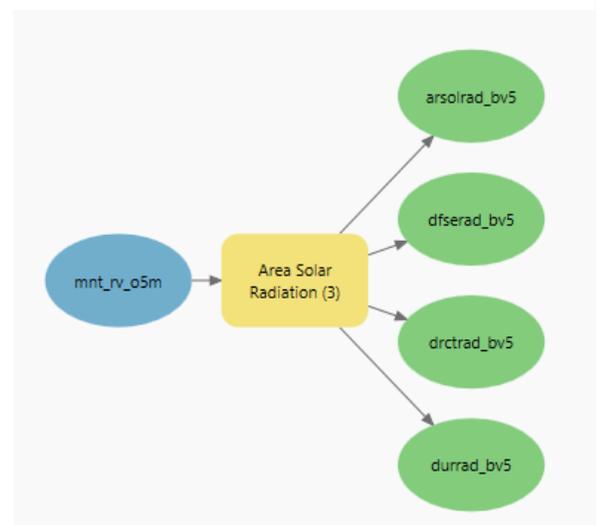
L'outil calcule l'insolation solaire par pixel en fonction de la surface du MNT inséré et de sa résolution, qui est de 1 mètre par 1 mètre dans ce cas (MFFP, 2020). Cependant, en raison des limitations de performance de l'ordinateur, il était impossible de calculer l'insolation solaire pour chaque pixel à cette résolution. Nous avons donc effectué des tests à différentes résolutions, telles que 2,5 x 2,5 m et même 10 m x 10 m. Bien que l'analyse avec une résolution de 1 m x 1 m soit idéale, mais irréalisable, une résolution de 5 m x 5 m a été jugée adéquate, offrant un bon compromis entre précisions et performance de l'ordinateur.

Les résultats de l'outil se déclinent en quatre couches matricielles (Figure 2-46):

- Radiation directe (facultatif) : La radiation solaire directe pour chaque emplacement, en wattheure par mètre carré (WH/m²).
- Radiation diffuse (facultatif) : La radiation solaire diffuse pour chaque emplacement, en wattheure par mètre carré (WH/m²).
- Durée de radiation directe (facultatif) : La durée de la radiation solaire directe, en heures.
- Radiation globale : La somme de la radiation directe et diffuse pour chaque emplacement, en wattheure par mètre carré (WH/m²).

Nous avons choisi d'utiliser uniquement le raster de radiation globale, car il englobe l'ensemble des données. Ce résultat, sous forme de raster à virgule flottante, représente la somme de la radiation solaire directe et diffuse pour chaque emplacement de la surface d'entrée.

Figure 2-46 Automatisation dans ModelBuilder d'ArcGIS Pro illustrant le processus de calcul de l'insolation surfacique. La donnée d'entrée utilisée est un MNT à une résolution de 5 m x 5 m (ellipse bleue). Le traitement a été réalisé à l'aide de l'outil Area Solar Radiation, produisant quatre résultats principaux (ellipses vertes) : Radiation directe (arsolrad_bv5), Radiation diffuse (dfserad_bv5), Durée de radiation directe (drctrad_bv5) et Radiation globale (durrad_bv5).



2.5 ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE (AMCP)

2.5.1 Pondération des facteurs et des variables

Dans le cadre de l'AMC pondérée, chaque critère se voit attribuer un poids totalisant 100. La répartition de ce poids entre les différents facteurs physiques et leurs variables a été réfléchi en intégrant plusieurs éléments essentiels issus de la littérature scientifique consultée pour cette recherche. Ainsi, le choix et la justification des pondérations pour la formule de l'AMCp reposent sur les connaissances acquises au cours de cette recherche et sur les liens établis entre les facteurs physiques, les mécanismes et les indicateurs identifiés, illustrant leur dynamique complexe.

Dans un premier temps, nous avons classé les facteurs selon deux catégories : les facteurs « stables » et les facteurs « susceptibles aux variations ». Ensuite, nous avons établi des critères de caractérisation permettant de hiérarchiser les facteurs et leurs indicateurs, pour déterminer la pondération à attribuer à chacun :

- Représentation spatiale des données (échelle) : bassin versant ou rivière.
- Influence sur la température de l'eau.
- Stabilité temporelle du facteur.
- Contribution à la formation de refuges thermiques.

Ces critères ont servi de base pour guider une analyse approfondie visant à attribuer une pondération proportionnelle à l'importance relative de chaque facteur. Tout d'abord, la représentation spatiale des données, qu'il s'agisse du bassin versant ou de la rivière, a joué un rôle clé, car elle influence directement le résultat final lors de l'agrégation des indicateurs. L'influence de chaque facteur sur la température de l'eau a ensuite été évaluée afin de donner davantage de poids aux critères ayant un impact direct et significatif sur cette température. La stabilité des facteurs dans le temps a également été un critère déterminant, car certains facteurs présentent des variations plus marquées que d'autres, pouvant entraîner des fluctuations dans les températures de l'eau. Enfin, la capacité de chaque facteur à contribuer à la formation de RT a été prise en compte, car les zones protégées peuvent jouer un rôle crucial dans le maintien de températures stables. Ces éléments ont permis de déterminer une pondération équilibrée, reflet de l'importance relative de chaque facteur dans l'AMC pondérée.

Les facteurs physiques influençant la température de l'eau ont été classés en deux catégories : les facteurs stables et ceux susceptibles aux variations. Les facteurs stables se caractérisent par leur capacité à rester relativement constants dans le temps, exerçant une influence concrète sur la température de l'eau. Bien qu'ils soient moins sensibles aux fluctuations rapides, ils ne sont pas totalement à l'abri des facteurs exogènes tels que les changements climatiques ou les activités humaines. Toutefois, leurs effets face aux changements climatiques se manifestent de manière plus progressive, contrairement aux facteurs plus variables. Ces derniers, dits « susceptibles aux variations », sont plus facilement influencés par des perturbations extérieures, comme les activités anthropiques, et leurs effets sur la température de l'eau sont plus immédiats. Par exemple, une coupe forestière soudaine entraîne une perte rapide de la couverture végétale et un impact direct sur la température de l'eau. Les facteurs susceptibles aux variations sont également dépendants d'autres éléments, ce qui peut en réduire l'efficacité pour influencer la température de manière stable. Cependant, les facteurs stables, comme les dépôts de surface ou les tributaires, sont moins affectés par des changements rapides. Un changement significatif dans ces éléments, tel que la modification du cours d'un tributaire, prendrait un temps considérable, ce qui les rend plus résistants aux variations immédiates.

Ainsi, les facteurs stables identifiés incluent les facteurs hydrogéologiques, hydrographiques, géologiques et géomorphologiques. En revanche, les facteurs susceptibles aux variations regroupent les facteurs forestiers et atmosphériques. Chaque facteur a été caractérisé selon des critères précis mentionnés antérieurement et subdivisé en différentes sous-classes. L'exercice de caractérisation a été mené par facteur et par variable. Par exemple, le facteur hydrogéologique, qui ne comporte qu'une seule variable, a été analysé parallèlement à des variables du facteur hydrographique, comme les tributaires froids et les plumes de confluence. Ces éléments ont été jugés comme exerçant une forte influence sur la température de l'eau et contribuant à la formation de RT. Cependant, leur échelle spatiale diffère : l'hydrogéologique agit à l'échelle du bassin versant, tandis que les variables hydrographiques sont localisées au niveau du cours d'eau. Ces deux types de facteurs sont néanmoins susceptibles aux changements climatiques et interagissent avec d'autres facteurs, tels que le facteur géologique.

Concernant le facteur géologique et ses deux variables, il a été déterminé qu'il n'a pas d'effet direct sur la température ni sur la formation de RT. Sa représentation spatiale se situe au niveau du bassin versant, et bien qu'il soit considéré stable dans le temps, il reste essentiel pour appuyer d'autres facteurs, notamment les résurgences d'eaux souterraines, qui en dépendent fortement. Certains facteurs stables exercent une influence notable sur la température de l'eau, sans toutefois former de RT. Parmi eux figurent le facteur géomorphologique, caractérisé par le gradient de pente à l'échelle du cours d'eau, et le facteur hydrographique, avec des variables telles que le potentiel d'accumulation d'eau et les milieux humides, à l'échelle du bassin versant. Ces derniers sont également sensibles aux changements climatiques.

Enfin, les facteurs susceptibles aux variations ont été subdivisés en deux sous-classes. La première regroupe des éléments exerçant une influence sur la température de l'eau, sans formation de RT, mais qui sont davantage vulnérables aux interventions humaines. Cela inclut le facteur forestier, dont les variables sont réparties entre une représentation spatiale au niveau du bassin versant et au niveau du cours d'eau. La seconde sous-classe comprend des facteurs exerçant une influence significative sur la température de l'eau, sans formation de RT, mais étant principalement affectés par des caractéristiques environnementales. Cette catégorie inclut le facteur atmosphérique et la variable géomorphologique relative à l'orientation des pentes. Par exemple, des éléments tels que la couverture nuageuse joue un rôle plus déterminant dans ce contexte, à l'échelle du bassin versant. La Figure 2-47 illustre le résumé de l'ensemble des éléments décrits précédemment.

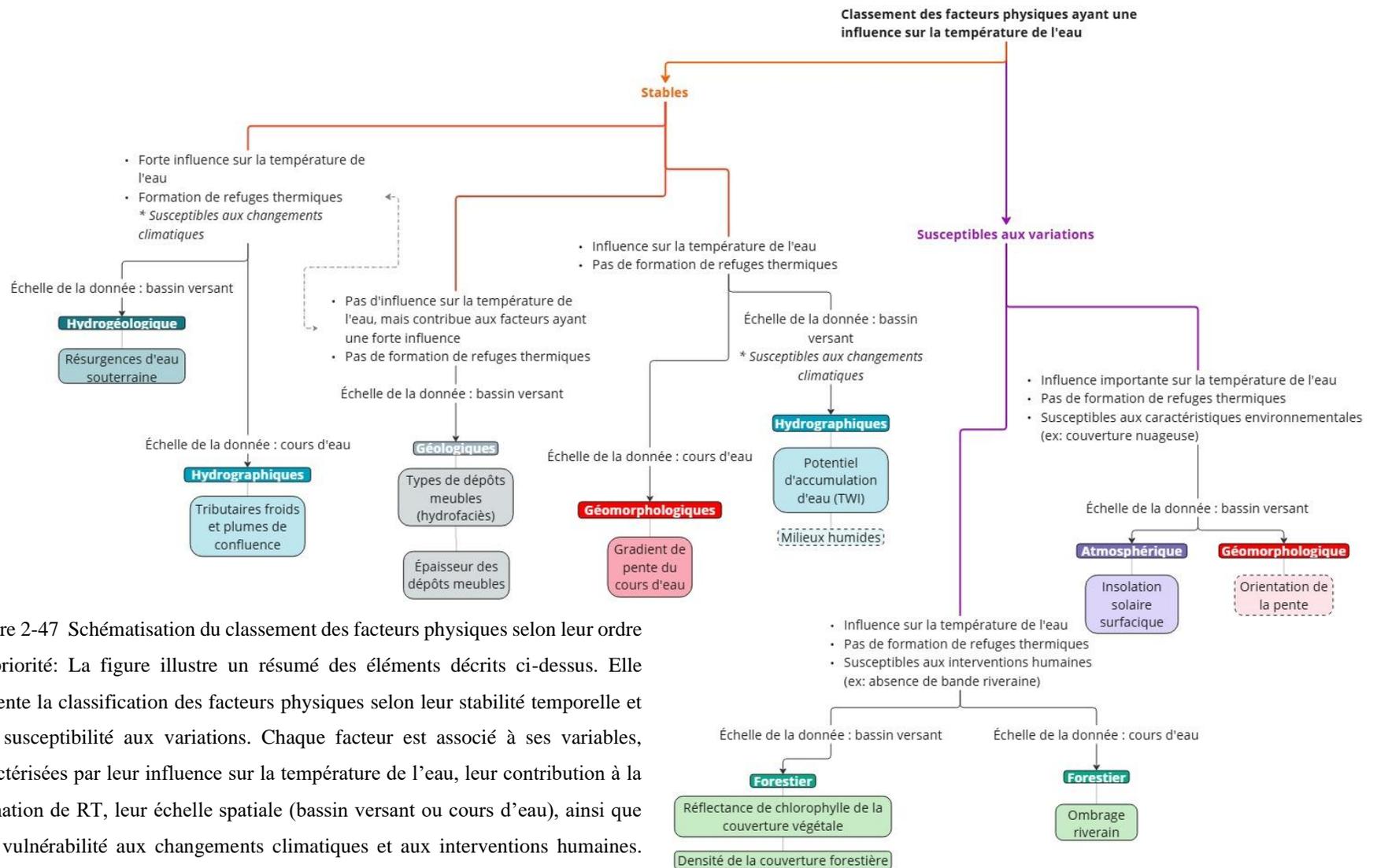
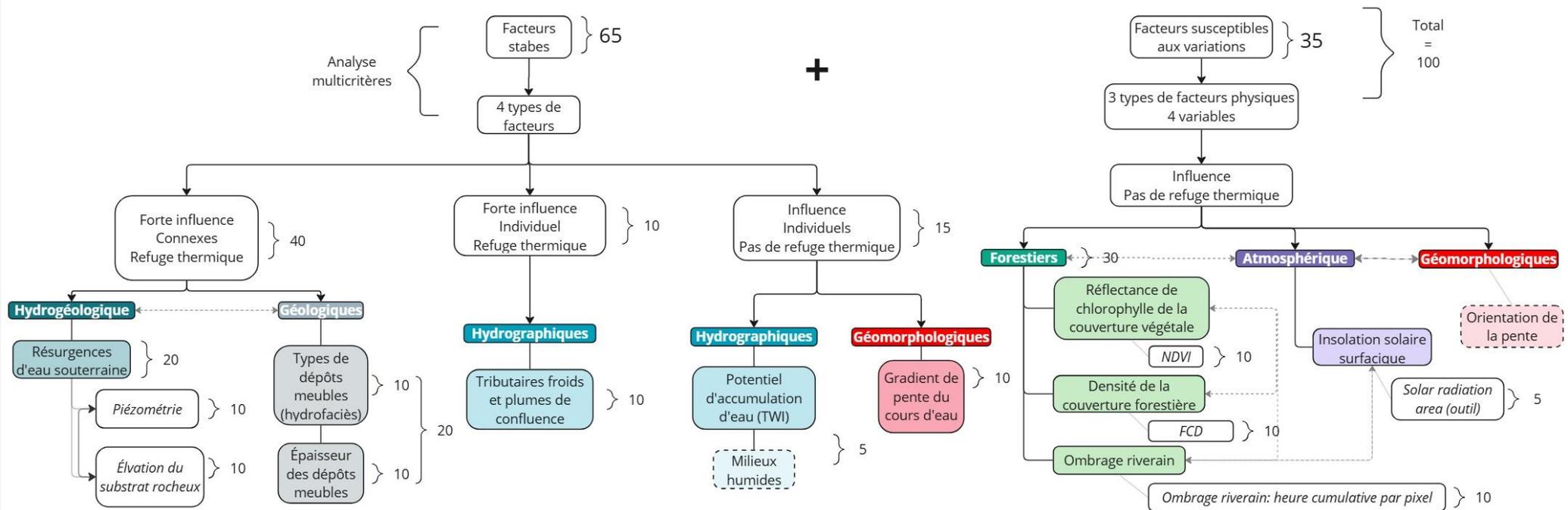


Figure 2-47 Schématisation du classement des facteurs physiques selon leur ordre de priorité: La figure illustre un résumé des éléments décrits ci-dessus. Elle présente la classification des facteurs physiques selon leur stabilité temporelle et leur susceptibilité aux variations. Chaque facteur est associé à ses variables, caractérisées par leur influence sur la température de l'eau, leur contribution à la formation de RT, leur échelle spatiale (bassin versant ou cours d'eau), ainsi que leur vulnérabilité aux changements climatiques et aux interventions humaines. Cette représentation visuelle vise à synthétiser les relations complexes entre ces facteurs et leur rôle dans la dynamique thermique des cours d'eau.

Cette réflexion a finalement permis d'établir une pondération des facteurs variables et de leurs indicateurs selon le contexte, tout en respectant le total de 100 (Figure 2-48). Nous avons déterminé que les facteurs stables recevraient un poids global de 65, tandis que les facteurs susceptibles aux variations auraient un poids de 35. Parmi les facteurs stables, quatre ont été identifiés : hydrogéologique, géologique, hydrographique et géomorphologique, chacun subdivisé en trois catégories selon leur influence sur la température et leur association avec des RT.

Les facteurs exerçant une forte influence sur la température, interconnectés et associés à la création de RT, se voient attribuer un poids de 40, réparti entre deux facteurs : l'hydrogéologique (20, soit 10 pour chacune de ses deux variables) et le géologique (20, également réparti entre ses deux variables). Les facteurs exerçant une forte influence, mais restant individuels et associés aux RT reçoivent un poids de 10, attribué à une variable du facteur hydrographique. Enfin, les facteurs exerçant une influence moyenne, également individuels et non associés à des RT, se partagent un poids de 15, réparti entre une variable du facteur hydrographique (5) et le facteur géomorphologique (10). En ce qui concerne les facteurs susceptibles aux changements, trois principaux facteurs sont pris en compte : forestier, atmosphérique et géomorphologique, chacun comportant une sous-classe. Le facteur forestier a un poids de 30, réparti également entre ses différentes variables et indicateurs, chacun recevant un poids de 10. Quant au facteur atmosphérique, il se voit attribuer un poids de 5.

Figure 2-48 Schématisation de la distribution des poids pour l'Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp) : La figure illustre la répartition des poids entre les facteurs stables (65) et susceptibles aux variations (35) pour le calcul de l'AMC. Les facteurs stables, influençant la température et les RT, reçoivent un poids de 40, réparti entre l'hydrogéologique (20) et le géologique (20), tandis que d'autres facteurs moins influents reçoivent 15. Les facteurs susceptibles aux variations, comme le forestier (30) et



2.5.2 Méthodologie d'agrégation

Pour le résultat final, trois étapes principales ont été suivies. Tout d'abord, la délimitation de la représentation spatiale du résultat de l'AMC a été effectuée. Ensuite, nous avons veillé à assurer la cohérence dans l'interprétation des résultats des indicateurs pour leur intégration dans l'AMC. Enfin, tous les facteurs ont été normalisés afin de les rendre comparables et additionnables entre eux. Ces étapes nous ont permis d'intégrer les indicateurs finaux normalisés dans une calculatrice matricielle (Raster Calculator), en appliquant la formule que nous avons développée.

Une zone tampon de 60 mètres autour de chaque ligne du littoral a été établie à l'échelle du bassin versant, conformément aux recommandations relatives aux rivières à saumon. Cette mesure vise à garantir un périmètre cohérent avec les objectifs de protection et de conservation du saumon atlantique (Gouvernement du Canada, 1990; Gouvernement du Québec, 2010; Gauthier, 2001; Dussault et al., 2013; FQSA, 2022b). Les couches produites par indicateurs ont été découpées selon cette zone tampon pour produire l'AMC. Bien qu'une bande de 20 mètres soit souvent jugée suffisante pour protéger les habitats aquatiques en forêt publique (MDDELCC, 2015; AGRCQ, 2024), une largeur de 60 mètres s'avère mieux adaptée aux besoins écologiques des rivières à saumon. Ce choix s'aligne également sur les règlements de pêche du Québec et la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, qui prévoient une bande de 60 mètres sur les terres publiques. Cette approche favorise la préservation des écosystèmes et le maintien d'habitats essentiels pour la faune et la flore (AGRCQ, 2024). Cela nous a permis de garantir que l'intégration des indicateurs dans l'AMC ne génère pas de biais. Comme les critères ne couvrent pas tous les mêmes zones, cela pourrait empêcher une agrégation correcte des indicateurs, entraînant ainsi des résultats sous-estimés.

Une fois les délimitations des résultats pour la représentation spatiale établies, il était essentiel d'assurer l'intégration correcte des facteurs dans la formule. En effet, chaque indicateur représente des informations différentes, avec des valeurs et des échelles variées, et certaines peuvent même nécessiter une interprétation inversée. Par exemple, comme montré précédemment, la carte piézométrique présente des valeurs élevées et basses, mais dans ce cas, une valeur plus basse indique une plus grande capacité de résurgence, en raison de la logique de l'écoulement potentiel qui suit le même principe que l'écoulement de surface, allant du point le plus élevé vers le plus

bas. Ainsi, nous souhaitons que les valeurs les plus basses soient considérées comme les plus importantes lorsqu'elles seront intégrées dans l'AMC. D'autres couches ont également dû être inversées, comme celles du substrat rocheux et les plumes de confluence. Ainsi, pour inverser les valeurs, nous avons utilisé Raster Calculator avec la formule suivante (Formule 2.10):

Formule 2.10 Inversion des valeurs des couches

$$\text{Valeurs des couches inversées} = \text{Couche} * -1$$

Ensuite, étant donné que chaque indicateur représente des informations non comparables entre elles, nous avons procédé à la normalisation des résultats dans *Raster Calculator* afin de pouvoir les agréger correctement. Ces deux étapes ont facilité la mise en relation entre les différents indicateurs que nous avons choisis, ainsi que les valeurs des paramètres. Autrement dit, les valeurs positives interagissent correctement entre elles, tout comme les valeurs négatives, ce qui permet une agrégation plus cohérente. Pour ce faire, nous avons appliqué un calcul de normalisation afin que toutes les valeurs soient transformées dans une plage de 0 à 1. La formule utilisée pour cette normalisation est la suivante (Formule 2.11) :

Formule 2.11 Normalisation des indicateurs

$$\text{Normalisation des indicateurs} = \frac{(\text{Couche} - \text{MinValue})}{(\text{MaxValue} - \text{MinValue})}$$

Pour obtenir le résultat final, nous avons utilisé Raster Calculator. Avant d'additionner les indicateurs en fonction de leur pondération, nous avons restreint la représentation spatiale du résultat de l'AMC à la couche polygonale de la rivière, numérisée à partir de la photo-interprétation du hillshade.

Finalement, nous avons utilisé la formule que nous avons créée avec les pondérations définies pour agréger tous les indicateurs identifiés pour les zones de refroidissement (Formule 2.12) :

Formule 2.12 Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp) : Zones de refroidissement et de réchauffement

$$\begin{aligned} & \text{AMC pondérée : zones de refroidissement =} \\ & ("Élévation du substrat rocheux" * 10 + "Piézométrie" * 10 + "Tributaires froids et plumes de confluence" * \\ & 10 + "TWI" * 5 + "Épaisseur des sédiments" * 10 + "Hydrofaciès" * 10 + "Gradient de pente du cours \\ & d'eau (%)" * 10 + "NDVI" * 10 + "FCD" * 10 + "Ombrage riverain" * 10 + "Insolation surfacique" * 5) \\ & / 100 * 100 \end{aligned}$$

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir du traitement des données exposées dans le CHAPITRE 2. Il comprend l'analyse des résultats de l'Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp), ainsi que leur validation en utilisant les refuges thermiques identifiés par Dugdale et al. (2013), et les données recueillies lors d'une campagne terrain de courte durée. Rappelons que l'objectif principal de ce travail était de développer une méthode SIG permettant de cartographier et d'identifier les zones potentielles de refroidissement et de réchauffement dans la rivière Ouelle, en modélisant et en agrégeant les facteurs physiques influençant la température de l'eau. Le résultat attendu est une représentation spatiale du potentiel de refroidissement le long du cours d'eau. Nous allons présenter les résultats (Tableau 3.1) du Chapitre 2 en fonction des objectifs et sous-objectifs identifiés au Chapitre 1 :

Tableau 3.1 Synthèse des résultats par objectif et sous-objectif

Objectifs	Résultats	Sous-objectifs (S-O)	Résultats
Objectif 1 Développer une méthode d'identification des zones de refroidissement dans la rivière Ouelle	Une formule adaptée à une Analyse Multicritères pondérée (AMCp), ajustable en fonction du contexte du bassin versant et de la disponibilité des données. La formule et l'AMCp reposent sur 11 indicateurs identifiés à partir de six facteurs physiques influençant le régime thermique de l'eau et de leur capacité à être modélisés. La pondération de chaque indicateur a été déterminée en fonction de sa représentation spatiale, de sa stabilité spatiotemporelle, de son impact sur la température de l'eau et de son rôle dans la création ou le maintien des refuges thermiques (RT).	S-O 1.1 Modéliser les indicateurs identifiés représentant chaque variable associée à un facteur physique de refroidissement	Les 11 indicateurs identifiés par variables associée à un facteur physique de refroidissement on pu être modélisés et cartographiés avec succès. Certains indicateurs ont été modélisés à l'échelle du bassin versant, alors que d'autres ont été modélisés à l'échelle du cours d'eau.
		S-O 1.2 Agréger tous les indicateurs modélisés afin de produire la représentation spatiale du potentiel de refroidissement du cours d'eau.	En utilisant l'outil Raster calculator il a été possible d'agréger tous les indicateurs modélisés en attribuant des pondérations à chaque indicateur permettant de produire un résultat illustrant l'interaction entre ces facteurs
Objectif 2 Cartographier et valider les zones potentielles de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc)	Une carte des zones potentielles de refroidissement et de réchauffement a été produite. Elle permet d'abord de caractériser le cours d'eau en fonction de la dynamique des six facteurs physiques influençant la température de l'eau : hydrogéologiques, hydrologiques, géologiques, géomorphologiques, forestiers et atmosphériques. Cette carte sert également à identifier les sites potentiellement plus vulnérables aux pressions anthropiques et climatiques. Enfin, elle constitue un outil d'aide à la décision pour orienter les travaux de terrain liés à la conservation et à la protection de l'habitat du saumon, ainsi qu'à la planification stratégique du déploiement des thermographes.	S-O 2.1 Identifier et cartographier les zones de refroidissement et de réchauffement en fonction de leur importance selon l'Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp).	Nous avons élaboré une formule pondérée pour créer notre AMCp, en attribuant des poids à chaque indicateur modélisé dans S-O 1.1. L'outil Raster Calculator a ensuite agrégé les indicateurs en fonction de leurs pondérations, produisant ainsi un résultat illustrant l'interaction entre ces facteurs. Ce processus a permis d'obtenir la représentation spatiale de l'AMCp, identifiant les zones de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc) potentiel.
		S-O 2.2 Valider la cartographie en comparant les zones identifiées avec les refuges thermiques (RT) géolocalisés.	Un total de 48 RT se trouvent dans les ZRf potentiel, ce qui suggère qu'ils sont probablement moins vulnérables aux extrêmes climatiques ou hydroclimatiques. En revanche, 68 RT ont été identifiés dans les ZRc potentiel, ce qui indique qu'ils pourraient être davantage exposés aux pressions climatiques et/ou anthropiques.
		S-O 2.3 Valider la cartographie des zones de refroidissement et de réchauffement sur le terrain.	Sur le terrain, nous avons pu valider que la représentation spatiale de l'AMCp correspond bien à la réalité, c'est-à-dire que les sites à fort potentiel de réchauffement présentent des conditions qui les rendent plus susceptibles au réchauffement. En revanche, les sites à fort potentiel de refroidissement affichent effectivement des caractéristiques physiques favorisant le refroidissement du cours d'eau. Cependant, nous avons observé que, dans certains sites à potentiel de réchauffement, les températures étaient plus fraîches que celles des sites à fort potentiel de refroidissement, avec une différence de 0,2 °C, restant en dessous des seuils de température dangereuse pour le saumon.
Résumé			L'ensemble des résultats indique que cette méthodologie permet d'identifier les sites susceptibles au réchauffement ou au refroidissement. Lorsque les RT sont déjà géolocalisés, l'AMCp permet de déterminer lesquels sont les plus vulnérables face aux pressions anthropiques et/ou climatiques en mettant en relation les différents facteurs physiques influençant la température de l'eau. Cet outil s'avère ainsi précieux pour la caractérisation des cours d'eau, la prise de décision concernant les secteurs vulnérables, ainsi que pour le déploiement stratégique des thermographes en vue du suivi des températures.

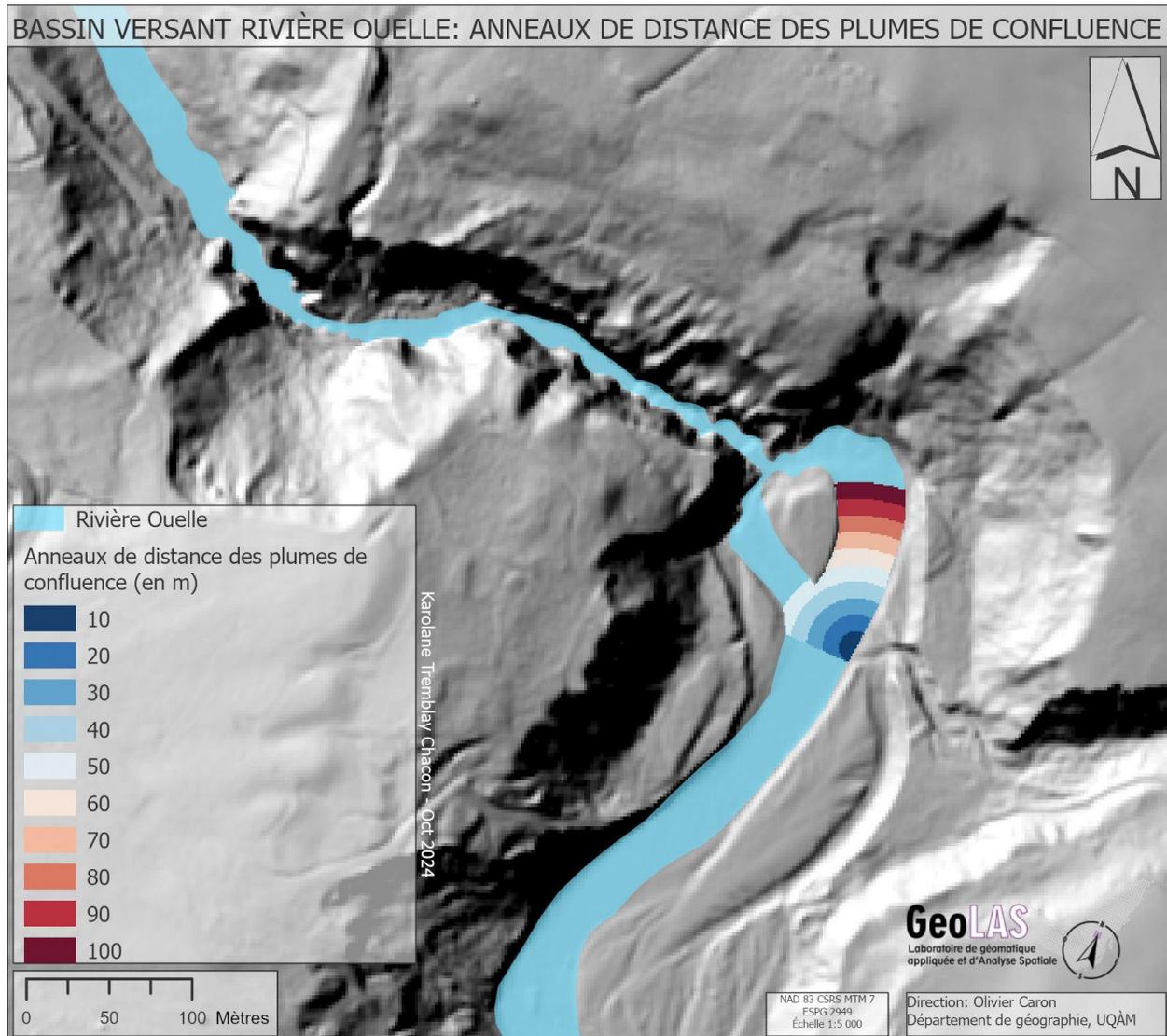
3.1 SOUS-OBJECTIF 1.1: DÉVELOPPER DES MODÈLES POUR REPRÉSENTER CHAQUE FACTEUR PHYSIQUE CONTRIBUANT AUX PROCESSUS DE REFROIDISSEMENT DE L'EAU, EN IDENTIFIANT ET QUANTIFIANT LES INDICATEURS

3.1.1 Hydrographique

3.1.1.1 Anneaux de distance des plumes de confluence

Nous avons représenté au total 13 points d'anneaux de distance. Parmi ces 13 points, 6 sont associés aux RT de confluence identifiés par Dugdale et al. (2013), tandis que les autres points correspondent aux zones de contact entre les tributaires ou les lignes de drainage et le cours d'eau principal. En raison de l'utilisation des RT et des difficultés de visibilité pour représenter tous les anneaux de distance sur une carte à l'échelle de la zone d'étude, nous avons choisi d'illustrer une seule plume de confluence (Figure 3-1).

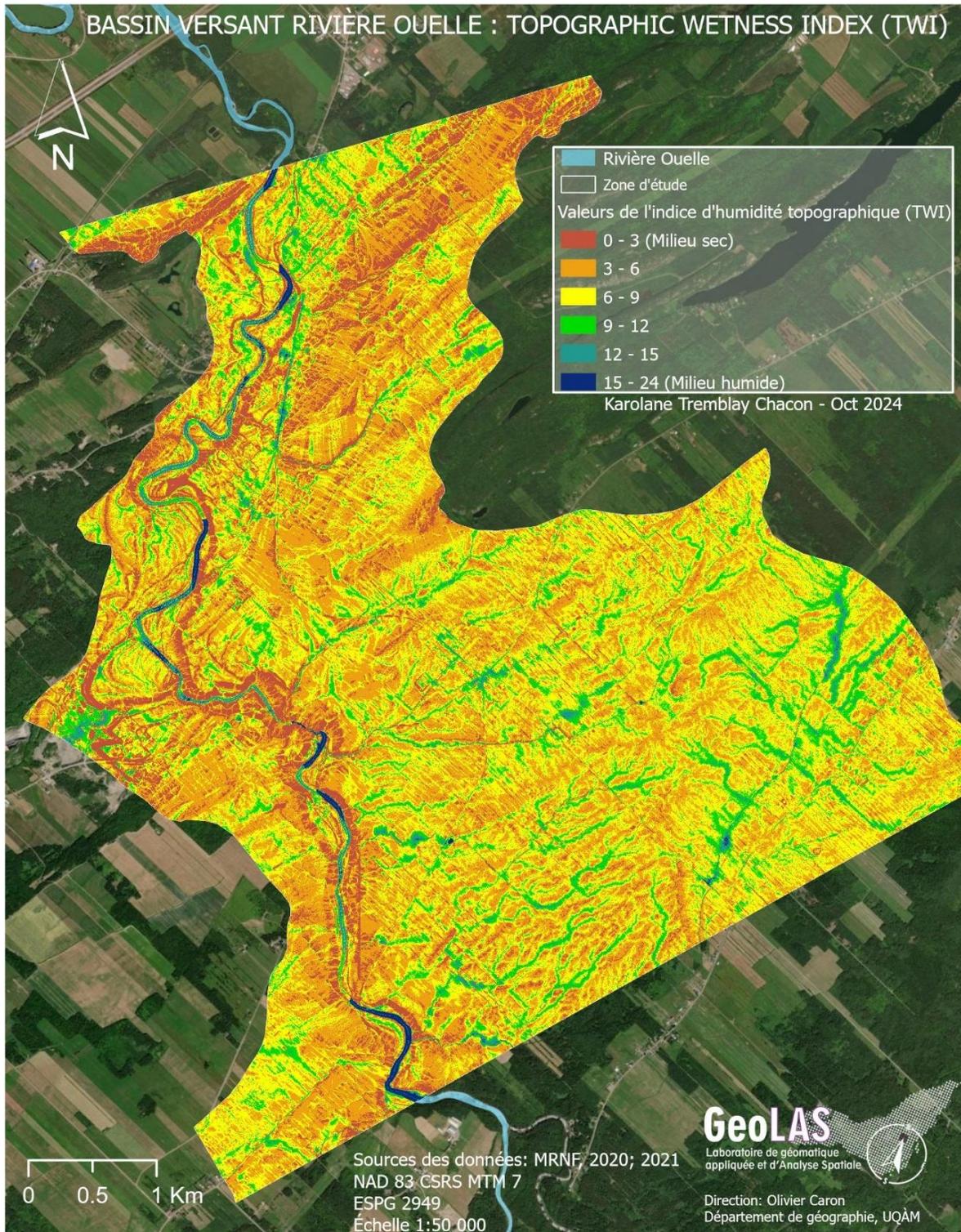
Figure 3-1 Exemple des anneaux de distance de la plume de confluence, où la rivière est représentée par un polygone bleu pâle. Chaque anneau marque une distance par tranches de 10 m, allant jusqu'à 90 m. Le bleu foncé, qui représente une distance de 10 m, indique les zones les plus influentes de la plume de confluence, tandis que l'influence de la plume sur le cours d'eau principal diminue progressivement à mesure que l'on s'éloigne, jusqu'à atteindre 90 m, où la couleur rouge marque la zone la moins influente. Cette représentation permet de comprendre que l'eau injectée par le tributaire perd son effet au fur et à mesure de son éloignement du point de confluence.



3.1.1.2 Topographic Wetness Index (TWI)

Dans la zone d'étude, peu de sites présentent des valeurs comprises entre 15 et 24, ce qui pourrait indiquer la présence de milieux humides. La majorité de ces zones se concentrent directement sur le long du cours d'eau, ce qui est attendu (Figure 3-2). Considérant que les milieux humides peuvent avoir un effet de refroidissement ou de réchauffement, il est intéressant de noter qu'en comparaison avec les cartes du facteur forestier, les zones de haut potentiel d'accumulation d'eau (en bleu foncé) sont étroitement associées à des zones protégées par une canopée. Cela signifie que la plupart des sites identifiés comme des milieux humides sont également couverts par des arbres (Winter et al., 1998; O'Sullivan et al., 2019b). Il est observé que le deuxième site, où l'on trouve le plus grand potentiel d'accumulation d'eau, se situe vers l'aval du cours d'eau et de la zone d'étude. Cela explique que ces sites correspondent également en partie aux résultats des ZRf identifiées. En revanche, la zone en amont présente beaucoup moins de potentiel d'accumulation d'eau, ce qui explique pourquoi les résultats de l'AMCp y correspondent davantage à un potentiel de réchauffement. Enfin, à l'est de la zone d'étude, on observe un potentiel d'accumulation d'eau modéré, ce qui pourrait être intéressant. Cependant, ce secteur est majoritairement composé de dépôts glaciaires, qui pourraient limiter l'infiltration de l'eau, malgré la présence d'une couverture forestière plus importante. Cela suggère une déconnexion hydrologique, où l'absence de lien entre les sources de la rivière et les milieux humides pourrait exacerber l'élévation de température (Devito et al., 1999; O'Sullivan, et al., 2019b).

Figure 3-2 La carte a été réalisée à partir de l'indice d'humidité topographique / *Topographic Wetness Index* (TWI), une donnée disponible sur le site Forêt ouverte. Les valeurs inférieures à 15 représentent des milieux secs avec peu de potentiel d'accumulation d'eau, tandis que les milieux humides, identifiés par des valeurs égales ou supérieures à 15, indiquent un potentiel plus élevé d'accumulation d'eau (MRNF, 2020; 2021).

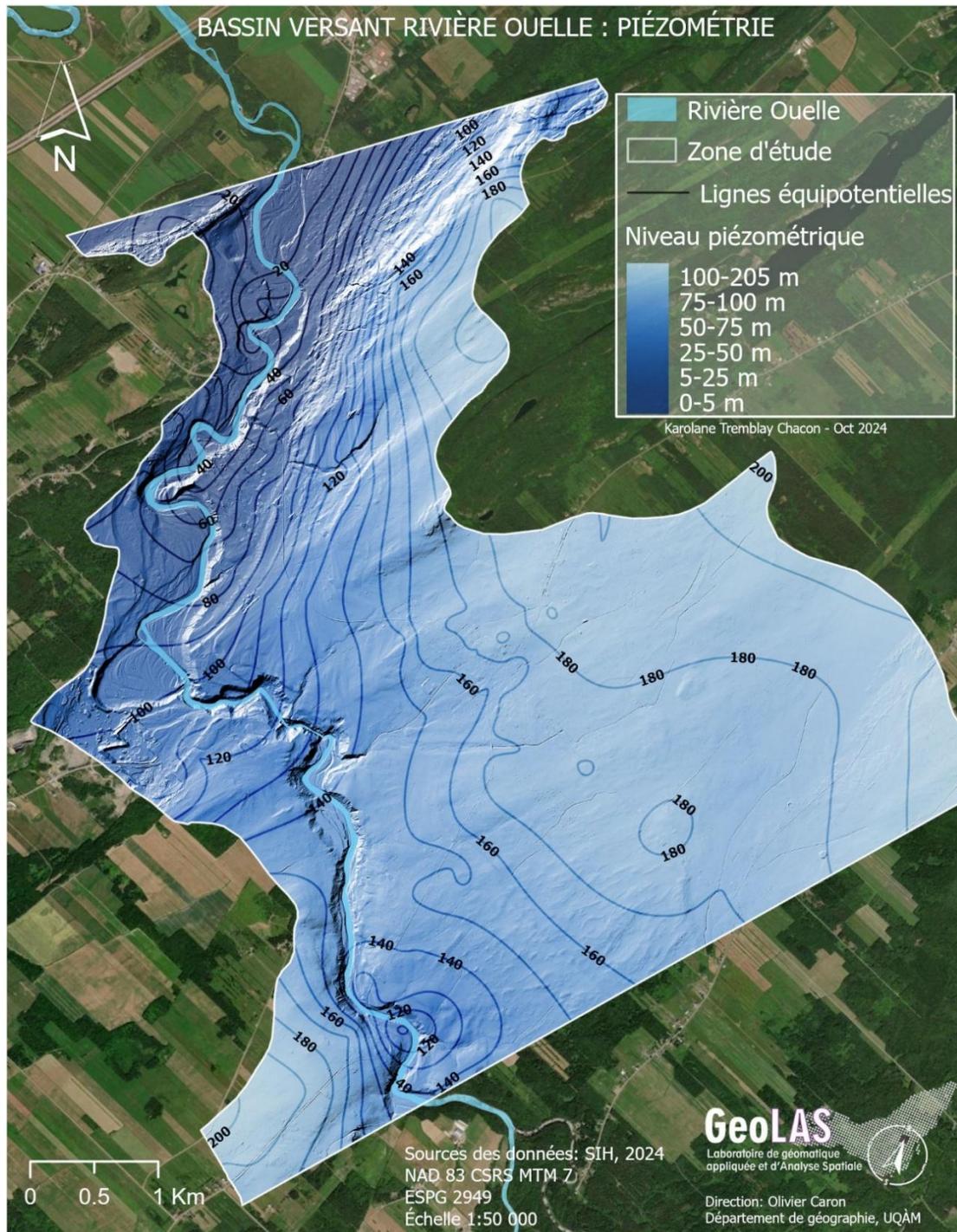


3.1.2 Hydrogéologique

3.1.2.1 Résurgences d'eau souterraine : carte piézométrique

Sur la Figure 3-3, les lignes blanches représentent des lignes équipotentiels, ou gradients hydrauliques, comme décrit par Buffin-Bélanger et al. (2015). Elles aident à identifier les zones de résurgence des eaux souterraines, principalement localisées au niveau des bris de pente. Ces zones, tout comme les courbes de niveau, indiquent également les variations du gradient d'élévation. En aval de la zone d'étude, les bris de pente se trouvent beaucoup plus rapprochés, tandis qu'en amont, ils sont moins fréquents et accompagnés d'une plus grande distance entre les lignes équipotentiels. Les niveaux piézométriques suivent une logique décroissante, similaire à celle des élévations d'un Modèle Numérique de Surface (MNS), en raison de l'interpolation des valeurs provenant des forages pour les niveaux piézométriques et des courbes de niveau pour les MNS. Cette logique met en évidence que les sites les plus bas favorisent l'accumulation d'eau et les résurgences, sous réserve que les types de dépôts locaux soient favorables. En conclusion, on peut interpréter que plus on se rapproche du secteur aval, plus le potentiel de résurgence augmente. À l'inverse, en altitude, ce potentiel diminue, reflétant une relation directe entre l'altitude, la proximité des bris de pente, et le comportement des eaux souterraines.

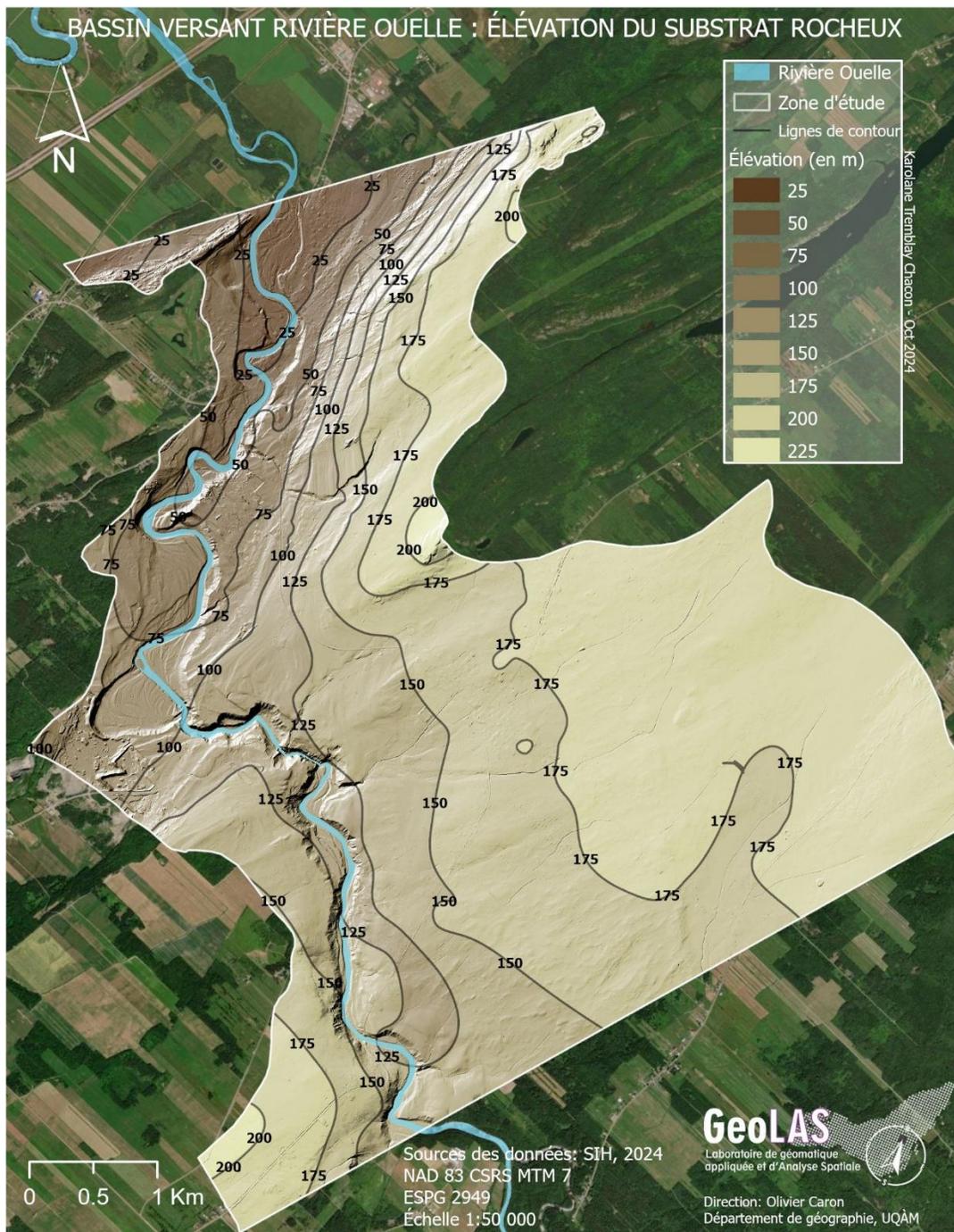
Figure 3-3 La carte piézométrique a été réalisée à partir d’une interpolation des niveaux d’eau enregistrés dans les forages de la base de données du Système d’Information hydrogéologique (SIH) répartis sur la zone d’étude (2024). Cette carte est inspirée des travaux effectués dans le cadre du projet d’acquisition de connaissances des eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) (Buffin-Bélanger, et al., 2015). Les lignes blanches représentent des lignes équipotentielles, tandis qu’un gradient de bleu illustre le gradient des niveaux piézométriques. La zone d’étude est délimitée par un polygone blanc, et le cours d’eau est représenté par un polygone bleu pâle.



3.1.2.2 Résurgences d'eau souterraine : carte de la topographie du substrat rocheux

Comme la carte piézométrique, la carte du substrat rocheux représente des variations d'altitude sous forme de lignes de contour, permettant de visualiser la structure du relief souterrain et les gradients hydrauliques associés. La gradation des couleurs met en évidence le relief du substrat rocheux : les teintes pâles indiquent les altitudes élevées, tandis que les teintes foncées signalent les zones les plus basses. Cette représentation facilite l'identification des variations topographiques et de leur influence sur les écoulements souterrains. La similitude entre les cartes de l'élévation du substrat rocheux et piézométrique permet d'inférer que le flux des eaux souterraines s'oriente vers la section aval du cours d'eau. Ces cartes contribuent ainsi à identifier les sites propices aux résurgences, particulièrement là où la dénivellation du substrat rocheux vers des secteurs plus bas et les gradients hydrauliques se rejoignent pour favoriser l'accumulation et la remontée des eaux. En superposant les cartes de l'élévation du substrat rocheux et de la piézométrie, on observe que les flux d'eau souterraine suivent la pente naturelle du relief souterrain, s'orientant préférentiellement vers la section aval du cours d'eau. Les secteurs où la dénivellation du substrat rocheux est marquée, combinés à des gradients hydrauliques favorables (bris de pente), correspondent aux zones où les eaux souterraines ont le plus de chances de ressurgir. Ainsi, ces cartes constituent un outil essentiel pour localiser les zones propices aux résurgences souterraines. En particulier, les endroits où la pente du substrat rocheux s'accroît vers des altitudes plus basses et où les gradients hydrauliques convergent peuvent être identifiés comme des secteurs favorisant l'accumulation et la remontée des eaux.

Figure 3-4 La carte de l'élévation du substrat rocheux a été réalisée à partir d'une interpolation des niveaux d'eau enregistrés dans les forages de la base de données du Système d'Information hydrogéologique (SIH) répartis sur la zone d'étude (2024). Cette carte est inspirée des travaux effectués dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances des eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) (Buffin-Bélangier, et al., 2015). Les courbes de niveau représentent le gradient topographique, illustrant les variations d'altitude du substrat rocheux. Les couleurs, allant des teintes plus pâles aux teintes plus foncées, permettent de visualiser la transition des zones les plus élevées vers les zones les plus basses.

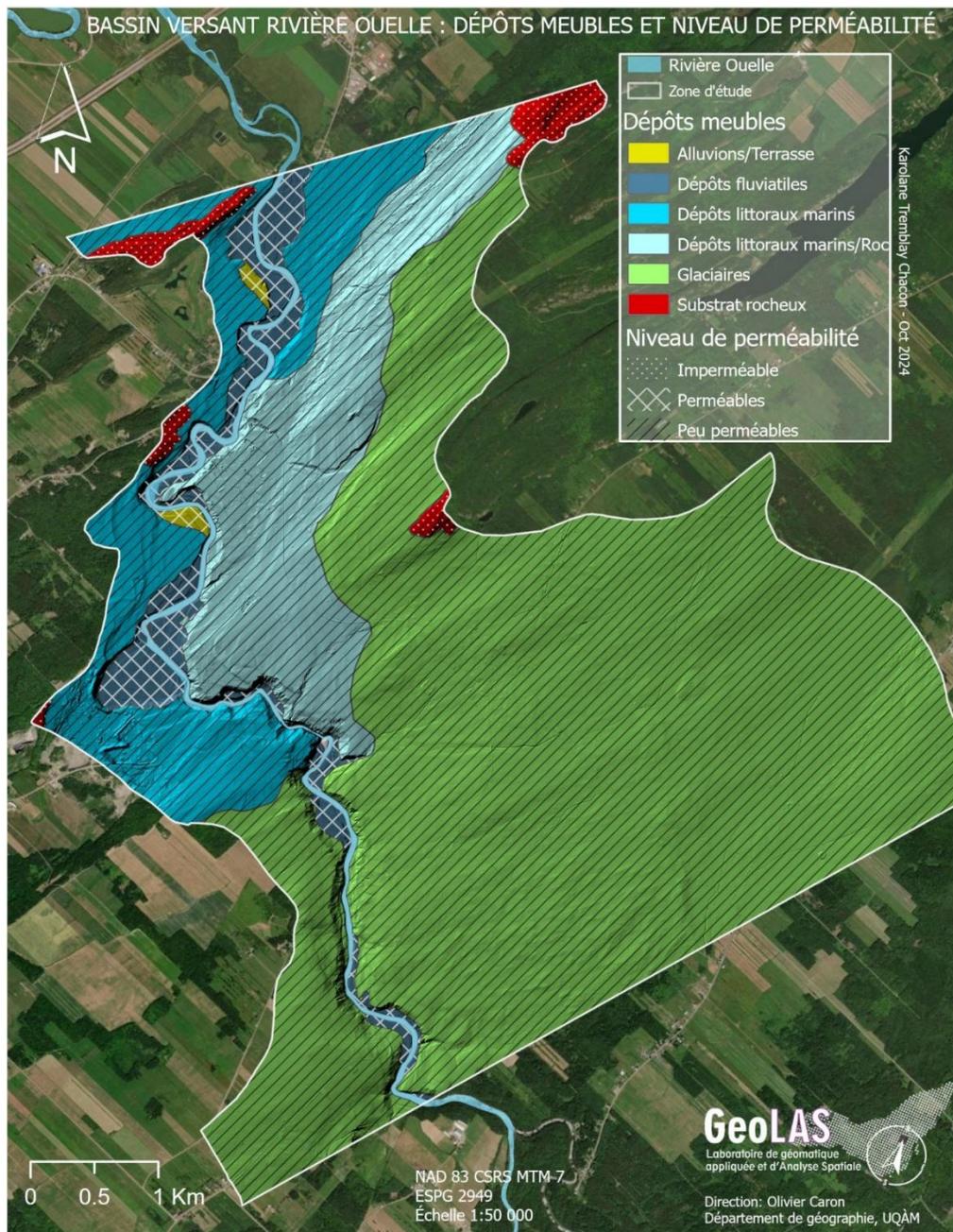


3.1.3 Géologie du Quaternaire

3.1.3.1 Hydrofaciès: classification des dépôts meubles

Comme décrit dans le Chapitre 1, la composition des dépôts de surface de la zone d'étude est majoritairement constituée de dépôts glaciaires et postglaciaires. Cependant, ces derniers se trouvent principalement en dehors du cours d'eau. Ces dépôts, souvent composés de matériaux plus fins et compacts, limitent l'infiltration de l'eau de précipitation, contrairement aux dépôts fluviaux, alluviaux et terrasses qui possèdent une perméabilité plus élevée et favorisent ainsi les résurgences souterraines. Ces dépôts se situent précisément dans les zones où les niveaux piézométriques et la topographie du substrat rocheux indiquent un potentiel plus élevé de résurgence, identifié par les bris de pentes des lignes équipotentiels et le sens de l'écoulement des eaux souterraines vers les sites les plus bas (Winter, et al., 1998). Ceci nous indique alors que le potentiel de résurgence des eaux souterraines est toujours plus élevé en aval de la zone d'étude qu'en amont, en raison de la topographie, des types de dépôts et des gradients hydrauliques identifiés. Bien que l'ensemble du cours d'eau soit encadré par des dépôts fluviaux, leur concentration est nettement plus marquée en aval, où les conditions topographiques et hydrauliques accentuent leur rôle dans les processus de résurgence. On en trouve également en plus faible quantité en amont, bien que leur influence y soit plus limitée.

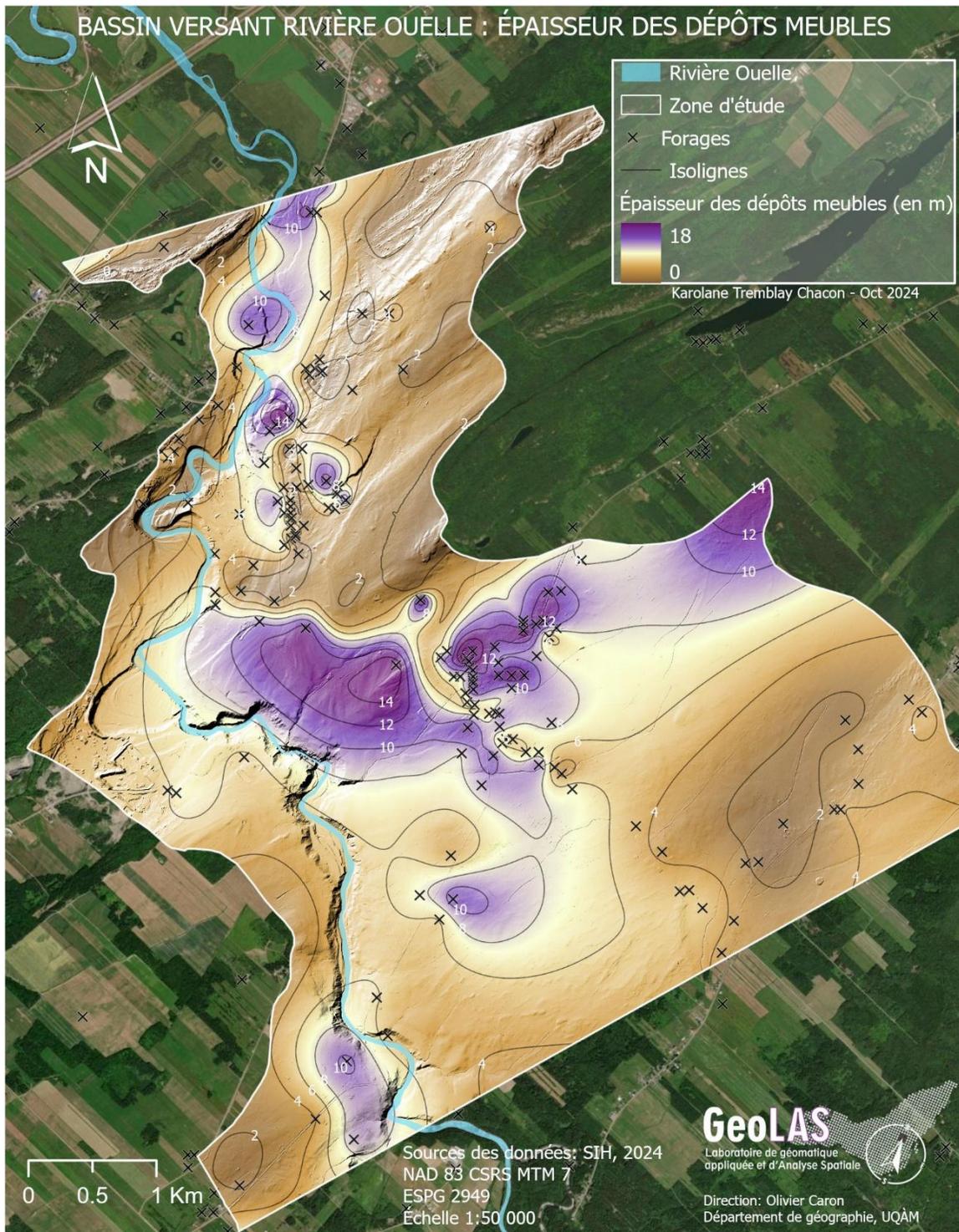
Figure 3-5 La carte des dépôts meubles et les hydrofaciès est le résultat de notre réinterprétation des dépôts meubles dans la zone d'étude, inspiré des travaux effectués dans le cadre du projet d'acquisition de connaissances des eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL) (Buffin-Bélanger, et al., 2015). La section aval du cours d'eau se distingue par des dépôts perméables, notamment à proximité du cours d'eau (en bleu foncé pour les dépôts fluviatiles), ainsi que par des alluvions et terrasses (en jaune), qui favorisent la résurgence des eaux souterraines. L'ensemble du cours d'eau est encadré par des dépôts fluviatiles, bien que ces derniers soient plus prédominants dans la section aval.



3.1.3.2 Carte isopaque : épaisseur des dépôts meubles

La carte isopaque illustre la distribution de l'épaisseur des dépôts de surface (Figure 3-6). On constate que la majorité des secteurs de la zone d'étude présentent une faible épaisseur. Certaines zones, caractérisées par des dépôts perméables favorisant les résurgences d'eau souterraine et présentant un fort potentiel d'accumulation d'eau, comme l'indiquent les cartes piézométriques et topographiques du substrat rocheux, sont également caractérisées par des dépôts épais. Cela est important, car plus les dépôts sont profonds, plus les eaux de ruissellement peuvent s'infiltrer profondément, et plus elles sont protégées du réchauffement, augmentant ainsi leur potentiel à fournir des eaux froides dans le cours d'eau. Cette épaisseur accrue des dépôts joue un rôle crucial dans la régulation thermique des eaux souterraines. En s'infiltrant plus profondément, l'eau est moins exposée aux variations de température atmosphérique, ce qui lui permet de conserver une température plus stable et plus froide avant de ressurgir dans le cours d'eau. Ces observations concordent avec la répartition des refuges thermiques, qui sont plus nombreux en aval de la zone d'étude. Ces refuges sont principalement alimentés par des eaux souterraines émergentes sous forme de suintements latéraux, renforçant ainsi la stabilité thermique du cours d'eau (Winter et al., 1998; Briggs et al., 2018).

Figure 3-6 Carte isopaque illustrant l'épaisseur des dépôts de surface. La majorité des secteurs présente des dépôts peu épais (en brun), tandis que certaines zones, caractérisées par des dépôts plus épais (en mauve), favorisent les résurgences d'eau souterraine et possèdent un fort potentiel d'accumulation. L'épaisseur des dépôts protège l'eau souterraine du réchauffement, augmentant ainsi le potentiel d'eaux froides dans le cours d'eau, en particulier dans la portion aval de la zone d'étude, où les refuges thermiques alimentés par les eaux souterraines sont plus fréquents.



3.1.4 Géomorphologique

3.1.4.1 Gradient de pente du cours d'eau

La zone d'étude, située dans le secteur aval du cours d'eau, est caractérisée par une pente faible (Figure 3-7) (Furois, 2016). Nous avons identifié 19 segments de pente, chacun présentant des valeurs variées. À l'échelle de notre étude, bien que les différences de pente soient minimales, elles revêtent une importance pour notre analyse. Selon le classement du Gouvernement du Canada (2013) (Tableau 3.2), six catégories de pentes existent. La classe A, qui couvre des pentes entre 0 et 3 %, caractérise la zone d'étude, où les pentes varient entre 0 et 2,34 %. Bien que tous les segments appartiennent à la catégorie A, soit une pente faible, 13 sur 19 segments présentent une pente supérieure à 1 %, et la pente moyenne dans cette zone est de 1,145 % (Figure 3-8). En vue de caractériser le tronçon du cours d'eau à l'étude, nous avons créé trois sous-classes afin de classer les valeurs de gradient de pente dans la zone d'étude (0 à 2,34 %) : faible (0 à 0,75 %), moyen (0,75 à 1,5 %) et élevé (1,5 à 2,34 %). Cette classification permet d'observer plus finement les variations de pente à une petite échelle. Ces variations de pente, bien que modestes à l'échelle du bassin versant, peuvent influencer localement l'hydrodynamique du cours d'eau. Par exemple, les segments légèrement plus inclinés peuvent accélérer le débit, modifiant ainsi les interactions entre l'eau et les dépôts meubles, notamment en ce qui concerne l'érosion et les résurgences potentielles. Les segments les plus élevés de la zone d'étude se situent légèrement au-dessus de la moyenne, mais ces pentes restent faibles. Néanmoins, elles peuvent induire des dénivelés significatifs à une petite échelle pour cette étude, mais ces différences demeurent toutefois minimales à l'échelle du bassin.

Tableau 3.2 Classes d'inclinaisons de la pente en six (6) catégories en pourcentages (Gouvernement du Canada, 2013)

Catégories		
Code	Catégorie	Description
A	Rien ou presque rien	Rien ou presque rien (0 - 3 %).
B	Faibles	Pentes faibles (4 - 9 %).
C	Modérées	Pentes modérées (10 - 15 %).
D	Raides	Pentes raides (16 - 30 %).
E	Très raides	Pentes très raides (31 - 60 %).
F	Extrêmement raides	Pentes extrêmement fortes (> 60 %).

Figure 3-7 Carte de gradient de pente : sur cette carte, trois sous-catégories de gradients de pente en pourcentage sont observées. Bien que toutes ces catégories correspondent à des pentes très faibles, un seul segment présente le taux le plus élevé de gradient, situé entre 1,5 et 2,4 %. La section aval du cours d'eau se caractérise par les gradients de pente les plus faibles, tandis qu'en amont, les gradients sont légèrement plus élevés. Un changement notable est observé dans les catégories de pente, passant de plus bas à plus élevé, puis revenant à des pentes plus faibles. Il est toutefois évident qu'il existe une baisse générale des gradients de pente.

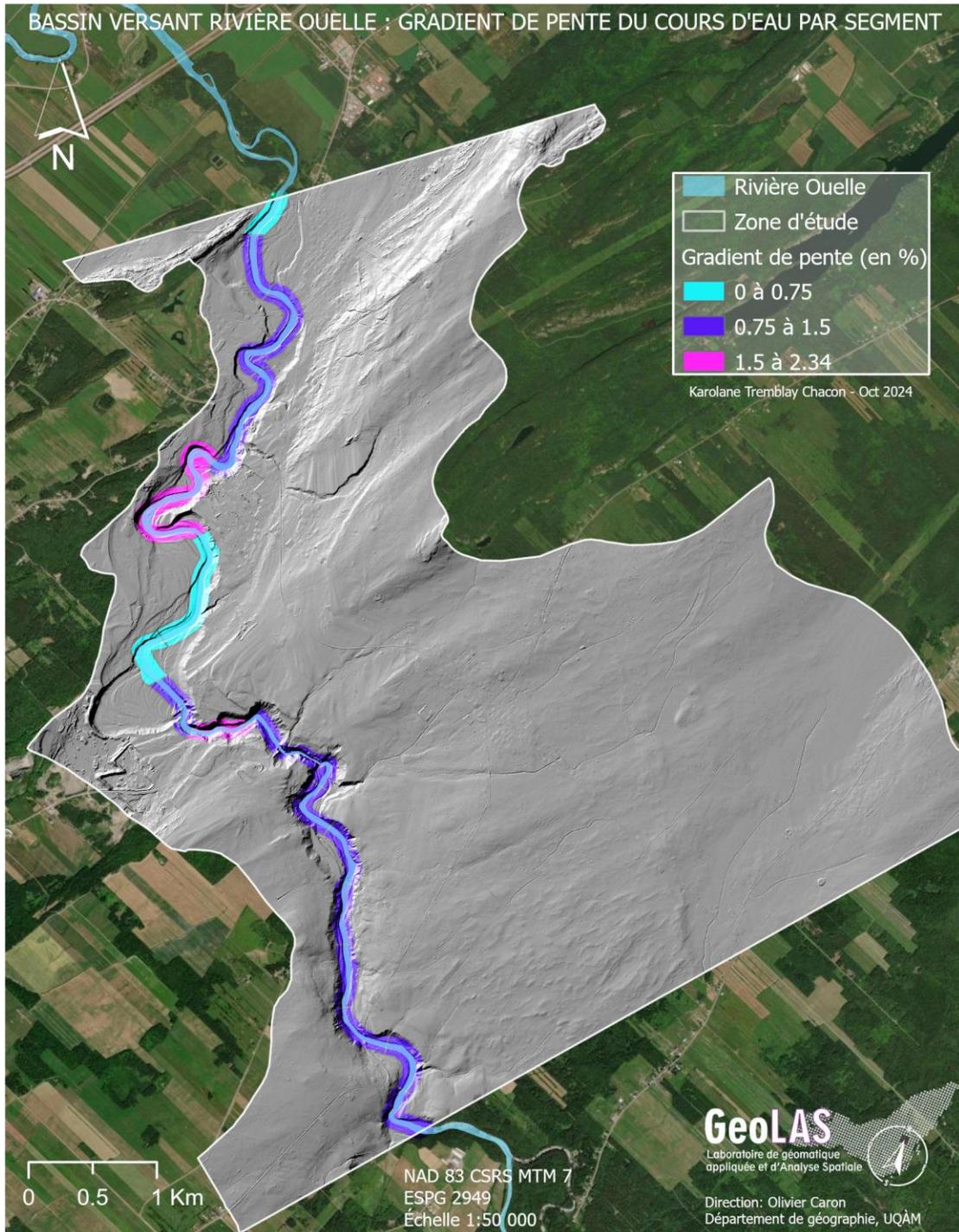
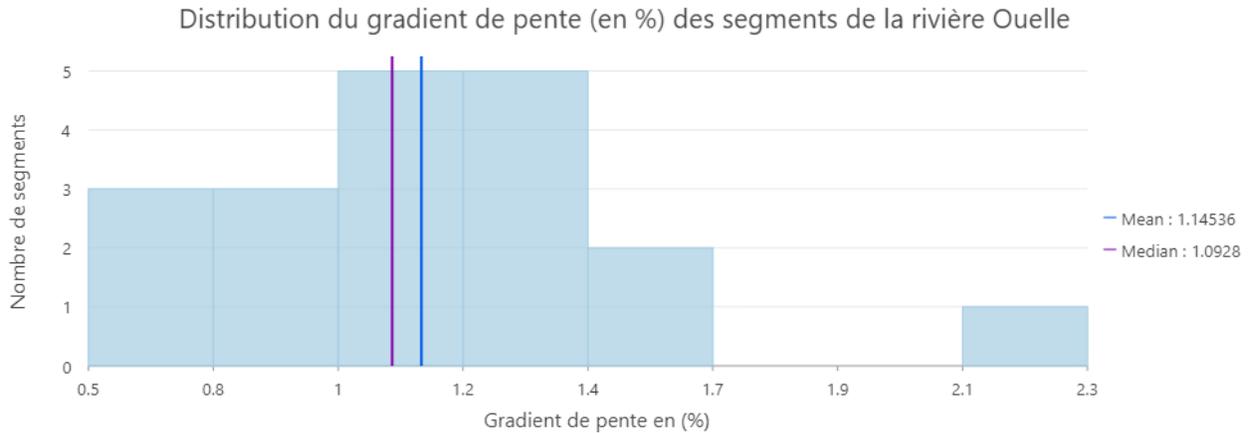


Figure 3-8 Distribution du gradient de pente (en %) des segments de la rivière Ouelle. Cet histogramme illustre la répartition des segments en fonction de leur gradient de pente. La majorité des segments présentent une pente supérieure à la moyenne (1,14 %), tandis que la médiane est légèrement inférieure (1,02 %). Il est également à noter qu'un seul segment affiche le gradient de pente le plus élevé, identifié dans la zone d'étude.

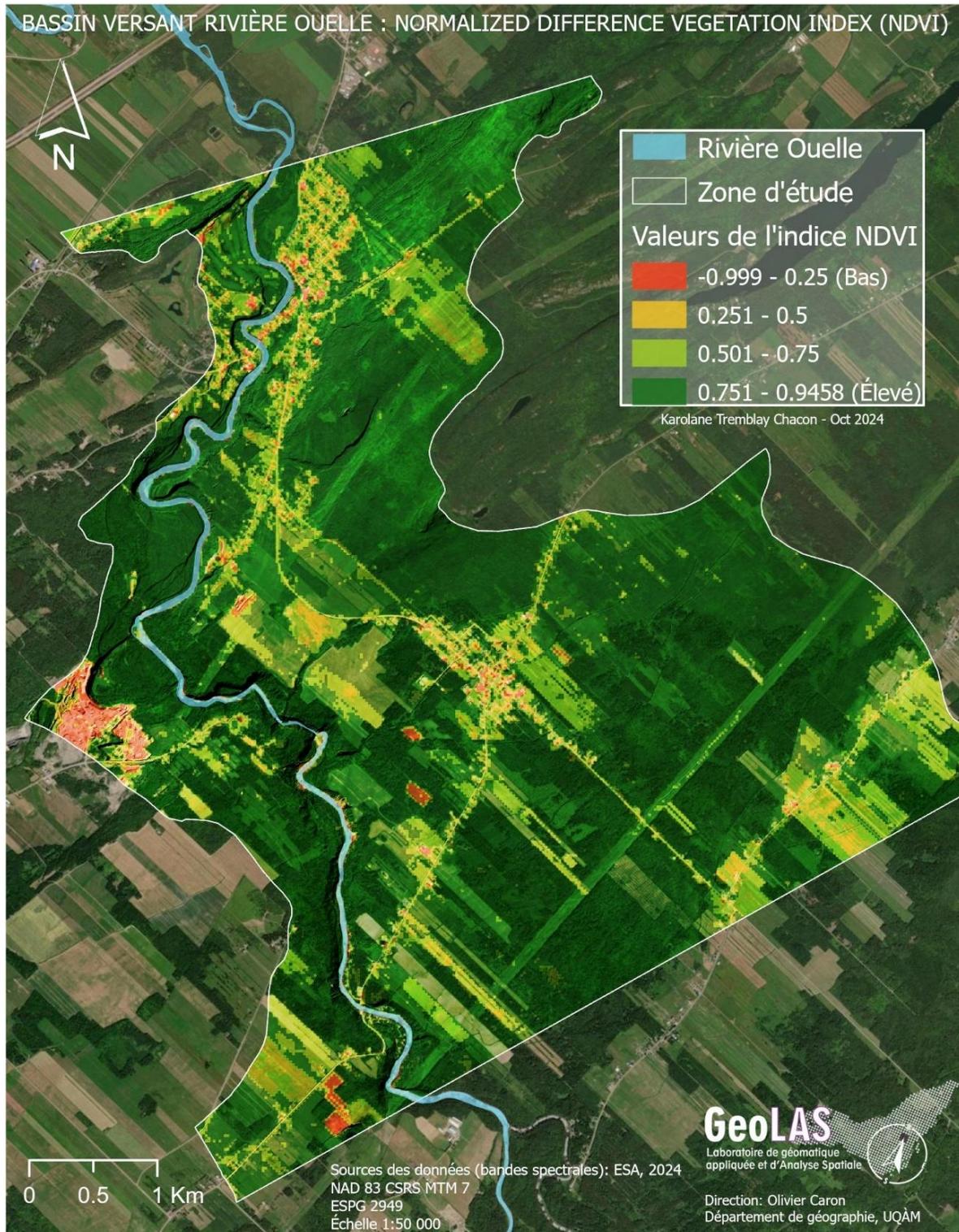


3.1.5 Forestier

3.1.5.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Pour l'ensemble de la zone d'étude, on observe un indice NDVI élevé, qui se situe en moyenne entre 0,7 et 0,9 (Figure 3-9). Certaines surfaces, telles que les champs agricoles, les sablières et les routes, présentent des valeurs de NDVI faibles en raison de l'absence de végétation dense et donc de réflectance chlorophyllienne. Ces zones, marquées par une faible couverture forestière, contribuent à des ruptures dans la continuité de la canopée. L'indice NDVI nous offre un aperçu, sous réserve, du potentiel de la « santé de la couverture forestière » dans la section aval du bassin versant. À première vue, cette zone semble en bonne santé, malgré le fait qu'il s'agisse du secteur le plus anthropisé du bassin versant. De plus, ces images ont été prises en juillet 2024, et avec des étés très chauds et peu de précipitations, on aurait pu s'attendre à observer un indice NDVI plus bas. Cependant, ces résultats doivent être mis en relation avec ceux de l'indice FCD afin d'obtenir une vision plus complète et précise de l'état actuel de la canopée dans le secteur aval du bassin versant.

Figure 3-9 L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) montre que l'ensemble du bassin versant affiche des valeurs supérieures à 0,7, indiquant une végétation saine, représentée en vert, soit une forte réflectance de chlorophylle. Cependant, quelques secteurs, notamment les champs agricoles et les routes, ne présentent une faible réflectance de chlorophylle, et sont marqués en brun (ESA, 2024).

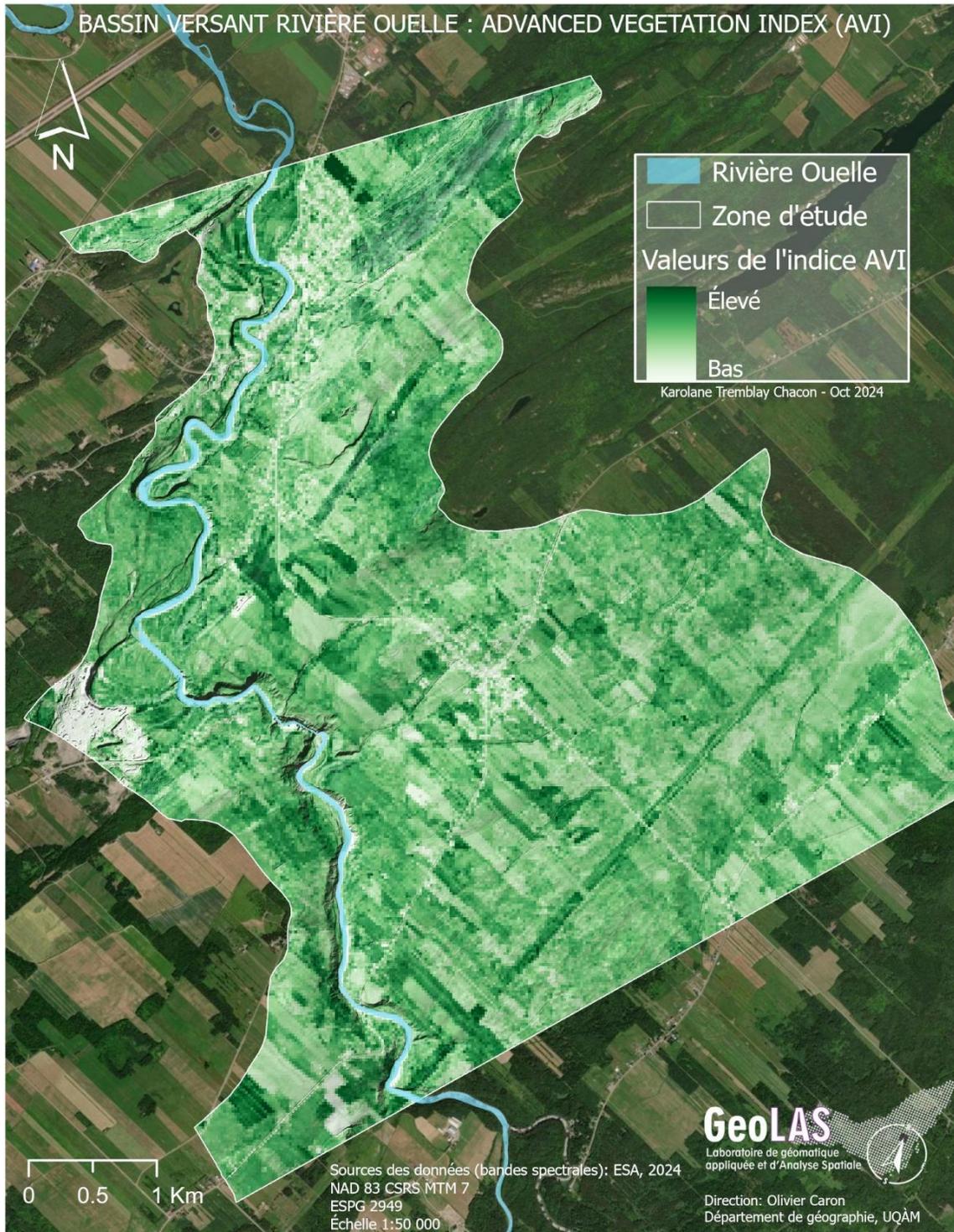


3.1.5.2 Forest Canopy Density (FCD)

3.1.5.2.1 Advanced Vegetation Index (AVI)

L'AVI se distingue du NDVI en prenant en compte la densité de la couverture forestière, ce qui lui permet d'évaluer plus précisément la qualité de la végétation et de détecter les variations fines du couvert végétal (Namasivayam et al., 2024; Nandy et al., 2003). Dans la zone d'étude, la comparaison des résultats des deux indices révèle des écarts significatifs. Alors que le NDVI indique une bonne santé globale de la végétation, l'AVI met en évidence une densité et une vitalité plus modérées du couvert forestier. Cette différence s'explique par la capacité du NDVI à détecter la photosynthèse, même dans des couverts peu denses, tandis que l'AVI est plus sensible à la structure et à la continuité de la canopée. Basés sur des images satellitaires de juillet 2024, ces résultats montrent que le NDVI peut parfois surestimer la vitalité de la couverture forestière, notamment lors des périodes estivales où l'activité photosynthétique est élevée, même dans des forêts clairsemées ou en stress hydrique. Malgré ces différences, les deux indices s'accordent pour identifier les zones sans végétation, telles que les champs agricoles, les routes et les zones dégagées. Cependant, lorsqu'il s'agit d'évaluer la variabilité de la densité au sein des forêts, l'AVI fournit une analyse plus détaillée, mettant en évidence des contrastes que le NDVI ne perçoit pas toujours (Figure 3-10).

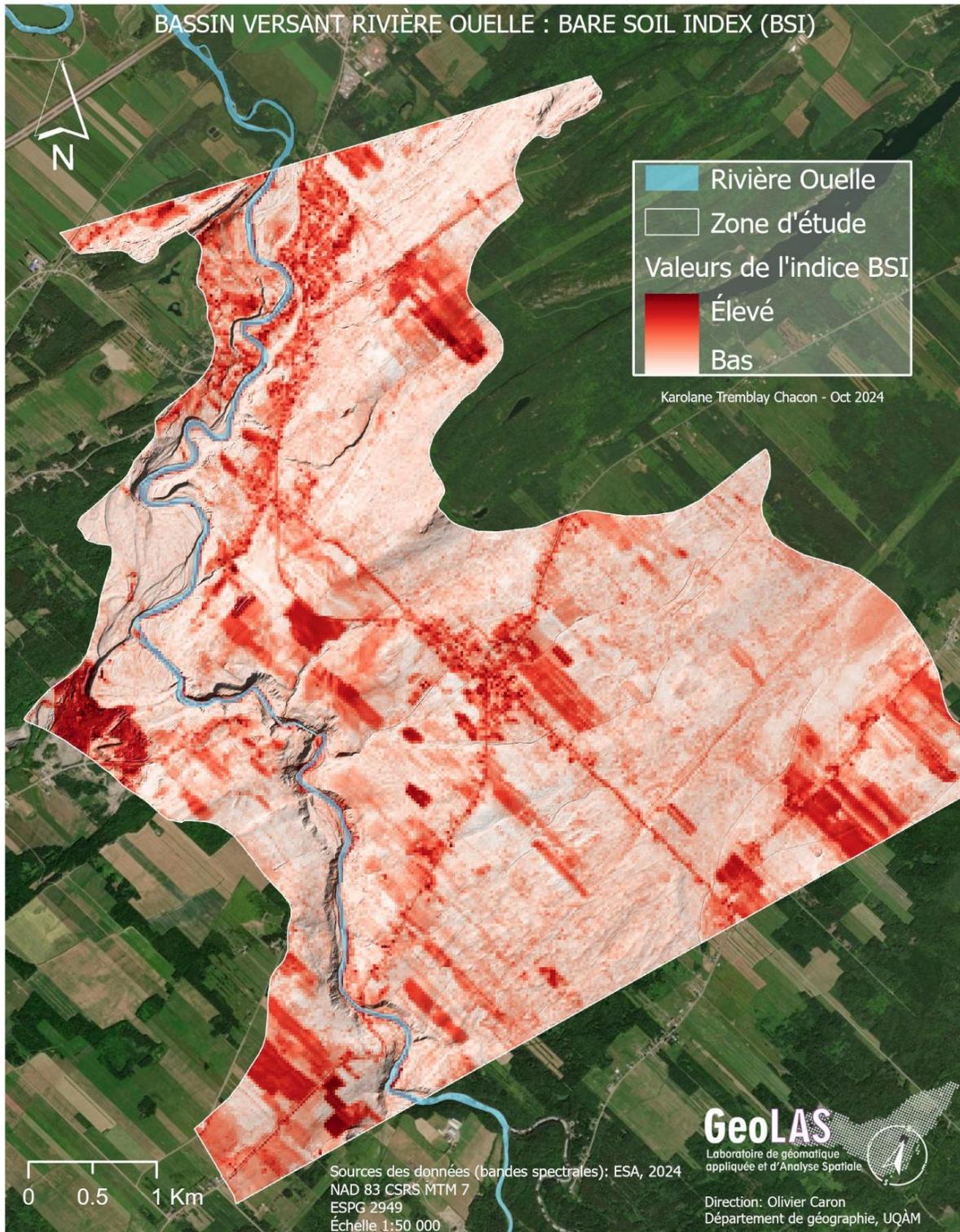
Figure 3-10 Carte de l'indice AVI (*Advanced Vegetation Index*) illustrant la santé et la densité de la couverture forestière dans la zone d'étude du bassin versant de la rivière Ouelle. La majorité des valeurs affichent des teintes vert pâle à blanc, indiquant des niveaux de densité moyens à faibles. Ces résultats suggèrent que la couverture forestière est globalement moins dense et en moins bonne santé que ce que laisse entendre l'indice NDVI, soulignant l'importance de croiser ces indices pour une évaluation plus précise de l'état de la végétation.



3.1.5.2.2 Bare Soil Index (BSI)

Les résultats de l'indice BSI (Figure 3-11) présentent une tendance inverse à celle de l'AVI, bien que les deux indices soient complémentaires. Tandis que l'AVI met en évidence la densité et la santé du couvert forestier, le BSI détecte les surfaces de sol nu, permettant ainsi d'identifier les zones dépourvues de végétation. La majeure partie du bassin versant est caractérisée par une couverture forestière de densité moyenne, tandis que certaines zones spécifiques apparaissent comme découvertes. Ces dernières correspondent principalement aux champs agricoles, sablières et zones urbanisées, où la végétation est absente ou clairsemée. Les zones découvertes proches du cours d'eau se concentrent principalement en aval de la zone d'étude, où l'urbanisation est plus marquée. Cette tendance reflète la présence accrue d'infrastructures, de sols imperméabilisés et de surfaces minérales, qui augmentent les valeurs du BSI en réduisant la couverture végétale.

Figure 3-11 La carte de l'indice *Bare Soil Index* (BSI) met en évidence les zones les plus découvertes, dépourvues de canopée (ESA, 2024). Elle révèle notamment des sites tels que les champs agricoles et les sablières, particulièrement en aval du cours d'eau de la zone d'étude, représentés en rouge foncé. En revanche, la majorité de la zone d'étude est illustrée par des teintes allant du rose pâle au blanc, ce qui reflète une couverture forestière de moyenne à élevée densité.



3.1.5.2.3 Vegetation Density (VD)

L'indice de densité de végétation (VD) a été obtenu grâce à une Analyse en Composantes Principales (PCA) intégrant les indices AVI et BSI. Cet indice permet d'établir un lien entre la densité forestière et la minéralisation du sol, offrant ainsi une vision plus précise de la répartition de la végétation.

L'indice VD révèle une végétation présente, mais fragmentée, avec une répartition hétérogène dans la zone d'étude (Figure 3-12). Un exemple notable se situe dans la partie aval de la zone d'étude, dans le secteur le plus urbanisé. Ici, l'AVI indiquait une couverture forestière modérée, tandis que le BSI révélait une forte minéralisation du sol. En réalité, cette zone présente une végétation intermédiaire :

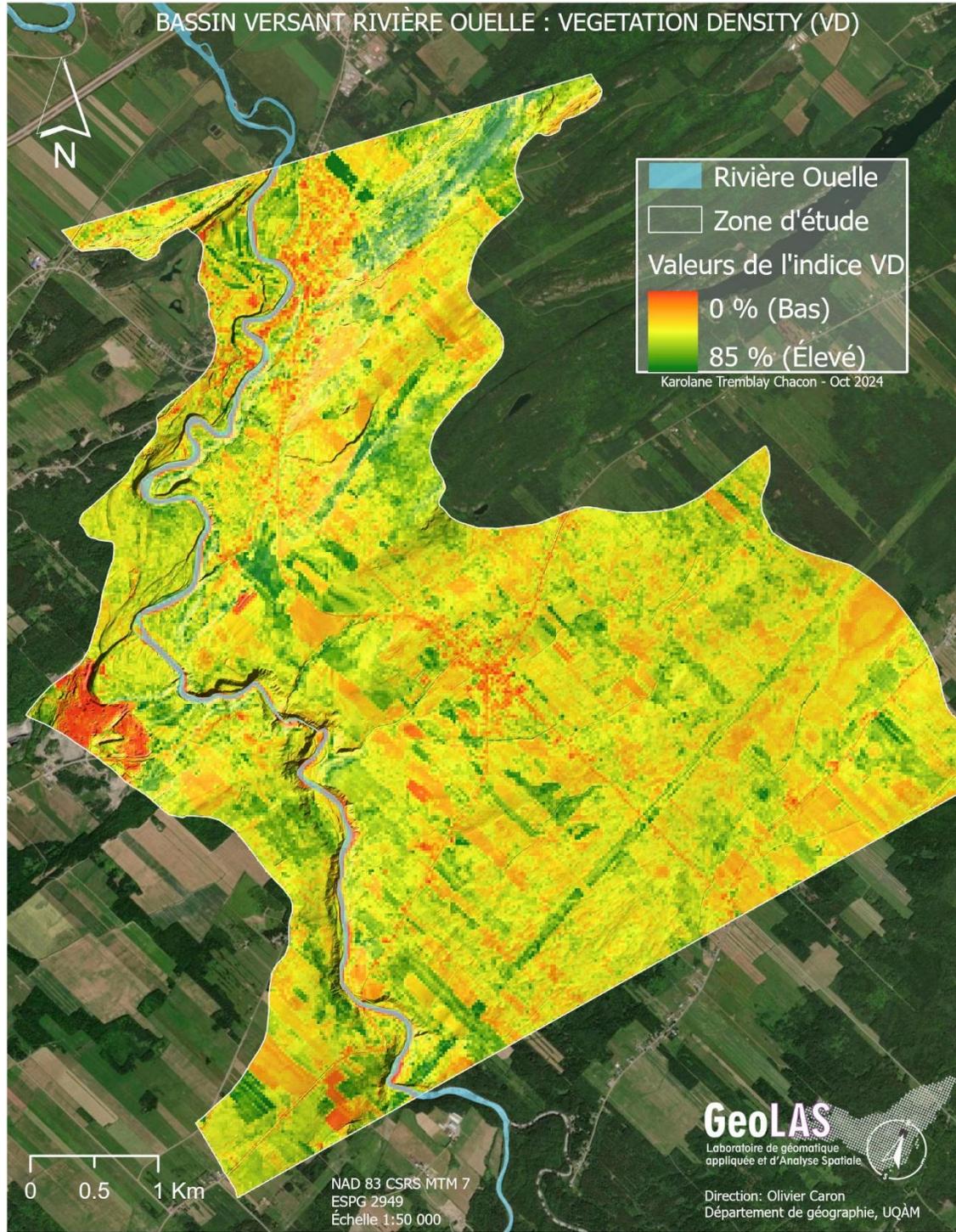
- Côté ouest de la rive : La végétation est légèrement plus dense.
- Côté est de la rive : La couverture est plus discontinue, sans être totalement dégagée.

D'autres zones illustrent cette dynamique :

- La sablière à l'ouest (identifiée par un large secteur rouge) présente une forte proportion de sol nu, confirmée par les valeurs élevées du BSI.
- À l'inverse, un secteur au nord-est affiche une couverture végétale plus homogène, avec une concordance entre les indices NDVI, AVI et BSI.

L'indice de densité de végétation (VD) permet ainsi de mieux caractériser la structure réelle du couvert forestier et d'affiner l'interprétation des résultats obtenus avec les indices NDVI et BSI.

Figure 3-12 Carte de densité de végétation : les zones de sol nu sont représentées en rouge, tandis que les zones de haute densité de végétation sont en vert. La végétation est répartie de manière inégale, avec des fragments visibles, notamment dans le secteur urbanisé de l'aval, où des zones modérément végétalisées alternent avec des zones plus dégagées. L'indice de densité de végétation (VD) permet de mieux comprendre cette distribution.



3.1.5.2.4 Scaled Shadow Index (SSI)

L'indice SSI (*Shadow Scaled Index*) (Figure 3-13) mesure l'intensité de l'ombre projetée par la végétation, permettant ainsi d'estimer à la fois la densité et la hauteur des arbres. Une valeur élevée de SSI indique une canopée plus dense et des arbres plus hauts, tandis qu'une valeur faible signale une couverture plus clairsemée ou absente.

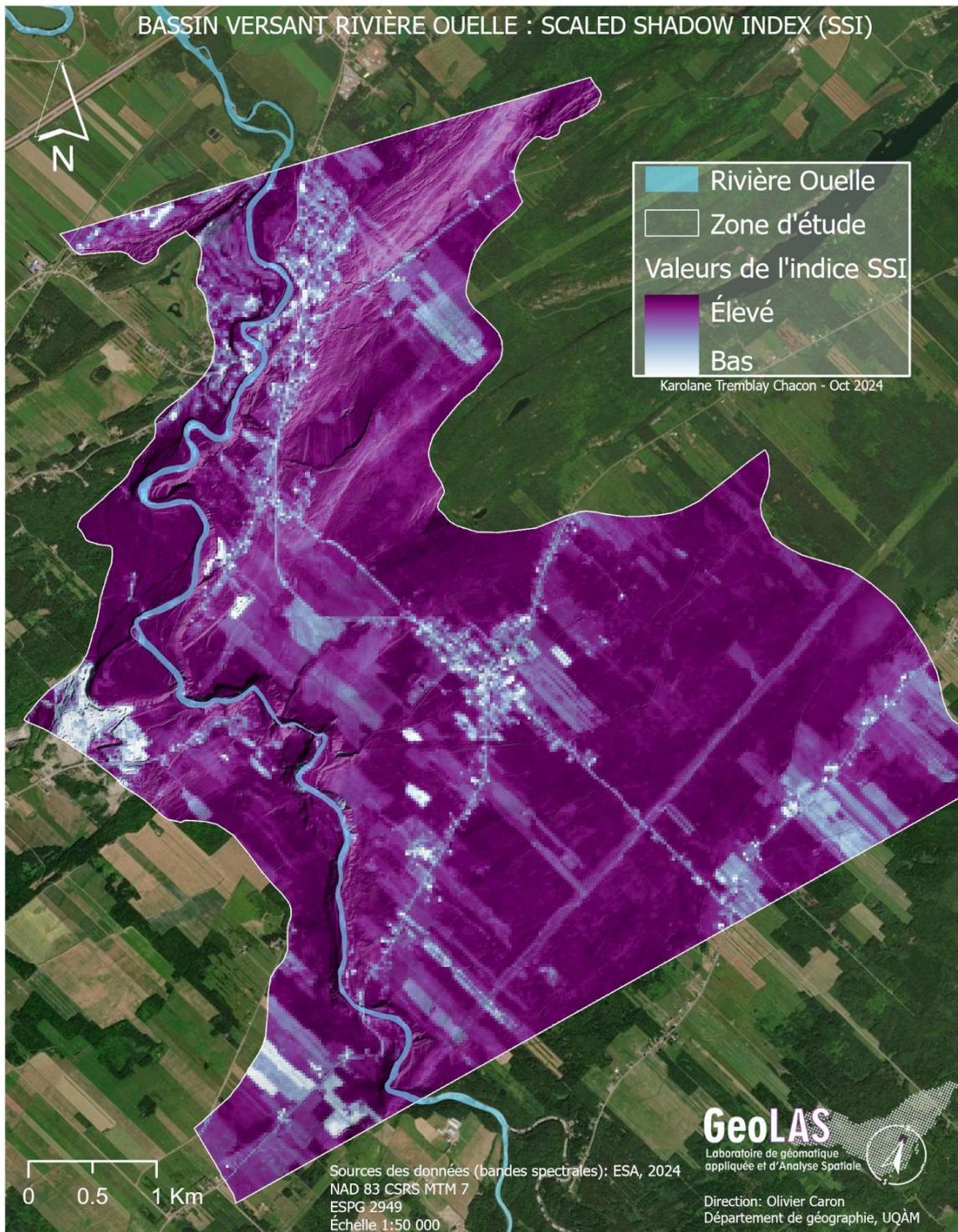
En accord avec les indices précédents, l'analyse de l'indice SSI confirme que certaines zones sont dépourvues de couverture forestière. Par exemple :

- Le secteur de la sablière, représenté en blanc, présente une absence totale d'ombre, indiquant l'inexistence d'une canopée.
- Les routes et surfaces imperméables affichent un ombrage intermédiaire, reflétant la présence sporadique d'arbres à proximité.

Les secteurs présentant une plus grande couverture forestière génèrent logiquement un ombrage plus important. Toutefois, à l'échelle de la zone d'étude, l'indice SSI montre une répartition majoritairement moyenne de l'ombre, indiquant que la forêt est présente, mais clairsemée, avec une densité inégale de la canopée.

Comparé au NDVI, qui suggérait un résultat élevé sur la réflectance de chlorophylle de la couverture végétale, l'analyse du SSI révèle une canopée plus clairsemée que ne le laissait entendre le NDVI. Cette divergence s'explique par le fait que le NDVI mesure uniquement l'activité photosynthétique, qui peut être élevée même dans des forêts fragmentées, tandis que le SSI fournit une indication plus fiable sur la structure et la continuité de la canopée.

Figure 3-13 Carte de l'indice SSI montrant le niveau d'ombrage produit par la végétation, notamment la canopée, permettant d'estimer la densité et la hauteur des arbres. Les zones en violet foncé indiquent une couverture forestière dense et élevée, générant un ombrage plus important, tandis que celles sans couverture, en blanc, n'ont pas d'ombrage. Globalement, l'ombrage dans la zone d'étude est moyen, ce qui suggère que la couverture forestière est moins dense que ce que d'autres indices, comme le NDVI, pourraient laisser penser.



3.1.5.2.5 Résultat de l'indice Forest Canopy Density (FCD)

L'indice FCD (Forest Canopy Density) (Figure 3-14) est obtenu par la combinaison du VD et du SSI. Il permet d'évaluer simultanément la densité, la hauteur et la répartition spatiale de la canopée, offrant ainsi une vision plus détaillée de la structure forestière et de son rôle dans la régulation thermique des milieux aquatiques. Les résultats du FCD montrent que la zone d'étude présente une canopée de densité moyenne, avec une couverture plus dense à proximité du cours d'eau principal, ce qui joue un rôle essentiel dans sa protection contre le réchauffement.

Si le cours d'eau principal bénéficie d'une protection forestière relativement efficace, les tributaires secondaires sont plus exposés aux rayons solaires, traversant des secteurs moins boisés. Cette faible couverture les rend plus vulnérables au réchauffement, ce qui pourrait affecter leur rôle dans la régulation thermique globale du bassin. L'indice FCD met en évidence une corrélation directe entre la densité de la canopée et la régulation thermique : les secteurs où la végétation est dense, haute et continue affichent des températures plus basses, un phénomène particulièrement marqué le long du cours d'eau principal. Cette relation s'explique par le rôle de l'ombrage forestier, qui limite l'absorption des rayons solaires et réduit l'évapotranspiration. Enfin, bien que la Figure 3-15 illustre l'interaction entre ces paramètres, la température n'a pas pu être intégrée directement en raison des contraintes liées aux types de données disponibles.

Figure 3-14 Carte de l'indice Forest Canopy Density (FCD) montrant la relation entre la densité, la distribution de la canopée et l'ombrage produit. Les secteurs les plus denses et continus sont en vert, tandis que les zones à découvert sont en mauve. La densité de canopée est généralement moyenne, plus élevée près du cours d'eau principal, mais les tributaires, moins protégés, sont exposés aux rayons solaires, suggérant une vulnérabilité au réchauffement.

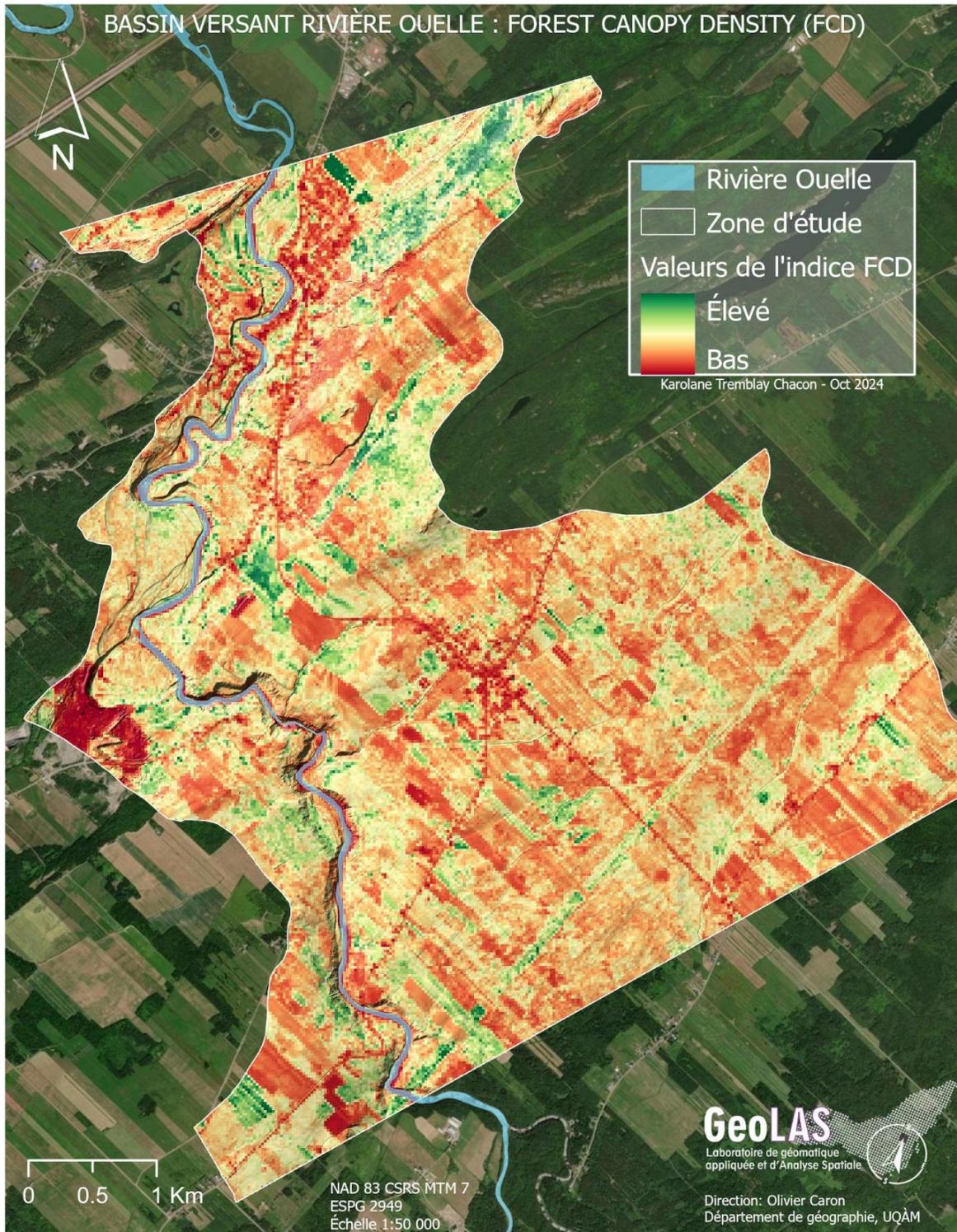
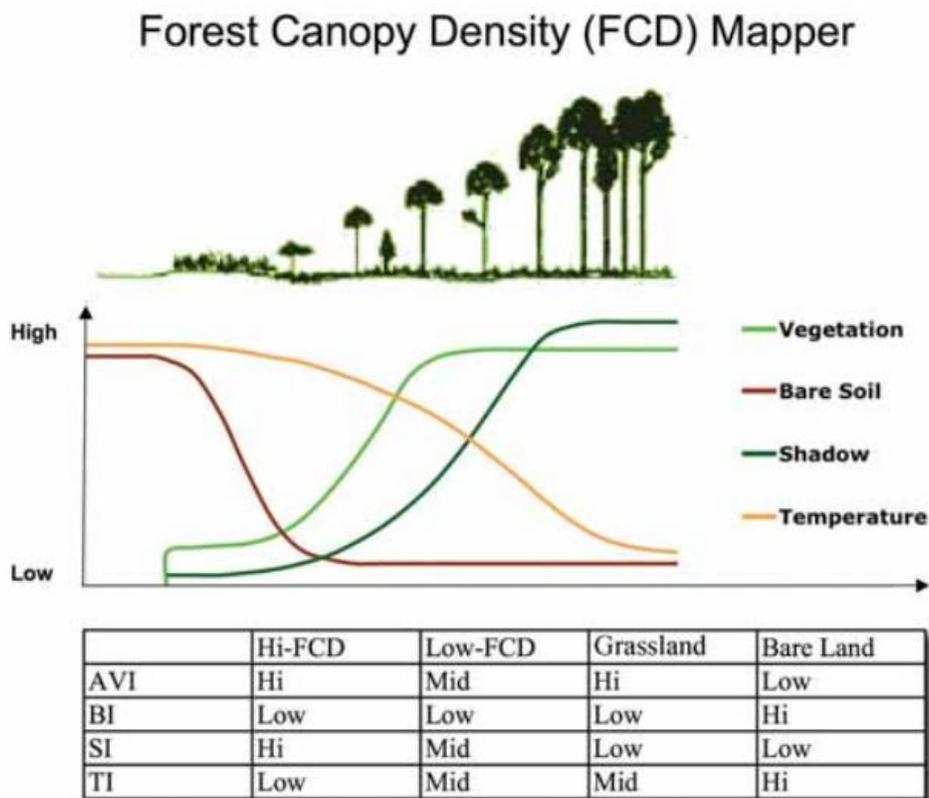


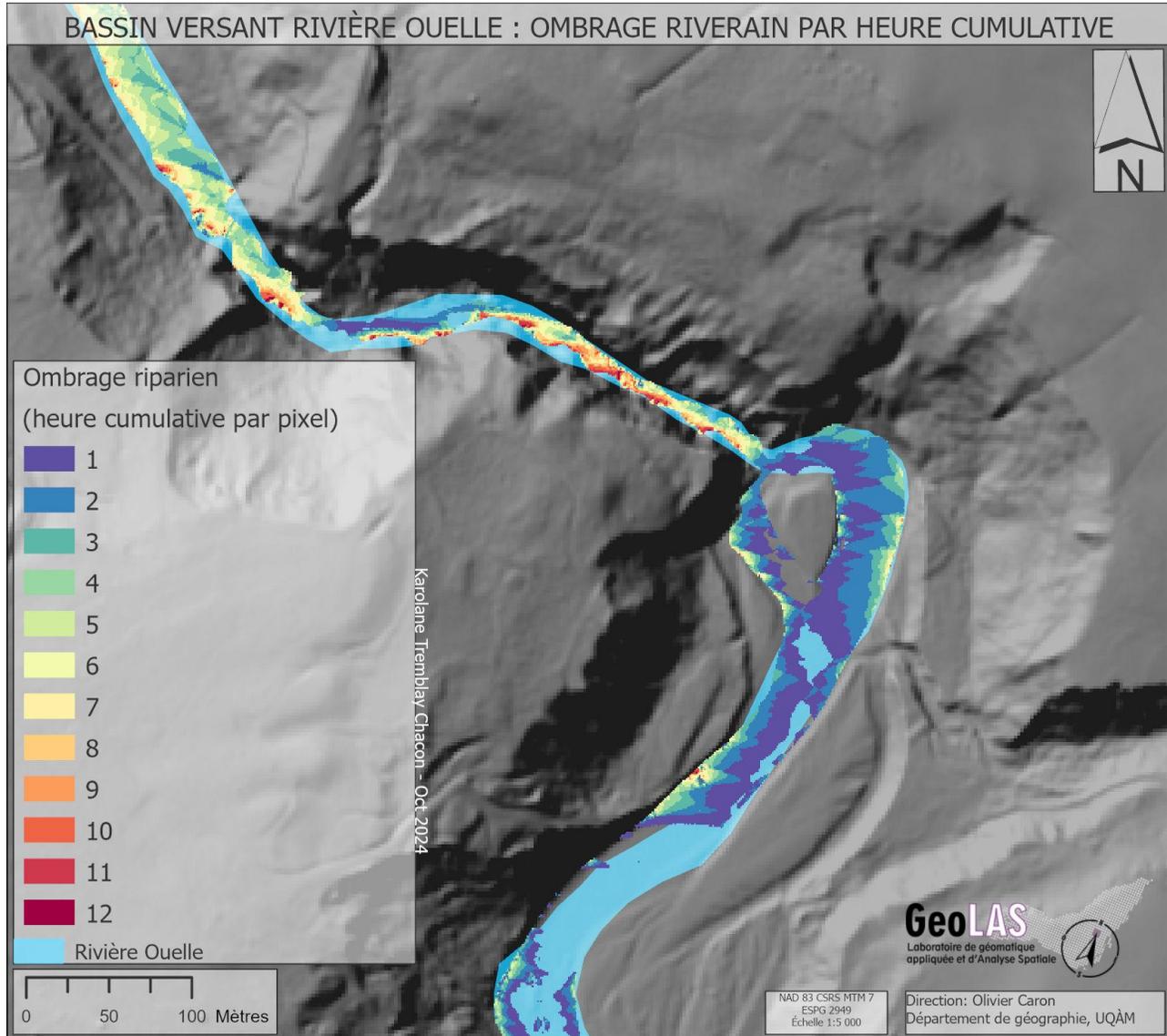
Figure 3-15 L'illustration se divise en trois parties principales. La première présente un gradient forestier, allant d'une absence de couverture forestière à une canopée dense. La deuxième partie illustre, à travers un graphique, la relation entre les facteurs de végétation, d'ombrage et de sol nu, et leur effet sur la température. Sur l'axe des Y, les niveaux élevés ou bas des paramètres sont représentés, tandis que l'axe des X montre l'évolution du couvert forestier. Le graphique révèle qu'en absence de végétation, la température est élevée, alors qu'une couverture forestière dense entraîne une diminution notable de la température. Enfin, la troisième partie est un tableau qui synthétise l'interprétation des résultats des indices individuels (AVI, BSI, SI, TI) en fonction des valeurs de l'indice global FCD et du niveau de couverture forestière. Par exemple, un FCD élevé reflète une forte végétation (AVI élevé), un faible sol nu (BSI bas), un ombrage important (SI élevé) et une température réduite (TI bas) (Rikimaru, et al., 2002; Zomer et al., 2007).



3.1.5.3 Ombrage de canopée sur le cours d'eau

Les résultats de l'ombrage riverain montrent que des paramètres comme l'altitude, l'inclinaison et l'orientation des arbres sont cruciaux pour assurer un ombrage continu et efficace, contribuant ainsi au refroidissement du cours d'eau (Rutherford, et al., 1997; Garner, et al., 2017). Dans certaines zones plus ouvertes, l'ombrage est de courte durée, tandis que d'autres, notamment des secteurs plus étroits, bénéficient d'une couverture prolongée (Figure 3-16). Cette dynamique, notamment liée à l'inclinaison des arbres, sera davantage explorée dans la section suivante avec la validation terrain. Certains « trous » dans l'ombrage sont dus à la hauteur de la canopée mesurée par le MHC et à la difficulté du LiDAR à capter l'eau, comme indiqué dans le Chapitre 2. D'autres secteurs sans ombrage résultent de l'absence de végétation près du cours d'eau, la délimitation du cours principal ayant limité l'analyse. Les résultats de la carte montrent que pour chaque pixel, après agrégation de la couche d'ombrage effectuée par heure, la valeur indiquée représente le nombre d'heures d'ombrage accumulées sur ce pixel du cours d'eau. Cette valeur permet d'évaluer l'importance du site pour le refroidissement, avec des valeurs allant de 1 (une heure) à 12 heures d'ombrage. Plus la valeur est élevée, plus le site est considéré comme crucial pour le refroidissement thermique du cours d'eau. En raison de l'échelle, il est difficile de visualiser l'ensemble des résultats dans le bassin versant. Nous avons donc choisi de présenter un exemple d'un secteur spécifique, qui sera discuté plus en détail dans la section suivante.

Figure 3-16 Carte d'ombrage riverain par heure cumulative : Elle indique le nombre d'heures d'ombrage accumulées par pixel le long du cours d'eau, allant de 1 à 12 heures. Cette carte met en évidence les secteurs clés pour le refroidissement thermique, où les zones les plus ombragées bénéficient d'une couverture prolongée, tandis que les secteurs ouverts ont un ombrage de courte durée.

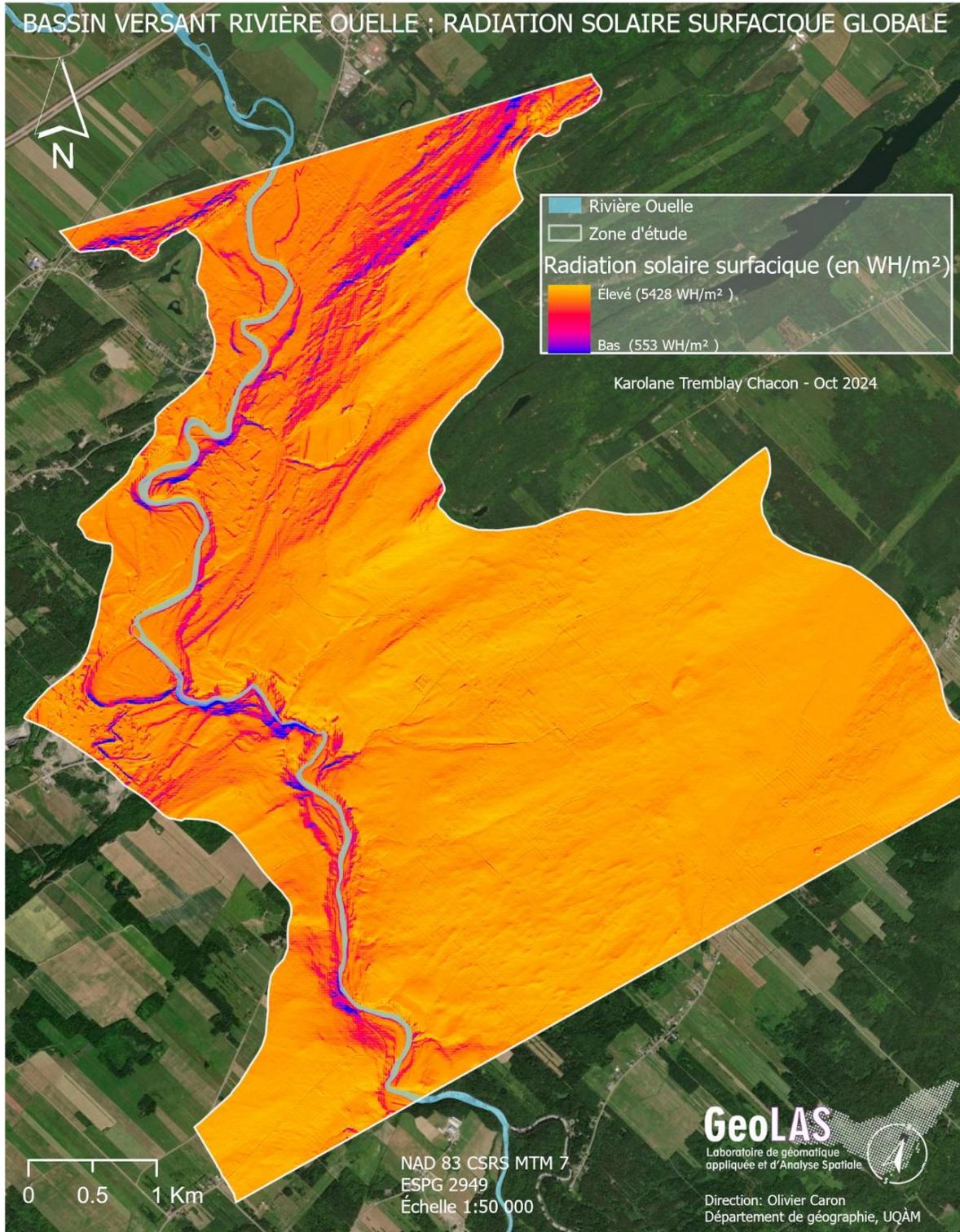


3.1.6 Atmosphérique

3.1.6.1 Solar radiation area

La carte de l'insolation solaire surfacique (Figure 3-17) représente la radiation globale, soit la somme de la radiation directe et diffuse reçue à chaque point du territoire, exprimée en wattheure par mètre carré (WH/m²). Cette mesure permet d'identifier les zones les plus exposées au rayonnement solaire et d'évaluer leur impact sur la température du cours d'eau et des sols environnants. De manière générale, le bassin versant reçoit une forte quantité de radiation solaire, avec une exposition plus marquée sur les secteurs ouverts et à faible couvert végétal. Cependant, à mesure qu'on se rapproche de l'aval du cours d'eau, notamment dans les zones à végétation dense et continue, l'insolation diminue. Certains secteurs, particulièrement sur la rive gauche du cours d'eau, reçoivent moins d'insolation, en grande partie en raison de la végétation et de l'orientation du terrain qui protège ces zones (Rutherford, et al., 1997; Garner, et al., 2017). Ces résultats soulignent l'importance cruciale de la végétation riveraine pour la protection thermique des tributaires, qui sont essentiels à l'apport d'eau froide dans le cours d'eau principal. En limitant l'exposition solaire, la canopée contribue à préserver les refuges thermiques et à maintenir des conditions favorables à la faune aquatique.

Figure 3-17 Carte de l'insolation solaire surfacique, représentant la radiation globale (en WH/m^2) sur la zone d'étude du bassin versant de la rivière Ouelle. Le bassin est largement exposé au rayonnement solaire, mais l'insolation diminue localement à proximité du cours d'eau, en particulier dans les secteurs à végétation dense. Certaines zones, notamment sur la rive gauche, reçoivent moins de radiation solaire, en raison de la présence de canopée et de l'orientation du relief.



3.2 SOUS-OBJECTIF 1.2 (AGRÉGER TOUS LES INDICATEURS MODÉLISÉS AFIN DE PRODUIRE LA REPRÉSENTATION SPATIALE DU POTENTIEL DE REFROIDISSEMENT DU COURS D’EAU) ET SOUS-OBJECTIF 2.1 (IDENTIFIER ET CARTOGRAPHIER LES ZONES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT EN FONCTION DE LEUR IMPORTANCE SELON L’ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE).

L’intégration de tous les facteurs physiques identifiés a permis de produire une couche cartographique du potentiel thermique du cours d’eau (Figure 3-18). Cette carte ne représente ni des refuges thermiques avérés ni des mesures de température, mais identifie les segments de la rivière présentant un potentiel de refroidissement ou de réchauffement, en fonction des variables environnementales modélisées. Les zones de réchauffement, quant à elles, montrent une combinaison de ces facteurs à un niveau plus bas, suggérant une plus grande susceptibilité au réchauffement. Les résultats mettent en évidence six zones distinctes :

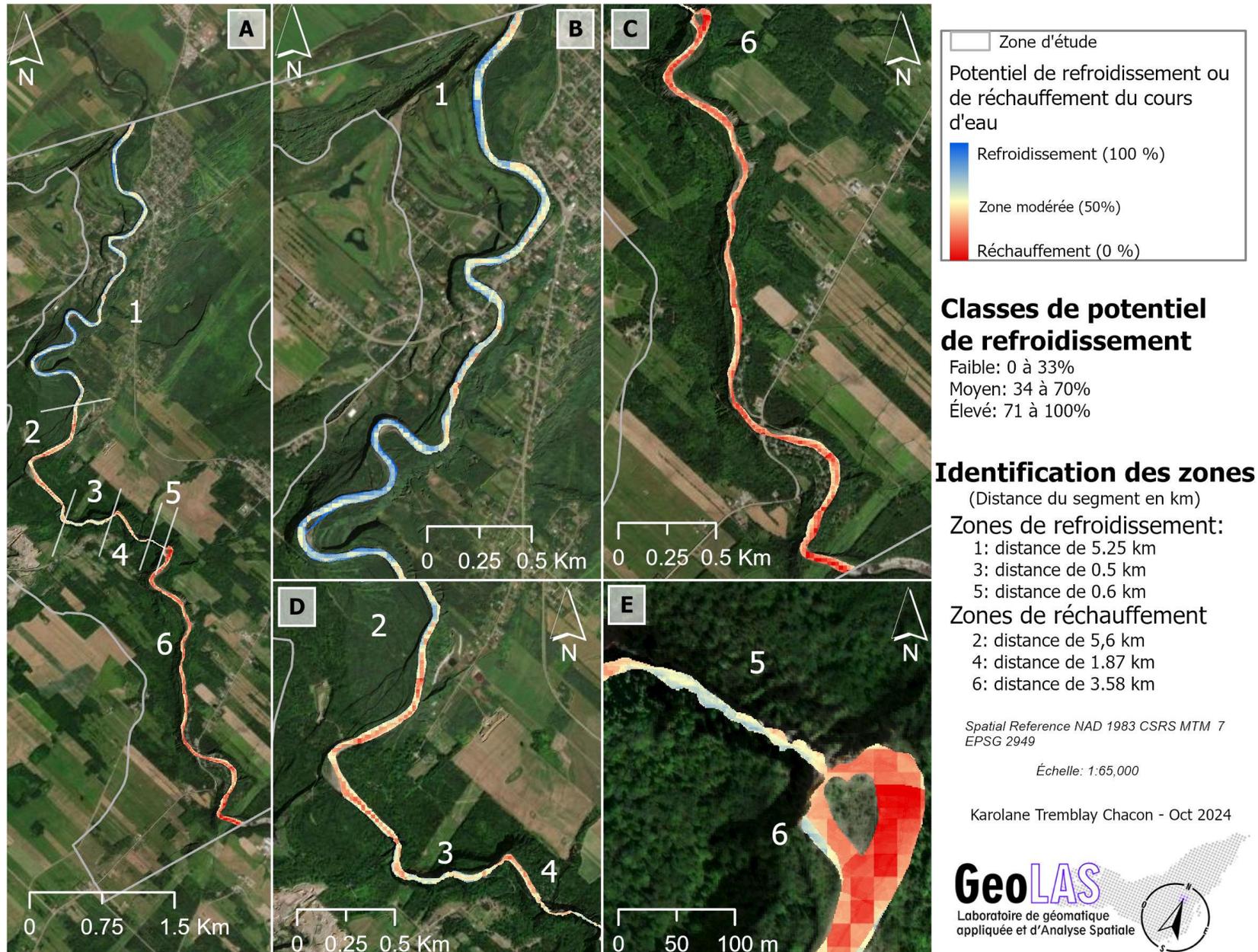
- Zones de refroidissement (ZRf) : identifiées en bleu (zones 1, 3 et 5).
- Zones neutres/ modérées : en gris, indiquant des valeurs intermédiaires.
- Zones de réchauffement (ZRC) : identifiées en rouge (zones 2, 4 et 6).

La zone 1, d’une longueur de 5,25 km, correspond aux zones potentielles de résurgence d’eau souterraine, qui ont un poids élevé dans notre AMCp. Elle est également associée à la présence de dépôts de surface facilitant ces mécanismes, ainsi qu’à l’épaisseur de ces dépôts. L’influence de la pondération de ces critères a donc fortement influencé le résultat final de l’AMCp. Des fragments de petites zones de réchauffement ou de zones neutres/modérées sont également identifiés. Les zones 2 et 4, mesurant respectivement 5,6 km et 1,87 km, correspondent à des zones de réchauffement modéré. La présence de zones grises dans les résultats indique des valeurs modérées dans l’AMCp, suggérant ainsi que ces zones sont sensibles au réchauffement, mais à un niveau relativement faible. Les zones 3 et 5, mesurant respectivement 0,5 km et 0,6 km, présentent des caractéristiques similaires à la zone 2, avec des valeurs plus grises que bleues. Cela indique un refroidissement faible, suggérant que ces zones sont en transition entre celles plus susceptibles au réchauffement et celles présentant un potentiel de refroidissement. Enfin, la zone 6, d’une longueur de 3,58 km, se caractérise par un faible potentiel de refroidissement, similaire à la zone 1, en raison du faible potentiel de résurgence d’eau souterraine, des dépôts et de la couverture forestière.

Ces résultats sont cohérents avec l'analyse des différents indicateurs environnementaux. En particulier, l'amont du cours d'eau présente une moindre continuité de la couverture forestière, ce qui favorise une exposition accrue des tributaires au rayonnement solaire. Bien que ces tributaires soient plus nombreux en amont, ils apportent potentiellement une eau plus chaude, augmentant ainsi leur vulnérabilité au réchauffement. Ce phénomène explique pourquoi la zone 6 est identifiée comme une zone plus chaude, en raison de la faible couverture forestière et de l'absence de résurgences significatives.

Figure 3-18 Carte de l'identification des zones potentielles de refroidissement et de réchauffement sur le cours d'eau. Les zones de refroidissement (ZRf) potentiel sont indiquées en bleu, les zones modérées en gris et les zones de réchauffement (ZRC) en rouge. Trois zones sont identifiées pour le refroidissement et trois pour le réchauffement. La zone 1 présente un potentiel de refroidissement élevé, tandis que la zone 6 montre un potentiel de réchauffement plus marqué. Les zones 2 à 5 sont plutôt modérées, avec des nuances de gris, indiquant qu'elles peuvent être des zones de transition.

RIVIÈRE OUELLE: IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT SUR LE COURS D'EAU



3.3 SOUS-OBJECTIF 2.2 : VALIDER LA CARTOGRAPHIE EN COMPARANT LES ZONES IDENTIFIÉES AVEC LES REFUGES THERMIQUES GÉOLOCALISÉS.

Étant donné la sensibilité des données sur la localisation exacte des refuges thermiques (RT), il n'est pas possible de présenter une cartographie détaillée de ces résultats. Cependant, la validation a été réalisée en comptabilisant le nombre de RT par zone identifiée dans l'AMCp (Tableau 3.3), ce qui permet d'évaluer la correspondance entre les ZRf identifiées et la distribution des RT observés sur le terrain.

Tableau 3.3 Répartition des refuges thermiques par type de zone (refroidissement et réchauffement) et par zone identifiée

Type de zone	Zone identifiée	Nombre de refuges thermiques (RT)
Zone de refroidissement (Zrf)	Z1	34 RT
	Z3	12 RT
	Z5	2 RT
Total RT / Zrf		48 RT
Zone de réchauffement (Zrc)	Z2	18 RT
	Z4	6 RT
	Z6	44 RT
Total RT / Zrc		68 RT
Total de RT		116 RT

Les résultats montrent que parmi les refuges thermiques (RT) identifiés, certains se trouvent dans des zones qui pourraient les rendre particulièrement vulnérables face à des pressions anthropiques ou des enjeux climatiques, à savoir les zones de réchauffement potentiel. Sur le terrain, comme il sera discuté dans la section suivante, nous avons observé que bien qu'il y ait des RT identifiés sur le cours d'eau, certains se situent dans des environnements qui ne sont pas toujours propices à leur stabilité spatio-temporelle. Nous avons également observé que dans les Zrf, les RT sont plus réguliers et rapprochés les uns des autres. En revanche, dans les Zrc, ils sont plus espacés, se concentrant en quelques clusters sur certains segments du cours d'eau. Cette répartition inégale

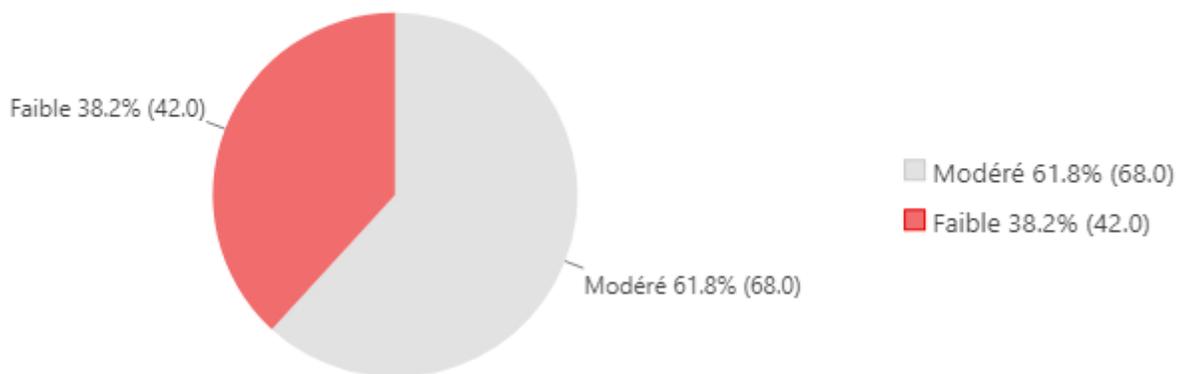
suggère que les RT dans les Zrc ils pourraient être non seulement moins stables, mais également plus vulnérables, ce qui pourrait limiter leur efficacité à long terme. Parmi l'ensemble des 116 refuges thermiques (RT) identifiés dans la zone d'étude, nous avons extrait les valeurs issues des résultats de l'AMCp afin de déterminer dans quelle classe de potentiel de refroidissement se situent ces RT. Trois classes ont été définies :

- **Faible:** 0 à 33 %
- **Modéré:** 34 à 70 %
- **Élevé:** 71 à 100 %

L'analyse révèle que la majorité des RT (61,8 %) sont situés dans des zones à potentiel de refroidissement modéré, avec une valeur maximale de 68 % selon l'AMCp. En revanche, 42 RT (38,2 %) se trouvent dans des zones à faible potentiel de refroidissement, les rendant potentiellement plus exposés aux effets du réchauffement climatique et aux perturbations anthropiques. Aucun RT n'a été identifié dans la classe élevée (71-100 %) (Figure 3-19), ce qui souligne l'absence de ZRf fort dans l'aire d'étude.

Figure 3-19 Répartition des refuges thermiques (RT) par classe de potentiel de refroidissement sur le cours d'eau : 38,2 % des RT se trouvent dans la catégorie à faible potentiel, tandis que 61,8 % sont situés dans la catégorie à potentiel modéré. Aucun RT n'a été identifié dans la catégorie à haut potentiel.

Répartition des refuges thermiques par classe de potentiel de refroidissement sur le cours d'eau



Nous avons analysé la répartition des refuges thermiques (RT) en fonction du potentiel de refroidissement du cours d'eau dans la zone d'étude, afin de mieux comprendre leur relation avec les facteurs hydrogéologiques et géologiques. Il apparaît que dans la zone à faible potentiel de refroidissement, le type de RT le plus fréquent est le suintement latéral (18), tandis que dans la zone modérée, cette catégorie regroupe le plus grand nombre de RT (40) (Figure 3-20). Ces résultats indiquent que ces RT, principalement alimentés par des eaux souterraines, soulignent l'importance des eaux souterraines et des dépôts meubles dans l'analyse. En effet, les zones à potentiel modéré ou élevé de refroidissement correspondent également aux zones où le potentiel de résurgence des eaux souterraines est plus élevé, mais aussi là où les dépôts sont plus épais. Ces observations confirment la pertinence d'avoir accordé une pondération plus élevée aux facteurs hydrogéologiques et géologiques dans notre analyse. Elles s'accordent également avec les résultats de la carte piézométrique et de la carte du substrat rocheux, qui révèlent un potentiel élevé de résurgence des eaux souterraines dans le secteur aval de la zone d'étude. Cette cohérence est renforcée par notre carte des dépôts meubles, qui montre une concentration de types de dépôts favorisant ces mécanismes.

Plus précisément, nous avons comptabilisé le nombre et le type de refuges thermiques par zones identifiées. Les zones 1, 3 et 5 correspondent à des zones potentielles de refroidissement, tandis que les zones 2, 4 et 6 sont des zones potentielles de réchauffement (Figure 3-21). On observe que, bien que la zone 6 soit une ZRc, elle présente le plus grand nombre de RT. Il est important de rappeler que le résultat de l'AMCp ne prédit pas le nombre ou la possibilité de présence de RT, mais plutôt évalue le potentiel de refroidissement ou de réchauffement de l'eau dans chaque segment de la rivière, mettant ainsi en évidence la susceptibilité aux pressions anthropiques et environnementales. Par conséquent, on peut supposer que les RT dans la zone 6, bien qu'en grand nombre, sont probablement plus vulnérables aux pressions anthropiques et environnementales. Dans la section suivante, sur le terrain, ces observations seront abordées de manière plus concrète.

Figure 3-20 Distribution du nombre de RT par potentiel de refroidissement du cours d'eau : Dans les zones à faible potentiel, les RT sont principalement de type suintement latéral, une tendance également observée dans les zones à potentiel modéré. Les alcôves froides sont la catégorie la moins fréquente dans les zones à faible potentiel, tandis que dans les zones modérées, les RT associés aux ruisseaux d'eau de source sont les moins récurrents.

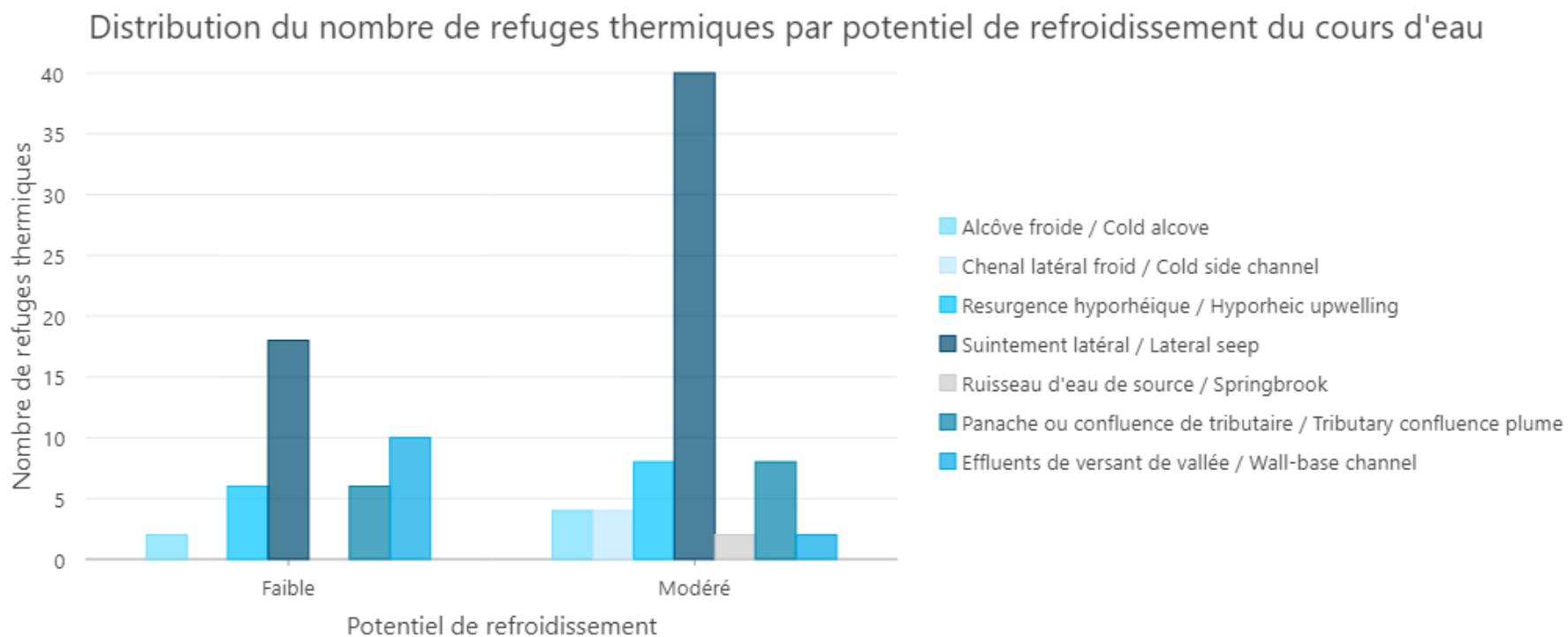
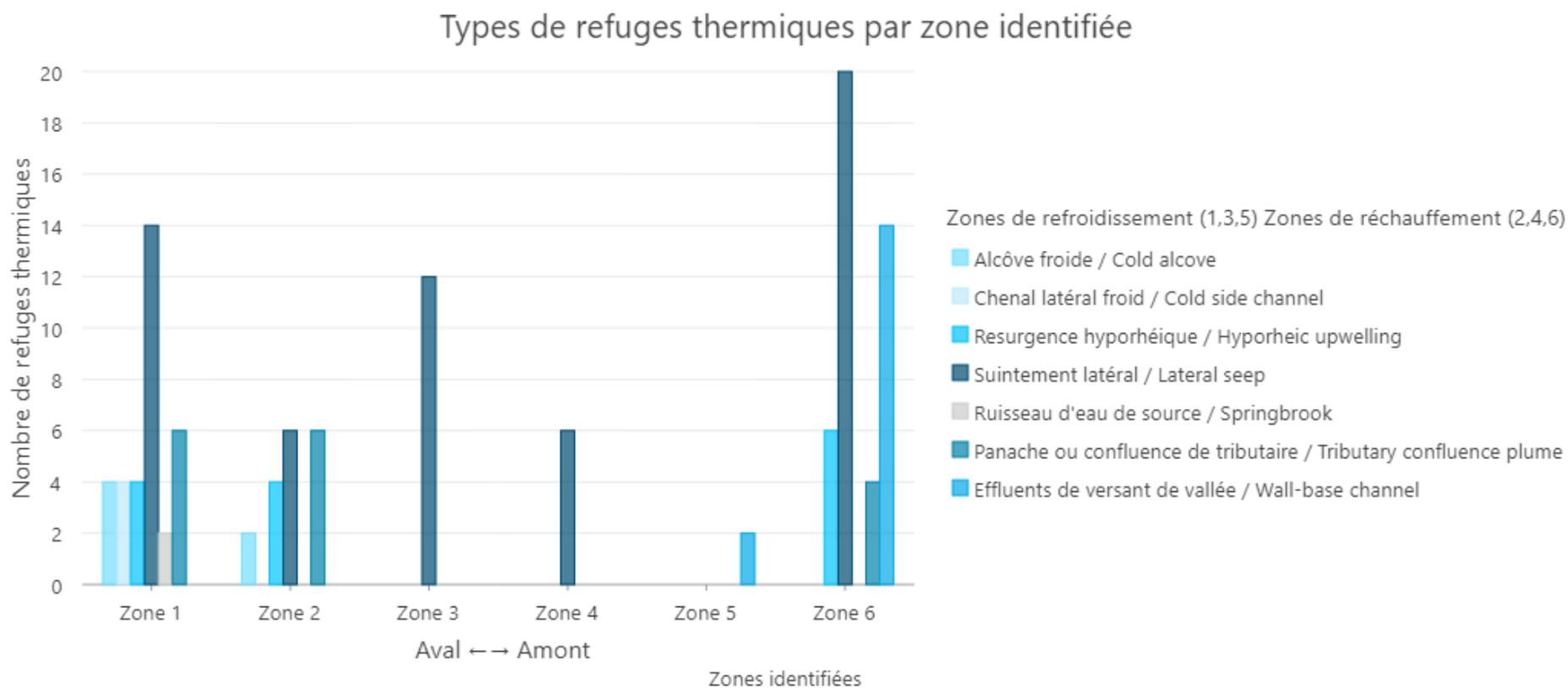


Figure 3-21 Distribution des refuges thermiques (RT) par zone identifiée : Les zones 1, 3 et 5 correspondent à des zones de refroidissement (ZRf), tandis que les zones 2, 4 et 6 sont des zones de réchauffement (ZRc). Dans la zone 1, située en aval de la zone d'étude, on observe 6 types de RT. Le suintement latéral est le plus récurrent, suivi des RT de confluence. En troisième position, on trouve une répartition entre les alcôves froides, les chenaux latéraux froids, et les effluents de versant de vallée. Les ruisseaux d'eau de source sont les moins fréquents. La zone 2 présente 4 types de RT, avec une prédominance partagée entre le suintement latéral et les RT de confluence, suivis des effluents, et enfin des alcôves froides. La zone 3 est uniquement composée de RT de résurgence hyporhéique, tout comme la zone 4. La zone 5 est quant à elle exclusivement constituée de RT d'effluents de versant de vallée. Enfin, la zone 6, située dans une ZRc, est composée de 4 types de RT : le suintement latéral en première position, suivi des effluents, des résurgences hyporhéiques et des RT de confluence. Dans le graphique, des flèches illustrent le sens de l'écoulement de la rivière, facilitant ainsi la localisation des zones en fonction de leur position en aval ou en amont du cours d'eau.



3.4 SOUS-OBJECTIF 2.3 : VALIDER LA CARTOGRAPHIE DES ZONES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT SUR LE TERRAIN

La validation des résultats de l'AMCp pondérée s'est déroulée en deux étapes. D'abord, nous avons réalisé une analyse de sensibilité des paramètres pour évaluer leur influence sur les résultats. Ensuite, une campagne terrain unique a été réalisée pour confronter les résultats cartographiques aux observations réelles. L'objectif principal de cette validation était de clarifier certains détails liés à la modélisation des indicateurs identifiés pour des facteurs physiques, tels que les éléments forestiers, géomorphologiques et géologiques. Par ailleurs, cette validation visait également à évaluer l'interprétation que l'on peut attribuer aux résultats de l'AMCp.

3.4.1 Analyse de sensibilité des paramètres

L'analyse de sensibilité vise à évaluer l'influence de la pondération des facteurs dans l'AMCp et à mesurer dans quelle mesure les résultats finaux varient en fonction des valeurs attribuées aux paramètres. Cette approche permet de tester la robustesse du modèle et d'identifier les facteurs les plus déterminants dans l'identification des ZRf et de ZRc. Trois scénarios ont été élaborés en mettant en avant un facteur principal — hydrologique, hydrogéologique et géologique — chacun comprenant deux variables pour garantir une comparabilité entre eux. Les résultats de chaque scénario révèlent des différences marquées en fonction du facteur priorisé :

- Scénario 1 (priorisation du facteur Hydrographique) : Peu de variations dans l'identification des zones de refroidissement et de réchauffement. La faible influence observée s'explique par le faible étalement spatial des indicateurs hydrographiques par rapport aux autres facteurs.
- Scénario 2 (priorisation du facteur Hydrogéologique) : Les zones situées en amont du bassin versant voient leur influence réduite, limitant la détection des zones de refroidissement dans ces secteurs. Les zones de refroidissement se concentrent surtout en aval, là où les résurgences sont les plus probables.

- Scénario 3 (priorisation du facteur Géologique) : Les résultats sont similaires au scénario 2, confirmant une forte interconnexion entre les facteurs hydrogéologiques et géologiques. Ces facteurs, souvent associés aux réservoirs d'eau souterraine, apparaissent comme des éléments déterminants dans la régulation thermique du cours d'eau (Figure 3-21).

Les autres facteurs, possédant une ou trois variables, étaient plus difficiles à comparer. Une couche de référence ou d'étalon a également été créée avant d'attribuer les pondérations finales dans le cadre de l'AMCp. Cette couche attribue une influence égale à tous les indicateurs. Cela nous a permis de mieux comparer les résultats entre les scénarios issus de l'analyse de sensibilité des paramètres et le résultat final. Toutefois, même avec une pondération égale pour chaque indicateur, le poids total d'un facteur peut varier en fonction du nombre d'indicateurs qu'il contient. Par exemple, le facteur hydrologique, avec deux indicateurs ayant chacun un poids de 9, atteint un poids total de 18, tandis que le facteur géomorphologique, qui ne comporte qu'un seul indicateur avec un poids de 9, conserve un poids total de 9. Étant donné que la formule de l'AMCp inclut un total de 11 indicateurs, un poids de 9 a été attribué à chacun, pour un total de 99. Idéalement, cette somme aurait dû être de 100, mais cela n'a pas été possible, car Raster Calculator n'autorise pas l'utilisation de valeurs décimales lors de l'attribution des poids et du calcul de la somme des indicateurs (Tableau 3.4).

Cette analyse vise ainsi à accorder davantage de poids à un seul facteur afin d'observer son effet sur les résultats de l'AMCp et de vérifier si le choix final de pondération est adéquat. Elle permet également d'examiner l'influence de la pondération de chaque paramètre sur le résultat final et sa représentation spatiale. Les poids ont été répartis de manière équitable entre les facteurs pour garantir que leur somme soit égale à 100. La visualisation des résultats de chaque scénario révèle des différences notables en fonction des facteurs priorisés. Dans le scénario 1, où le facteur hydrographique est mis en avant, incluant les plumes de confluence et les sites à potentiel d'accumulation d'eau, il n'y a pas de changements majeurs dans l'identification des zones de potentiel de refroidissement et de réchauffement. Cela s'explique en partie par le fait que la représentation spatiale de chaque couche est relativement petite par rapport à sa réelle étendue, ce qui limite l'impact de chaque facteur sur le résultat final. En revanche, dans le scénario 2, où le facteur hydrogéologique est privilégié (carte piézométrique et carte de la topographie du socle rocheux), on observe que les sites situés plus en amont du bassin versant voient leur influence

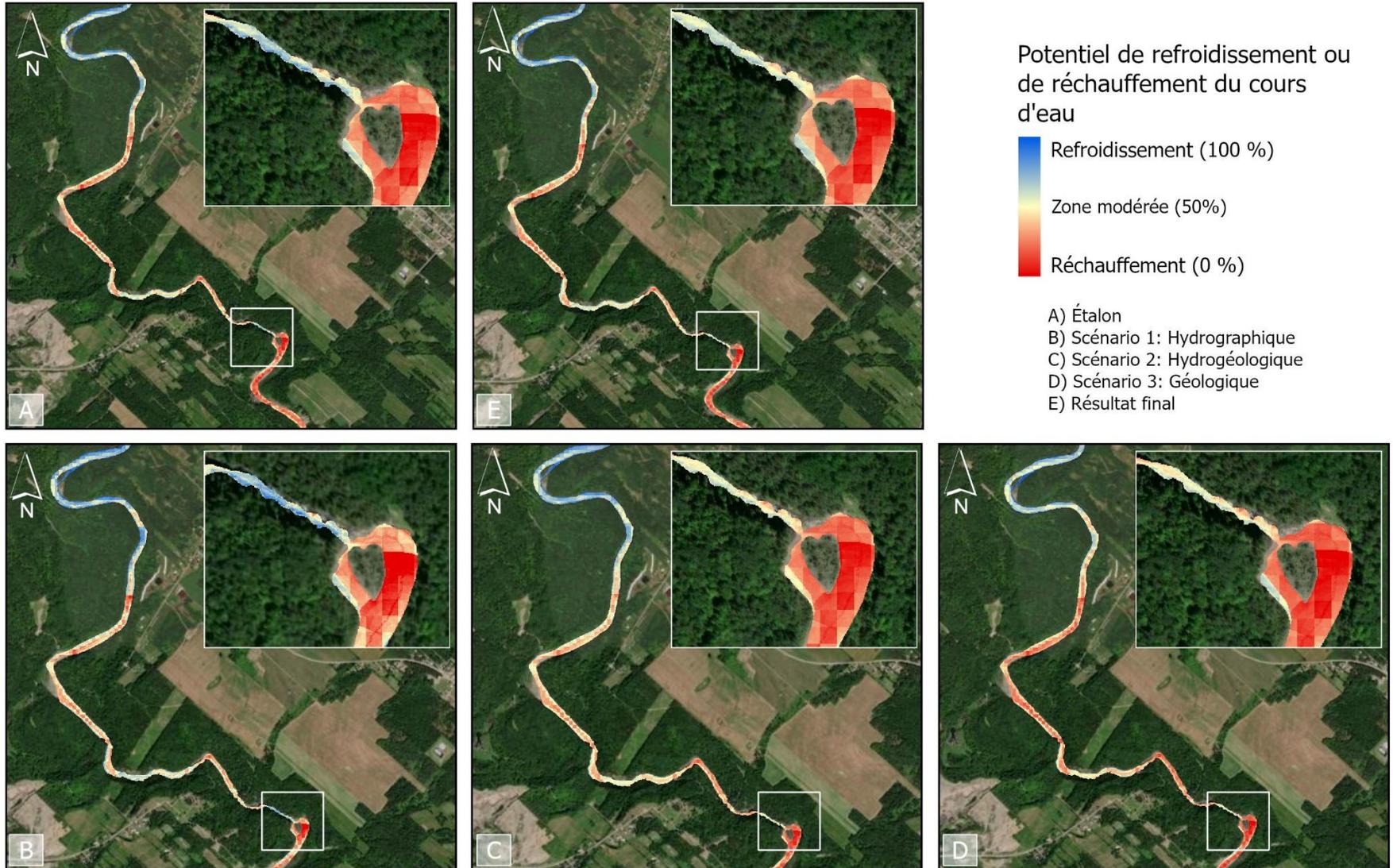
réduite, ce qui diminue les résultats et transforme certains sites à fort potentiel de refroidissement en zones moins pertinentes. Avec ce facteur, les ZRf seront surtout concentrées en aval du bassin. Enfin, le scénario 3, qui priorise le facteur géologique (distribution des dépôts de surface et épaisseur), génère des résultats similaires à ceux du scénario 2, soulignant leur forte interconnexion. Ces deux scénarios montrent l'importance de considérer ensemble les facteurs hydrogéologique et géologique, même si leur poids est distinct, car ces deux facteurs sont souvent associés aux réservoirs d'eau souterraine, un élément clé dans la dynamique des RT (Figure 3-22).

Tableau 3.4 La distribution des pondérations entre les indicateurs des facteurs physiques totalise 100. La première colonne représente l'étalon, avec un poids de 9 pour chaque indicateur, totalisant 99 en raison des contraintes de Raster Calculator. Les trois colonnes suivantes présentent trois scénarios avec un facteur priorisé : le scénario 1 priorise l'hydrographique, le scénario 2 l'hydrogéologique, et le scénario 3 le géologique, chacun avec un poids de 14 par indicateur, totalisant 28.

Étalon		Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3	
Pondération des indicateurs	Facteurs	Pondération des variables	Facteurs	Pondération des variables	Facteurs	Pondération des variables	Facteurs
9	Hydrogéologique = 18	8	Hydrogéologique = 16	14	Hydrogéologique = 28	8	Hydrogéologique = 16
9		8		14		8	
9	Hydrographique = 18	14	Hydrographique = 28	8	Hydrographique = 16	8	Hydrographique = 16
9		14		8		8	
9	Géologique = 18	8	Géologique = 16	8	Géologique = 16	14	Géologique = 28
9		8		8		14	
9	Géomorphologique = 9	8	Géomorphologique = 8	8	Géomorphologique = 8	8	Géomorphologique = 8
9	Forestier = 27	8	Forestier = 24	8	Forestier = 24	8	Forestier = 24
9		8		8		8	
9		8		8		8	
9	Atmosphérique = 9	8	Atmosphérique = 8	8	Atmosphérique = 8	8	Atmosphérique = 8
99			100		100		100

Figure 3-22 Étalon, scénarios et résultat final (maille 1 x 1). Scénario 1: priorise le facteur hydrographique, montre peu de variations dans les zones de refroidissement (ZRf) et de réchauffement (ZRc). Scénario 2 : priorise le facteur hydrogéologique, révèle une diminution de l'influence des sites en amont du bassin versant, réduisant ainsi les ZRf en amont. Scénario 3 : met l'accent sur le facteur géologique, qui génère des résultats similaires au scénario 2, soulignant l'interconnexion entre les facteurs hydrogéologique et géologique, souvent liés aux réservoirs d'eau souterraine. La figure inclut aussi la couche étalon, où tous les facteurs ont le même poids, ainsi que le résultat final pour comparaison.

RIVIÈRE OUELLE: COMPARAISON DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE



3.4.2 Campagne terrain

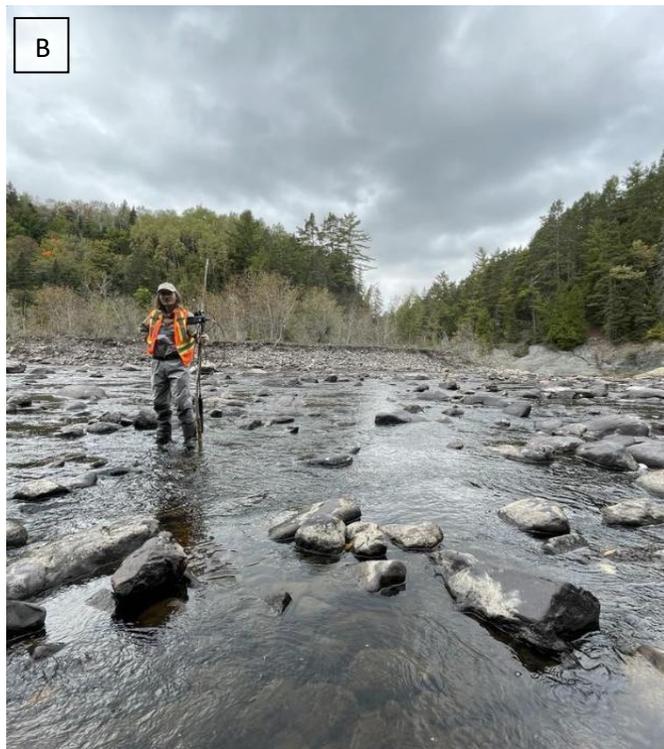
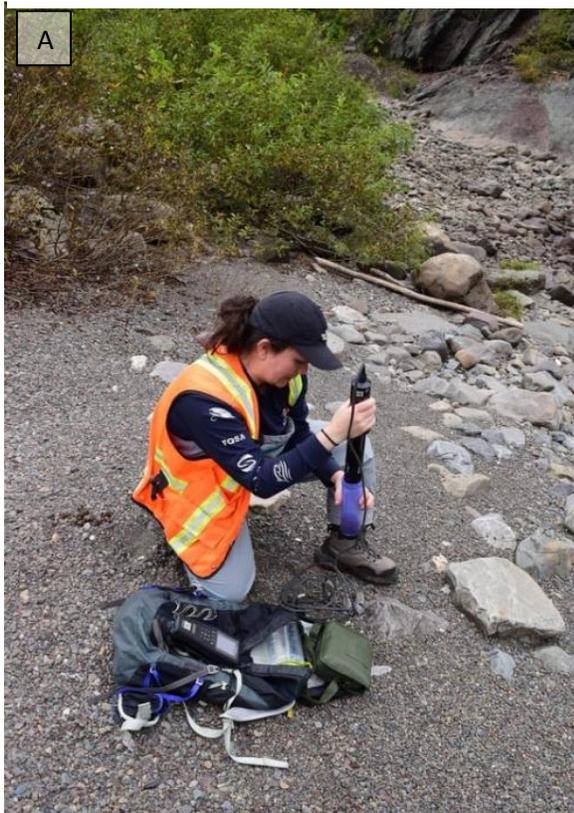
La campagne terrain a eu lieu le 23 septembre 2024, une date choisie en fonction des contraintes de temps et des conditions météorologiques. La température de 17,2 °C se situait dans les moyennes régionales, et la journée, nuageuse avec quelques éclaircies, mais sans précipitations, offrait des conditions idéales pour les relevés. En raison de la distance de 4 h 30 entre Montréal et la rivière Ouelle, nous avons optimisé notre seule journée terrain en identifiant à l'avance des secteurs clés à valider. Les critères de sélection incluaient l'accessibilité, la concordance des résultats de photo-interprétation (notamment pour la couverture forestière), la proximité des routes et la présence de refuges thermiques. Nous avons également consulté le directeur de l'OBV OBakir pour enrichir notre connaissance du territoire.

Une carte géoréférencée a été préparée et importée dans AvenzaMaps (Annexe.A), permettant d'y accéder hors réseau. Bien que 10 sites aient été sélectionnés au total, les contraintes de temps nous ont amenés à en prioriser deux : le *site H*, choisi pour sa facilité d'accès, et le *site A*, jugé représentatif du schéma de la Figure 2-37 et facile d'accès. Le *site A* a été priorisé en raison de sa représentativité et de ses deux zones contrastées : l'une avec un potentiel de réchauffement plus élevé (ZRC) (soit la zone 6) et l'autre de refroidissement accru (ZRF) (soit la zone 5), ce qui nous a amenés à identifier trois sections distinctes sur le site (Figure 3-23). Pour garantir la précision des relevés thermiques, nous avons utilisé une multisonde ProDSS, un instrument spécialisé en mesures physico-chimiques des cours d'eau. Cet outil permet de mesurer la température de l'eau avec une grande précision, ainsi que d'autres paramètres essentiels à l'évaluation des refuges thermiques, comme la conductivité et l'oxygénation. d'autres paramètres à la seconde près (Figure 3-24.A). Cependant, faute de temps, seul le *site A* a pu être étudié.

Figure 3-23 La représentation du résultat final de l'Analyse multicritères pondéré (AMCp) montre les trois sections identifiées du site A visité : la section 1, qui correspond à un site à haut potentiel de réchauffement ; la section 2, une zone de transition entre la section 1 et la section 3 ; et enfin, la section 3, une zone à potentiel de refroidissement.



Figure 3-24 Image A : Photos de la campagne terrain : Karolane Tremblay Chacon prépare la sonde ProDSS pour les relevés de température de la section A. Image B : Photo terrain: l'assistant terrain, Louis Boivin, mesure approximativement la hauteur de la colonne d'eau dans la section 1 du site A.



Comme mentionné précédemment, la zone d'étude présente une pente globale faible. Toutefois, l'analyse des pentes par tronçon a révélé des variations significatives, soulignant que certains secteurs pourraient être plus exposés au réchauffement. Parmi ceux-ci, le site A se distingue, affichant des conditions spécifiques influençant la dynamique thermique du cours d'eau. La section 1, identifiée comme une zone à potentiel de réchauffement (ZRC), présente plusieurs caractéristiques favorisant une augmentation de température :

- Colonne d'eau peu profonde (environ 50 cm)
- Exposition directe aux rayons solaires en raison d'une couverture forestière éloignée
- Débit faible, avec une hauteur d'eau variant entre 5 cm et 50 cm (Figure 3-24.B), en accord avec les données de précipitations estivales et le débit moyen (Figure 1-2).

La couverture forestière, bien que présente, est trop haute et éloignée du cours d'eau pour fournir un ombrage efficace. En conséquence, la section 1 reste largement exposée au rayonnement solaire, augmentant ainsi sa vulnérabilité au réchauffement (Figure 3-25.A). Les berges du site A montrent des signes d'érosion et de petits glissements de terrain, exposant ainsi la composition des dépôts de surface (Figure 3-25.B). Cette dynamique d'érosion pourrait accroître la sédimentation du cours d'eau, influençant potentiellement la stabilité des refuges thermiques et la dynamique hydrologique locale. Une investigation sur le terrain a été menée afin d'identifier un tributaire potentiel qui alimente un RT de confluence en amont du site A.

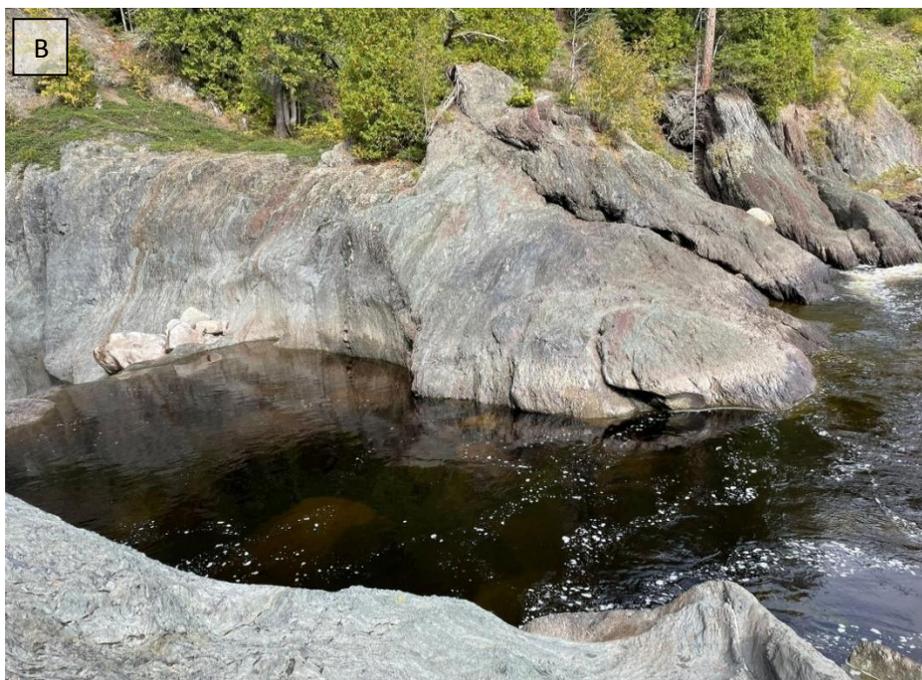
Cependant, aucun tributaire visible n'a été détecté, ce qui confirme l'hypothèse que certains RT de confluence répertoriés sont en réalité alimentés par des tributaires intermittents, plutôt que par un écoulement permanent (Figure 30). Compte tenu des conditions observées – faible débit, exposition solaire marquée, profondeur d'eau réduite et pente douce – nous anticipons une température plus élevée dans la section 1. Cependant, la température mesurée était de 13,4 °C, soit nettement en dessous du seuil de réchauffement attendu. Cette divergence suggère l'influence possible de flux d'eau souterraine froide, ou d'un effet tampon lié aux conditions météorologiques du jour.

Figure 3-25 Image A : Dans le site A, section 1, on observe que le lit d'un des bras de la rivière est complètement exposé, sans débit d'eau et très sec, ce qui suggère qu'il n'y a pas eu d'écoulement d'eau depuis un certain temps. Bien que la forêt soit dense, les arbres sont situés loin de la zone où l'eau pourrait être présente, ce qui réduit leur capacité à fournir de l'ombrage et à exercer un effet de refroidissement sur le cours d'eau. Image B : En amont de la section A, on observe le cours d'eau de la rivière Ouelle, dont le débit est relativement faible. Sur la rive droite, de petits glissements de terrain sont visibles. Sur les deux rives, des bancs rocheux composés de nombreuses petites roches de différentes tailles granulométriques et de sols nus sont suivis par des arbustes et une forêt dense.



La section 2 du site A, située entre les sections 1 et 3, se caractérise par une petite chute d'environ 60 cm (Figure 3-26.A). L'eau s'écoule vers une zone de ralentissement, formant un petit bassin où le débit diminue. Près de la cassure du roc, à proximité de la chute, un RT a été identifié. La température de l'eau y était de 14 °C, tant dans le RT que dans le bassin, soit légèrement supérieure à celle mesurée dans la section 1, mais sans différence significative. Le débit dans cette section était nettement plus lent, et la colonne d'eau atteignait environ 2 m de profondeur (Figure 3-26.B). Ce bassin, encadré de hautes parois rocheuses, pourrait capter une importante quantité d'énergie solaire, favorisant une absorption de chaleur et influençant potentiellement la température de l'eau, bien que cela reste à confirmer.

Figure 3-26 Image A : Dans la section 2 du site A, une petite dénivellation entre les deux sections crée une chute d'eau. On remarque que la colonne d'eau y est plus profonde et que le débit est plus fort. Image B : Dans la section 2 du site A, après la petite chute, on observe un ralentissement du débit du cours d'eau. Le bassin, encaissé entre les roches, présente une diminution du débit de l'eau.



Dans la section 3 du *site A*, identifiée comme une ZRF, il n'a pas été possible de mesurer la température de l'eau en raison de l'accès difficile. Contrairement à la section 1 (ZRC), la section 3

(ZRF) se caractérise par un canyon où le cours d'eau s'écoule à travers le roc, sous une canopée inclinée qui protège efficacement l'eau du rayonnement solaire (Figure 2-37, Figure 3-27). De plus, nous avons observé une série de petites chutes et une augmentation du débit et de la vitesse de l'eau, renforçant le potentiel de refroidissement de cette zone. Une autre caractéristique intéressante de cette ZRF est qu'elle abrite des RT alimentés par des résurgences d'eau souterraine, ce qui suggère que ces eaux pourraient circuler à travers le roc pour alimenter le cours d'eau principal.

Figure 3-27 Dans la section 3 du site A, on observe le canyon où le cours d'eau s'écoule, encastré entre les roches, avec une forêt dense couvrant les roches. Les arbres, moyennement inclinés vers le cours d'eau, forment un couvert végétal assez dense, et la configuration étroite du canyon semble protéger l'eau des rayons solaires.



Les températures mesurées dans les sections 1 et 3 ont révélé un résultat contraire aux attentes initiales : la section 1, pourtant plus exposée au soleil, présentait une température plus basse, tandis que la section 3, qui semblait mieux protégée, affichait une température plus élevée. Dans la section 1, la pente plus marquée entraîne un écoulement plus rapide, limitant ainsi le temps d'exposition au rayonnement solaire. Ce facteur explique pourquoi la température de l'eau est restée plus basse que prévu, malgré une exposition directe au soleil. À l'inverse, dans la section 3, l'eau circule beaucoup plus lentement et la colonne d'eau est plus profonde. Bien que ce type de milieu puisse

offrir une meilleure inertie thermique, la réduction de la vitesse d'écoulement signifie aussi que l'eau accumule davantage de chaleur, ce qui expliquerait la température plus élevée mesurée sur le terrain. De plus, la section 3 est marquée par des chutes encaissées entre des roches et une couverture forestière dense, des éléments théoriquement favorables au refroidissement (Figure 34). Cependant, malgré cette protection, la faible vitesse d'écoulement et la profondeur accrue de la colonne d'eau semblent avoir contribué à un effet d'accumulation thermique, expliquant la température plus élevée observée.

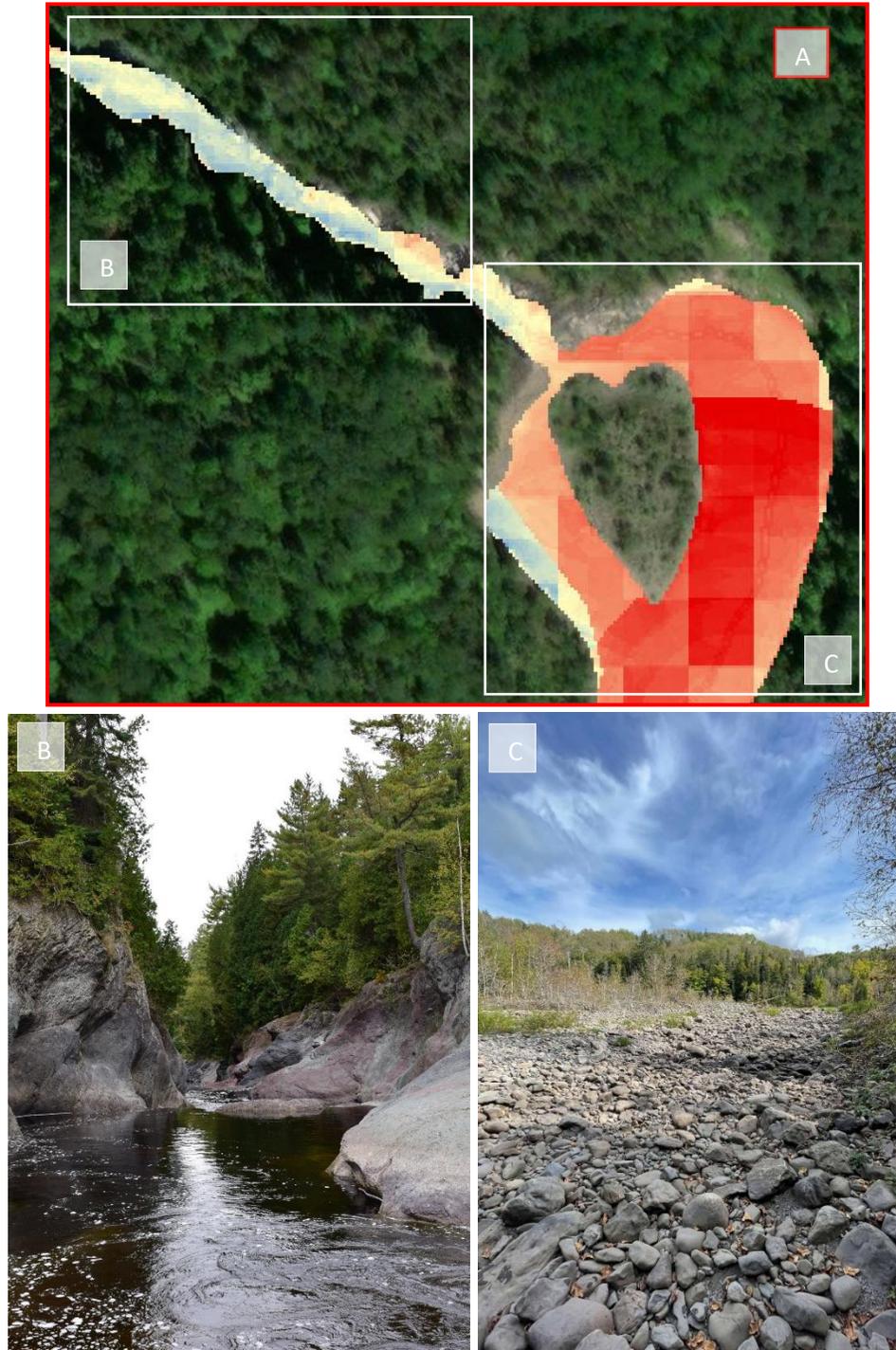
Figure 3-28 Dans un autre point de vue du petit canyon de la section 3 du site A, on observe le cours d'eau qui serpente entre les roches et d'autres petites dénivellations. La photo, prise vers 13 h00, montre que, du côté gauche, bien que les arbres ne soient pas très inclinés vers le cours d'eau, leur hauteur, leur angle et leur densité créent une zone ombragée. Cette configuration protège efficacement le cours d'eau des rayons du soleil, limitant ainsi l'ensoleillement direct sur sa surface.



Les résultats indiquent que le RT en amont de la section 1 (ZRC) est plus vulnérable malgré une eau plus froide, en raison de conditions moins constantes, comme les tributaires intermittents et le faible débit des tributaires. À l'inverse, le refuge dans la section 3 (ZRF), alimenté par des résurgences d'eau souterraine, présente une meilleure stabilité spatio-temporelle. En effet, la lente insertion de l'eau souterraine, combinée au ralentissement du gradient de pente et à la profondeur de la colonne d'eau, favorise le maintien des températures fraîches grâce à un temps de mélange prolongé. Cependant, il est important de noter que cette stabilité ne garantit pas nécessairement la qualité du refuge. Une circulation accrue de l'eau demeure essentielle, car elle favorise l'oxygénation, améliorant ainsi la qualité de l'habitat et le potentiel du refuge pour le saumon. Ainsi, l'équilibre entre ces facteurs permettra de garantir l'efficacité de ses fonctions hydroécologiques.

Ainsi, même si la différence de température mesurée entre les sections est minime (0,6 °C), les résultats de l'AMCp apportent une compréhension plus large du comportement des refuges thermiques. En plus d'identifier les secteurs à potentiel de refroidissement ou de réchauffement, l'AMCp met en évidence la sensibilité des RT aux conditions physiques influençant leur stabilité spatio-temporelle. L'analyse terrain a confirmé que les résultats de l'AMCp permettent d'évaluer la sensibilité d'un site aux facteurs favorisant le refroidissement ou le réchauffement. Par exemple, la section 1 du *site A* présente un résultat très bas dans l'AMCp ce qui équivaut à une zone potentielle de réchauffement malgré la présence des plumes de confluences et de refuges thermiques. Sur le terrain, cela se traduit par un site plus susceptible de se réchauffer, ou encore à indiquer la sensibilité et la vulnérabilité des RT par rapport à leur stabilité spatio-temporelle. À l'inverse, la section 3, mieux protégée, indiquerait une plus grande résistance au réchauffement. Ces observations démontrent que l'AMCp constitue un outil pertinent pour estimer la vulnérabilité des refuges thermiques. En combinant plusieurs critères environnementaux, il permet de cartographier les zones à risque et d'anticiper leur réponse aux pressions hydrologiques et climatiques, fournissant ainsi des résultats cohérents avec les observations de terrain (Figure 3-29).

Figure 3-29 Cette figure compare les résultats de l'Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp) pondéré avec la réalité observée sur le terrain (A), en identifiant les zones de potentiel de refroidissement (B) et de réchauffement (C). Il apparaît que la zone à haut potentiel de réchauffement (C), prédite par l'AMCp, correspond bien au type de paysage observé, indiquant que ce site est particulièrement vulnérable aux facteurs pouvant réchauffer l'eau. Inversement, la zone à potentiel de refroidissement identifiée par l'AMCp (B) correspond à une région qui semble offrir des conditions idéales pour protéger l'eau, en contribuant soit à son refroidissement, soit en prévenant son réchauffement.



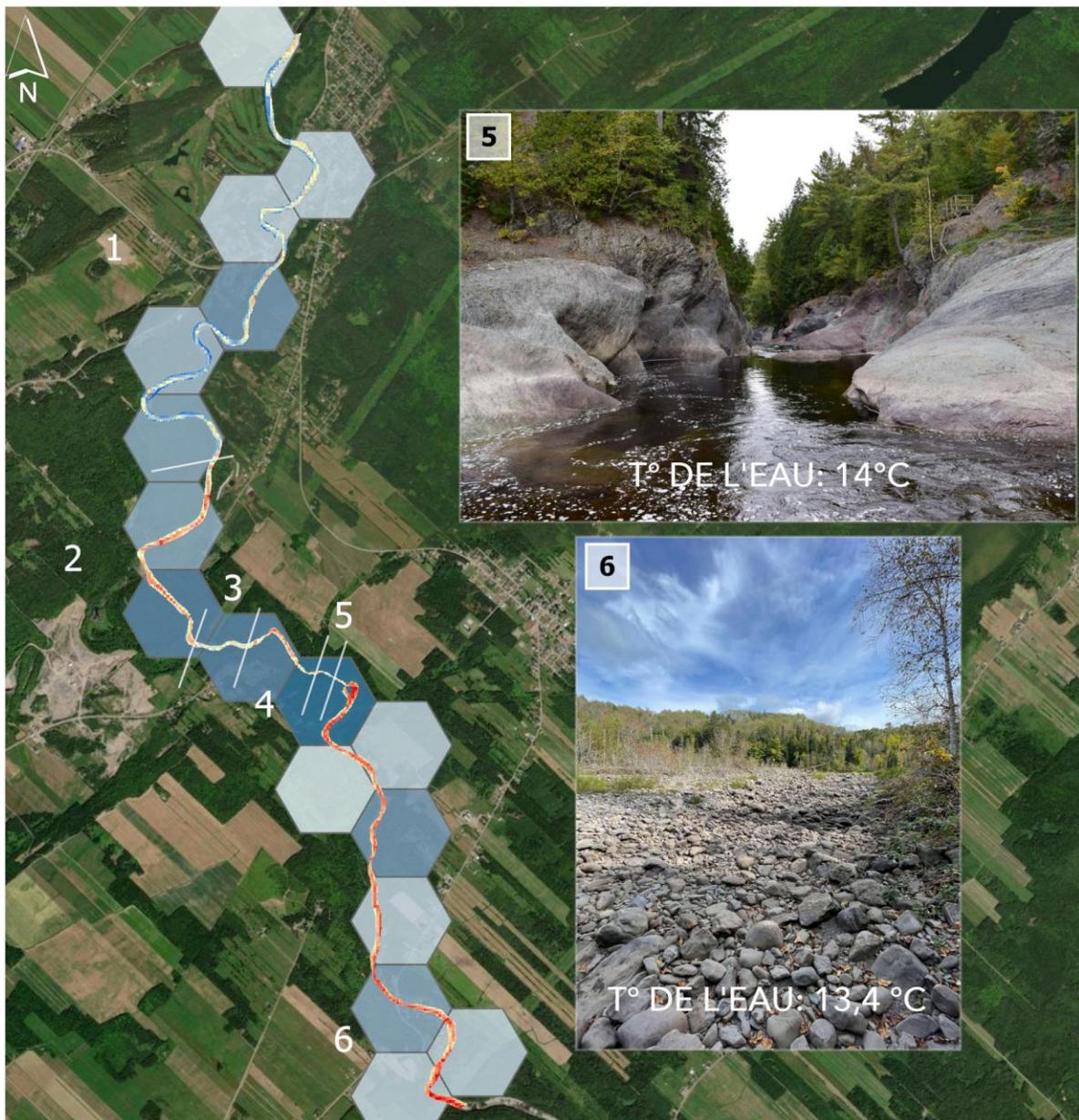
Finalement, la Figure 3-30 présente une carte de synthèse du résultat de l'AMCp, en complément de la distribution des refuges thermiques, contrastée par la réalité du terrain. Ce résultat permet de caractériser et de visualiser spatialement l'interaction complexe entre les facteurs physiques identifiés dans ce mémoire : hydrographiques, hydrogéologiques, géologiques, géomorphologiques, forestiers et atmosphériques. Il aide également à mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrivent les RT identifiés sur la rivière, qui se distribuent tout au long du cours d'eau.

Grâce aux résultats de l'AMCp, il devient possible d'identifier les RT les plus vulnérables aux perturbations anthropiques et aux fluctuations hydroclimatiques, telles que les périodes prolongées d'étiage, l'assèchement des tributaires et les vagues de chaleur. Par exemple, la ZRc 6 compte de nombreux RT, mais selon le résultat de l'AMCp, ce secteur de la rivière semble soumis à moins de facteurs physiques favorisant le refroidissement. La réalité du terrain confirme cette tendance, révélant un couvert forestier limité, un faible débit et, malgré un gradient de pente favorable à l'écoulement, des conditions peu propices au maintien de températures fraîches. À l'inverse, la ZRf 5, également dotée de RT, semble mieux protégée des menaces précédemment mentionnées.

Ce résultat met en évidence le potentiel d'identification des zones prioritaires pour orienter les efforts de restauration des sites situés à proximité du cours d'eau, notamment la bande riveraine dans le cas des ZRc. Quant aux ZRf, qui abritent également des RT, l'objectif sera plutôt de favoriser leur conservation ou de renforcer leur protection face aux pressions anthropiques. Ainsi, l'AMCp apparaît comme un outil d'aide à la décision pour les acteurs de la faune et de l'eau, soucieux de préserver les écosystèmes forestiers et riverains, habitats essentiels du saumon atlantique, afin d'assurer sa pérennité.

Figure 3-30 Carte synthèse illustrant les résultats de l'analyse multicritères pondérée (AMCp) en contraste avec la distribution des refuges thermiques (RT) sous formes d'agrégats, ainsi que des photos de la réalité du terrain des zones de refroidissement (Zrf) 5 et 6. On observe la répartition des RT le long du cours d'eau caractérisé par son potentiel de refroidissement ou de réchauffement. Cela permet d'identifier les secteurs du cours d'eau où les RT seraient potentiellement plus vulnérables ou les secteurs à prioriser, afin d'orienter les stratégies de conservation ou de protection de l'habitat du saumon. Ag- RT

RIVIÈRE OUELLE: DISTRIBUTION DES AGRÉGATS DE REFUGES THERMIQUES PAR RAPPORT AUX ZONES POTENTIELLES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT



Potentiel de refroidissement ou de réchauffement du cours d'eau



Agrégation des refuges thermiques



Classes de potentiel de refroidissement

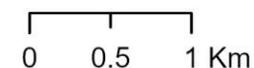
Faible: 0 à 33%
Moyen: 34 à 70%
Élevé: 71 à 100%

Zones de refroidissement: 1, 3, 5

Zones de réchauffement: 2, 4, 6

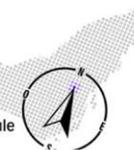
Spatial Reference NAD 1983 CSRS MTM 7
EPSG 2949

Échelle: 1:50,000



Karolane Tremblay Chacon - Mars 2025

GeoLAS
Laboratoire de géomatique
appliquée et d'Analyse Spatiale



CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce dernier chapitre met en perspective les résultats en les confrontant aux défis environnementaux actuels, en comparant les zones identifiées aux connaissances existantes et en proposant des pistes de conservation et de restauration pour les secteurs critiques. Il aborde également les limites méthodologiques rencontrées, tant dans la collecte et le traitement des données que dans le choix des méthodes utilisées ou envisagées pour chaque facteur physique identifié. La discussion s'articule par facteur ainsi que pour le résultat final, tout en soulevant certains éléments qui n'ont pas été exploités dans le cadre du mémoire, mais qui auraient pu être pertinents à considérer.

4.1 RÉSULTATS DES FACTEURS HYDROGRAPHIQUES

Bien que l'étude de Wang et al. (2020) ait utilisé un système de grilles, il est important de souligner que, dans leur contexte, ils ont pu mesurer ces informations directement sur le terrain. Ces observations terrain ont permis de mieux comprendre la dynamique des facteurs physiques influençant l'utilisation des plumes de confluence par les poissons, puisque leur répartition dépend souvent des conditions environnementales et de leurs limites physiologiques (Kearney et al., 2009). L'adaptation de la grille au terrain, plutôt qu'un modèle théorique généré à l'aide des SIG, a permis un suivi plus précis des températures. Contrairement aux suivis classiques, où un thermographe mesure à un seul point de la confluence, ce système de grilles fournit, en l'absence de TIR, des relevés détaillés du régime thermique sur l'ensemble de la plume.

En revanche, notre approche reste très théorique et nécessite davantage de travail et de précisions pour être pleinement validée et appliquée. Par ailleurs, un des obstacles rencontrés dans cette étude a été l'identification des tributaires froids et l'évaluation de leur effet sur la température de la rivière. L'accessibilité aux données géolocalisées des refuges thermiques a facilité la conceptualisation des grilles des plumes de confluence. Cependant, ces données ne sont pas toujours aisément disponibles. En effet, ces derniers sont généralement identifiés à l'aide des TIR, qui sont souvent difficiles d'accès en raison de leur coût élevé (Dugdale et al., 2013). De plus, le partage des localisations exactes des refuges thermiques demeure une donnée sensible en raison de leur rôle

écohydrologique, essentiel à la protection du saumon, notamment en période de conditions extrêmes.

En l'absence de RT pour identifier les tributaires froids, une campagne terrain aurait dû être planifiée pour recueillir des données concrètes. Le déploiement de thermographes sur les rivières à saumon aurait permis de suivre un réseau triangulé, avec des thermographes placés en amont, à la confluence et en aval, pour détecter les variations de température. En outre, une analyse de la couverture forestière par sous-bassins aurait pu être envisagée, en présumant que les tributaires bénéficiant d'une couverture forestière dense et d'un ombrage riverain ont de fortes probabilités d'être des tributaires froids (Rutherford et al., 1997; Ebersole et al., 2003; Grégoire et al., 2007; MDDEP et al., 2007; Bond et al., 2015; Tsai et al., 2017; Kalny et al., 2017; Garner et al., 2017; Dralle et al., 2018; Wang et al., 2020; AGRCQ, 2024).

Cependant, nos observations indiquent que la majorité des tributaires sont faiblement boisés et fortement exposés au rayonnement solaire. Cela suggère qu'au lieu d'apporter de l'eau froide, certains pourraient contribuer à une augmentation de la température du cours d'eau. Cette incertitude souligne la nécessité d'un suivi plus détaillé des températures par thermographes pour mieux évaluer leur rôle dans le régime thermique du bassin.

Il aurait également été pertinent d'avoir des débits-mètres à l'embouchure des tributaires pour évaluer précisément leur contribution en eau. Comme mentionné précédemment, un faible débit amplifie le réchauffement de l'eau, réduisant l'oxygène disponible et compliquant l'accès aux habitats de frai, ce qui menace directement la survie du saumon (Furois, 2016). Ainsi, connaître le débit aurait permis d'acquérir une meilleure compréhension du contexte de l'habitat du saumon, des variations de température et même du niveau de vulnérabilité de la rivière et des RT. Toutefois, les conditions hydrométéorologiques de cette saison d'été 2024 ne permettaient pas d'identifier ni de valider la présence effective de tous les tributaires ni de confirmer leur impact sur le régime thermique du cours d'eau.

Finalement, bien que l'indice d'humidité topographique (TWI - *Topographic Wetness Index*) soit utile, sa précision pour détecter les MH reste acceptable puisqu'il comporte une marge d'erreur à considérer (Varin, 2021). Les principaux défis liés à la cartographie des MH résident surtout dans

la disponibilité et l'accessibilité à des données bien interprétées et suffisamment précises, comme celles de Canards Illimités Canada ou du MELCCFP. Les méthodes de photo-interprétation, de télédétection et de calculs d'indices sont sujettes à des erreurs, non seulement en raison de la subjectivité de l'interprétation, mais aussi des limites des indices à différencier les divers types de MH et à intégrer certaines contraintes du territoire, comme la présence de ponceaux qui facilitent le drainage de l'eau sans provoquer d'accumulation d'eau visible (MFFP, 2020; MFFP, 2021; Varin, 2021).

4.2 RÉSULTATS DES FACTEURS GÉOMORPHOLOGIQUES

La température du cours d'eau en relation avec la pente a été étudiée dans d'autres contextes, bien qu'une analyse plus approfondie soit nécessaire pour mieux comprendre son influence en lien avec d'autres facteurs physiques du cours d'eau. En effet, parmi les résultats de l'étude d'O'Sullivan et al. (2019b), il est indiqué que la pente favorise un écoulement plus rapide de l'eau, ce qui réduit le temps disponible pour le réchauffement en lien avec la radiation solaire.

Toutefois, comme déjà mentionnée, la zone d'étude se situe dans un secteur de faible pente (classe A), ce qui rend le cours d'eau plus exposé aux rayons solaires en raison du ralentissement du débit. Ce contexte de faible pente met en évidence l'importance de l'échelle de l'étude, car si l'analyse avait été réalisée à l'échelle du bassin versant, les résultats de l'AMCp auraient probablement montré des valeurs globalement faibles sur l'ensemble de la zone d'étude. En d'autres mots, il n'y aurait pas de distinction au sein du segment que nous avons choisi. Cela aurait également pu entraîner des difficultés à identifier des zones de refroidissement dans la zone d'étude.

Ce constat souligne que l'échelle choisie influence directement la précision et la fiabilité des résultats. Bien que la méthodologie utilisée soit adaptable, elle peut induire des erreurs d'interprétation si les critères ne sont pas correctement ajustés à l'échelle appropriée. Cela met en évidence la nécessité de réaliser une analyse de sensibilité des paramètres, notamment pour évaluer l'impact de la pente sur les résultats de l'AMCp. Cet aspect est particulièrement important, car il illustre comment un facteur géomorphologique clé, tel que le gradient de pente, peut affecter la représentation spatiale et l'interprétation des phénomènes thermiques du cours d'eau.

4.3 RÉSULTATS DES FACTEURS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES

Dans le contexte géologique et hydrogéologique, bien que les données disponibles soient nombreuses, certaines marges d'erreur doivent être prises en compte, en particulier lors de l'interpolation des valeurs. Cette dernière repose sur des modèles spatiaux qui supposent une variation continue entre les points de mesure. Cependant, en raison de la distribution hétérogène des forages, certaines zones nécessitent des extrapolations incertaines, surtout en l'absence de données. Ce problème est d'autant plus prononcé dans les zones où les dépôts meubles sont épais, car cela entraîne une forte variabilité verticale, non captée par l'interpolation bidimensionnelle. Cette contrainte liée à l'interpolation s'applique particulièrement aux cartes isopaque (épaisseur des sédiments) (Figure 3-6), piézométrique (Figure 3-3) et de l'élévation du substrat rocheux (Figure 3-4) que nous avons créées.

Parmi les erreurs potentielles et les obstacles rencontrés lors du traitement des données des forages, certains sont liés, d'une part, aux mesures terrain qui comportaient des erreurs liées à la stratification des dépôts. D'autre part, des incohérences entre les unités de mesure utilisées (mètres versus pieds) ont pu introduire des écarts. Ces erreurs peuvent engendrer des écarts significatifs dans l'estimation de la profondeur des nappes phréatiques et du substrat rocheux, influençant directement les modèles d'écoulement souterrain. Par exemple, une mauvaise conversion entre pieds et mètres peut fausser les gradients hydrauliques, modifiant ainsi les prévisions de recharge et de résurgence d'eau souterraine. De plus, la distribution inégale des forages a affecté la précision des résultats d'interpolation, notamment pour la carte isopaque (épaisseur des sédiments) que nous avons réalisée. Ce problème se retrouve aussi dans les données de niveau d'eau, parfois incomplètes ou imprécises, car certains forages ne contenaient pas les informations nécessaires pour faire la carte piézométrique. Cependant, des limites sont soulignées, notamment par Grabs et al. (2009), qui pointent l'hypothèse selon laquelle les gradients des nappes phréatiques (les lignes équipotentiels) et de surface sont toujours identiques. Or, cette hypothèse ne prend pas en compte les variations géologiques et hydrogéologiques du terrain. Ainsi, dans les interpolations des valeurs des forages pour créer les cartes isopaque (épaisseur des sédiments), élévation du substrat rocheux et piézométrique, un certain niveau d'incertitude était inévitable.

Cet aspect de l'incertitude dans les données hydrogéologiques entraîne également des répercussions sur la compréhension des effets des eaux souterraines sur les cours d'eau. Il aurait été intéressant d'approfondir l'étude des eaux souterraines et des zones de recharge, notamment la profondeur des aquifères, car ces derniers influencent la température des cours d'eau. Briggs et al. (2018) montrent que l'infusion d'eau souterraine dans un cours d'eau peut abaisser sa température. Par exemple, une infusion de 25 % d'eau souterraine pourrait réduire la température de 0,8 °C à 1,4 °C dans différentes sections du cours d'eau (Kobayashi, 1985; Briggs, et al., 2018). Cela met en évidence que les aquifères profonds ont un plus grand potentiel pour créer des refuges thermiques pour les espèces d'eau froide.

L'étude d'O'Sullivan et al. (2019a) propose une méthode intéressante et peu coûteuse pour identifier des zones de résurgences d'eau souterraine à l'aide d'images satellites à haute résolution gratuites. Elle recommande notamment l'utilisation d'images de Google Earth Pro ou, idéalement, de celles des satellites WorldView-3 et WorldView-4, qui offrent une précision supérieure, mais sont très dispendieuses. Lors de notre tentative d'application, nous avons été confrontés à des limites liées à la disponibilité des images hivernales sur Google Earth Pro. Celles-ci étaient souvent incomplètes, trop anciennes ou constituées de mosaïques regroupant des images de différentes années, compromettant ainsi leur fiabilité. Quant aux images WorldView-3 et WorldView-4, leur coût les rendait inaccessibles dans le cadre de cette étude. Une alternative gratuite aurait pu être Sentinel-2, mais avec une résolution de 20 m x 20 m et une largeur de cours d'eau ne dépassant pas 60 m, il était presque impossible d'identifier les petites plumes de résurgence, voire le cours d'eau lui-même. Bien que cette méthode soit prometteuse, notamment dans un contexte de données ouvertes, elle reste difficile à appliquer en pratique.

Enfin, bien que nous ayons réinterprété les dépôts de surface, un défi important réside dans l'utilisation de la classification des dépôts meubles de la carte écoforestière (MRNF, 2017; 2024). Notamment, la catégorie des dépôts anthropiques couvre une grande partie de la zone d'étude, sans distinction précise des matériaux (ex. remblais, sols compactés, substrats anthropiques divers). Une amélioration possible consisterait à intégrer des relevés géotechniques ou à explorer des techniques de spectroscopie hyperspectral, afin de mieux discriminer ces dépôts et d'affiner l'analyse des processus géomorphologiques en jeu (ANNEXE A).

4.4 RÉSULTATS DES FACTEURS FORESTIERS

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI- *Normalized Difference Vegetation Index*) est couramment utilisé pour évaluer la réflectance de la chlorophylle afin d'estimer la santé de la couverture végétale. Toutefois, il présente certaines limites, notamment parce qu'il ne prend pas en compte ni la continuité de la canopée (c'est-à-dire l'étendue de la zone forestière) ni sa densité. Cela peut entraîner des valeurs faussement élevées, notamment dans les zones herbacées ou agricoles, où un NDVI élevé peut donner l'illusion d'une densité forestière plus importante qu'elle ne l'est en réalité. Malgré le fait que le NDVI permette d'identifier des espaces verts, cela ne garantit pas qu'ils correspondent à des zones à forte densité de canopée. C'est pourquoi il est essentiel de le compléter l'analyse spatiale avec l'indice de densité de la couverture forestière (FCD - *Forest Canopy Density*), qui permet de mieux appréhender la continuité et la densité de la canopée, facilitant ainsi l'identification des sites forestiers importants. De plus, il convient de souligner que l'interprétation de la « santé de la couverture forestière » à l'aide du NDVI doit être faite sous réserve. En effet, dans une perspective temporelle où les valeurs du NDVI sont comparées sur une période donnée afin d'évaluer l'évolution de la végétation, il est possible que celle-ci ne présente aucun changement, ni en termes de composition ni de structure.

L'indice FCD, bien que largement utilisé en forêt tropicale (Abdollahnejad et al., 2017; Rikimaru et al., 2002; Godinho et al., 2016; Falensky et al., 2020; Biradar et al., 2005; Loi et al., 2017), demeure peu exploité en milieu boréal. Aucun exemple d'application dans un contexte semblable au nôtre n'a été identifié, ce qui souligne la possibilité d'adaptations nécessaires pour optimiser son utilisation dans ces environnements. L'indice FCD est composé de trois indices complémentaires : AVI, qui évalue la santé de la végétation, BSI, qui caractérise la présence de sol nu, et SI, qui mesure l'ombrage généré par la canopée.

L'AVI a permis d'identifier plus précisément les zones où la canopée était en meilleure santé, offrant une sensibilité accrue aux variations de densité du couvert forestier par rapport au NDVI. Ce dernier tend à saturer dans les environnements très végétalisés, limitant sa capacité à distinguer des différences subtiles. L'AVI, en revanche, réduit ce phénomène de saturation et améliore l'estimation de la densité de la canopée, notamment dans les zones où la végétation est plus éparse ou hétérogène.

Le SI, quant à lui, a permis de localiser les zones d'ombrage créées par la canopée. Un niveau d'ombrage élevé indique une couverture forestière dense et haute, tandis que des arbres plus petits génèrent moins d'ombre, suggérant un couvert moins développé.

Le BSI a posé un défi particulier en raison de la diversité des indices de sol nu existants, souvent conçus pour des contextes forestiers spécifiques, comme les forêts tropicales ou les zones anthropisées. La sélection de l'indice le plus approprié a nécessité une approche ciblée, mettant l'accent sur l'impact des activités humaines. Cela a motivé l'inclusion de la bande bleue, bien que les bandes verte et rouge soient plus couramment utilisées pour le calcul des indices de sol nu. Dans ce cadre, nous avons opté pour une approche mettant l'accent sur l'affectation des sols liée aux activités humaines, ce qui a motivé l'inclusion de la bande bleue. Toutefois, cette décision, bien qu'adéquate pour notre étude, reste moins courante, les bandes verte et rouge étant fréquemment privilégiées dans le calcul de l'indice de sol nu. La combinaison de ces trois indices dans le calcul du FCD permet d'identifier avec précision les zones où la canopée est réellement dense, continue et mature, évitant ainsi les confusions avec des sites simplement végétalisés qui pourraient fausser l'évaluation de la composition forestière du bassin versant.

Une alternative au FCD aurait été l'*Enhanced Vegetation Index* (EVI), un indicateur de la couverture végétale similaire au NDVI, mais avec une sensibilité accrue dans les zones de forte densité végétale (Landsat Missions, 2023). Contrairement au NDVI, l'EVI corrige les interférences atmosphériques et le bruit de fond de la canopée grâce à des coefficients d'ajustement et à l'intégration de la bande bleue. Ce calcul sous forme de ratio entre les valeurs du rouge et du proche infrarouge permet de réduire la saturation et d'améliorer la précision des mesures dans les milieux boisés denses (Landsat Missions, 2023). En atténuant ces interférences, l'EVI améliore la détection des variations de la canopée et l'estimation des paramètres biophysiques, en particulier dans les régions de forte biomasse (Gao et al., 2000 ; Huete et al., 2002). Cependant, bien que l'EVI soit un bon indicateur de la biomasse, une valeur élevée n'indique pas nécessairement une plus grande superficie végétalisée, mais plutôt une densité accrue. Il est donc crucial d'interpréter ses variations avec discernement (Mizen et al., 2024). En dépit de ces avantages, le FCD propose une approche plus détaillée en analysant la densité du couvert forestier à l'aide de plusieurs indices. Il prend en compte des facteurs tels que les sols nus, l'ombrage de la canopée et la santé de la végétation,

permettant ainsi une meilleure compréhension de la continuité du couvert forestier. Cette approche permet d'éviter la confusion entre des zones dégagées ou peu végétalisées et celles densément couvertes.

En ce qui concerne le choix des images, nous avons également opté pour celles de Sentinel-2 qui offraient la précision la plus élevée parmi les options gratuites. Cependant, cette résolution peut ne pas être suffisante pour des travaux portant sur les cours d'eau, où il est difficile de les identifier clairement. Étant donné que notre étude porte sur les cours d'eau et la végétation riveraine, avec une bande riveraine variant de 3 à 60 mètres, notamment pour les rivières à saumon, les images Sentinel-2, bien qu'utiles à l'échelle du bassin versant, ont une résolution trop grosse pour ces zones de petite taille. Comme mentionné précédemment, nous avons envisagé des alternatives d'imagerie telles que WorldView-3 et WorldView-4, proposées par Sullivan (2019), pour leur précision remarquable. Dans le cas de rivières très larges, comme la rivière Natashquan, l'imagerie Landsat-8/9 peut être envisagée comme alternative, grâce à sa résolution de 30 m et à son historique étendu, permettant ainsi des comparaisons temporelles sur une période plus longue.

Nos résultats sur l'ombrage riverain peuvent présenter des incohérences dans les mesures temporelles. Bien que les plages horaires soient précisément définies, le traitement simplifié des variations thermiques (1 °C par heure) pourrait ne pas refléter la complexité des interactions thermiques. En effet, il serait réducteur de considérer qu'un grand nombre d'heures d'ombrage garantit automatiquement une température plus basse de l'eau. Comme mentionné dans les chapitres précédents, l'efficacité de l'ombrage sur la régulation thermique est particulièrement significative en périodes d'extrêmes climatiques, mais pas nécessairement pendant des périodes plus stables. De plus, cette approche, bien qu'offrant une analyse spatiale détaillée, présente certaines limites. Elle ne prend pas en compte les ombrages dynamiques causés par des éléments transitoires, comme les nuages, et ne considère pas les effets cumulés de l'ombrage sur les températures minimales nocturnes, ce qui pourrait influencer les résultats, notamment en période de canicule.

4.5 RÉSULTATS DES FACTEURS ATMOSPHÉRIQUES

Tout comme nous, O'Sullivan et al. (2019b) ont utilisé l'outil Rayonnement solaire zonal (*Area Solar Radiation*) pour mesurer la radiation solaire sur le bassin versant afin de comprendre les effets sur le régime thermique du cours d'eau. Ils soulignent l'importance de cette donnée dans ce contexte. Toutefois, l'application de cette méthode présente certaines limites, notamment en raison de l'utilisation du MNT dérivé du LiDAR. En effet, comme expliqué dans le Chapitre 2, le LiDAR rencontre des difficultés pour capturer les surfaces d'eau, car les retours sur l'eau peuvent être nuls, comme le rapporte Yan (2023). Ces difficultés, combinées à des anomalies dans le MNT, génèrent une incertitude qui affecte la précision des résultats, puisque des trous ont été observés dans le MNT, particulièrement le long du cours d'eau, rendant la couche de radiation solaire moins fiable dans ces zones. Néanmoins, cette couche a donné des résultats satisfaisants dans les zones du bassin où ces erreurs étaient absentes. Cela met en évidence que, bien que cette méthode offre certains avantages, elle pourrait être améliorée par l'intégration d'approches complémentaires, notamment en recourant à des outils supplémentaires, tels que des capteurs thermiques infrarouge, ou des sources de données, comme des mesures sur le terrain ou d'autres techniques géomatiques. L'ajout de facteurs physiques connexes pourrait également contribuer à améliorer l'exactitude des résultats, tout en restant dans le cadre d'une approche basée sur des données ouvertes (Constantz, 1998; Soulsby et al., 2006; Winter et al., 1998; Dugdale et al., 2015; Tague et al., 2004; Detty et al., 2010; O'Sullivan, et al., 2019b).

4.6 ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES

Pour approfondir l'étude et améliorer l'analyse, il aurait été pertinent de valider la méthodologie à l'aide de TIR, ce qui aurait permis d'évaluer concrètement son efficacité. Cependant, leur accès et leur disponibilité ont constitué un frein. De plus, il aurait été intéressant d'intégrer davantage de facteurs complexes, tels que les éléments hydromorphologiques, notamment le débit, la profondeur et la largeur du cours d'eau. Ces facteurs influencent directement l'ampleur des effets des variables physiques identifiées et auraient permis d'affiner l'analyse des régimes thermiques du cours d'eau. En effet, des recherches ont établi un lien entre la fréquence des méandres et la régulation thermique, en particulier pour la réduction de la température en été et l'augmentation en hiver, en favorisant

les échanges hyporhéiques (Dugdale et al., 2015; Wondzell et Gooseff, 2013; O'Sullivan et al., 2019b). Cela pourrait être dû à une faible variation de la sinuosité dans les unités physiographiques étudiées, influencée par la composition géologique locale (Langbein et Leopold, 1966; O'Sullivan et al., 2019b). En complément, l'inclusion de la température de l'air aurait pu enrichir l'analyse, comme mentionné précédemment, étant donné son impact sur la température des cours d'eau. Cependant, son intégration dans un modèle SIG pose des défis, car une couche spatiale unique de température de l'air couvrant l'ensemble du bassin ne permettrait pas de capturer les variations locales avec une résolution suffisante. Une approche plus pertinente aurait été l'utilisation de thermographes mesurant simultanément la température de l'air et de l'eau en plusieurs points stratégiques le long du cours d'eau.

Comme mentionné dans le Chapitre 1, il aurait également été pertinent d'inclure la température de l'air dans notre analyse, car elle sert de proxy pour prédire la température de l'eau. En effet, comme mentionné précédemment, une augmentation de 1 degré de la température de l'air entraîne un réchauffement de l'eau de 0,6 à 0,8 degré (Morrill et al., 2001; Cluis, 1972; L'Heureux, 2002). Cependant, bien que la température de l'air soit un proxy utile, elle ne permet pas de rendre compte de l'hétérogénéité des températures des rivières, qui réagissent plus rapidement aux fluctuations de l'air en raison de leur petite taille (Isaak et al., 2019; O'Sullivan et al., 2019b). Toutefois, il est important de souligner que la température de l'air n'est pas toujours un bon proxy pour modéliser la température des rivières. En effet, bien que de nombreuses études aient établi une corrélation entre ces deux variables (Arnell, 2002; Koycheva, 2003; Koirala et al., 2014; Isaak et al., 2019; O'Sullivan et al., 2019b; Morrill et al., 2001; Cluis, 1972; L'Heureux, 2002), elle ne capture pas correctement la variabilité thermique des rivières à des échelles fines (Isaak et al., 2009; Kurylyk et al., 2013; O'Sullivan et al., 2019b). De plus, elle ne tient pas compte des processus d'advection souterraine, qui jouent un rôle clé dans la régulation thermique des cours d'eau, notamment en période estivale (Briggs et al., 2017; Johnson et al., 2017; O'Sullivan et al., 2019b). Cependant, grâce à la disponibilité des données géolocalisées des refuges thermiques, nous avons pu renforcer la validation de notre méthode.

4.7 RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE (AMCP)

De manière générale, les résultats obtenus sont satisfaisants et offrent une bonne capacité d'interprétation. Bien qu'ils ne permettent pas de prédire directement la température du cours d'eau, ils offrent un cadre méthodologique robuste pour identifier des secteurs présentant un fort potentiel de refroidissement ou de réchauffement. Ces zones, plus sensibles aux variations thermiques, constituent des cibles stratégiques pour la gestion et la conservation des milieux aquatiques, notamment en lien avec la protection des habitats du saumon et des écosystèmes riverains et forestiers. L'utilisation de l'AMCp permet ainsi d'orienter la planification des actions de surveillance, en aidant les gestionnaires de l'eau et les décideurs à identifier des sites particulièrement vulnérables aux perturbations environnementales et anthropiques. Ces informations facilitent également le ciblage optimal du déploiement des thermographes pour assurer un suivi plus précis des températures des rivières, ainsi que l'identification des zones prioritaires pour des interventions de conservation ou de restauration écologique.

L'un des principaux atouts de cette approche est qu'elle met en évidence les interactions complexes entre les facteurs physiques influençant la température de l'eau, permettant ainsi une analyse plus intégrée et spatialisée du régime thermique des cours d'eau. Toutefois, bien que cette approche soit rigoureuse, l'AMCp comporte une certaine subjectivité, notamment en ce qui concerne la pondération des critères. En effet, le poids attribué aux différents facteurs repose sur une réflexion méthodologique structurée :

- La disponibilité et la qualité des données,
- La représentation spatiale des phénomènes,
- Le niveau de précision et l'échelle des données utilisées.

Un des défis majeurs a été l'harmonisation des données issues de différentes échelles spatiales et temporelles, ce qui peut introduire des marges d'erreur dans l'analyse finale. Bien que nous ayons cherché à maintenir une cohérence méthodologique, certaines incertitudes demeurent, notamment en raison des hypothèses sous-jacentes aux modèles d'interpolation et des limites inhérentes aux jeux de données utilisés. Il faut également prendre en compte les valeurs nulles et les valeurs zéro dans le résultat, ce qui a initialement posé problème en empêchant une représentation adéquate du résultat spatial sur le cours d'eau. En intégrant les valeurs nulles dans la formule finale, le résultat

a pu être correctement représenté sur le cours d'eau. Enfin, la normalisation des valeurs pour les rendre comparables entraîne une certaine perte de précision des données.

Néanmoins, les observations terrain ont validé la robustesse du modèle. Les zones identifiées comme plus découvertes et davantage exposées correspondaient effectivement aux secteurs les plus vulnérables aux effets environnementaux et anthropiques. Cette concordance entre modélisation et réalité terrain confirme l'efficacité de l'AMCp comme outil d'aide à la décision dans une optique de gestion et de protection des cours d'eau.

Il aurait été intéressant, si le temps l'avait permis, de collecter des mesures de température de l'eau et de l'air afin d'établir un lien plus précis entre ces variables et ainsi mieux valider nos résultats. De même, la possibilité de visiter chaque zone identifiée aurait permis d'affiner les observations, d'enrichir l'interprétation des données et d'ajuster la pondération des paramètres. Ces démarches complémentaires auraient contribué à renforcer la fiabilité et la pertinence des conclusions.

CONCLUSION

La méthodologie développée dans cette étude contribue à la protection des rivières à saumon et de leurs habitats en offrant une caractérisation détaillée des cours d'eau et de leurs bassins versants. En intégrant une Analyse Multi-Critères pondérée (AMCp), elle permet non seulement d'examiner les indicateurs individuels, mais aussi de les croiser pour mieux comprendre les interactions entre facteurs environnementaux. Cette approche enrichit ainsi les connaissances sur ces écosystèmes et appuie les stratégies de gestion, de conservation et de restauration menées par les gestionnaires de l'eau et les instances gouvernementales. Malgré certaines limites liées à la disponibilité et à la distribution spatiale des données, cette méthodologie permet d'analyser chaque facteur individuellement pour brosser un portrait détaillé du bassin, tout en offrant une vision de l'interconnectivité de ces facteurs grâce aux résultats de l'AMCp à l'échelle du bassin versant. Les résultats obtenus permettent ainsi d'identifier efficacement des zones potentiellement sujettes à un refroidissement ou à un réchauffement, qui peuvent être interprétées comme des secteurs sensibles aux pressions anthropiques ou aux changements climatiques, nécessitant des interventions de protection ou de restauration, respectivement.

Cette approche repose sur une vision interdisciplinaire et multiscalaire, intégrant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour analyser les principaux facteurs influençant la température de l'eau : hydrographiques, hydrogéologiques, géologiques, géomorphologiques, forestiers et atmosphériques. Plutôt que d'adopter une approche purement statistique, cette méthodologie mise sur une représentation spatiale des interactions entre ces éléments, permettant ainsi une lecture plus fine des dynamiques thermiques et des zones de refuge thermique. Elle se distingue ainsi des méthodes traditionnelles et offre un outil plus adapté aux besoins de terrain des gestionnaires des cours d'eau. Contrairement aux méthodes traditionnelles, souvent centrées sur une analyse statistique, cette méthodologie offre une compréhension plus précise des dynamiques et du contexte géographique dans lequel s'inscrivent les refuges thermiques, en évaluant leur susceptibilité potentielle face aux pressions environnementales et anthropiques. Elle oriente ainsi les efforts des acteurs locaux, en maximisant leur efficacité sur le terrain, notamment pour le déploiement des thermographes et le suivi des températures des rivières, un enjeu majeur pour les gestionnaires de bassins versants. De plus, la flexibilité de notre méthode constitue un atout majeur,

particulièrement pour l'approche « rivière par rivière » préconisée pour les rivières à saumon (FQSA, 2022). Elle s'adapte aux spécificités du bassin versant, et peut également être ajustée en fonction des objectifs visés et de l'échelle de l'analyse choisie. En cas de données manquantes, certains indicateurs ou facteurs peuvent être exclus, les pondérations étant ajustées proportionnellement pour garantir des résultats pertinents.

Les obstacles rencontrés dans le traitement des données, notamment en ce qui concerne les facteurs hydrogéologiques et géologiques, se sont particulièrement manifestés lors de la production des cartes piézométriques et du substrat rocheux en utilisant les données du SIH. En effet, l'interpolation des données de forage a révélé plusieurs problèmes, notamment des erreurs dans les données initiales et une distribution inégale des points de mesure sur le territoire. Cette répartition hétérogène a créé de larges zones non documentées, affectant ainsi la qualité des résultats d'interpolation. Ces difficultés soulignent l'importance de poursuivre les efforts d'acquisition de données sur les eaux souterraines et les forages, notamment dans le cadre des projets PACES à travers le Québec. Il est également important d'étendre les acquisitions de données à des territoires plus éloignés à vers la tête du bassin versant, au-delà des zones urbaines. En effet, ces informations sont essentielles, non seulement pour la gestion des ressources en eau souterraine destinées à l'usage humain, mais aussi pour une meilleure compréhension des phénomènes liés à l'environnement naturel et à la biodiversité. De plus, l'accès à l'imagerie à haute résolution, ainsi qu'à d'autres types de données d'imagerie, comme les images thermiques, reste particulièrement difficile. Bien que l'analyse soit limitée par la disponibilité des données, qu'elles soient partielles, inexistantes ou inégalement représentées sur le territoire, ces contraintes n'altèrent pas l'utilité de la méthode. L'analyse peut également être simplifiée en excluant certains facteurs pour évaluer l'ensemble du réseau hydrographique. Malgré ces limitations, la méthode se distingue également par sa facilité de reproductibilité et son accessibilité, puisqu'elle repose uniquement sur des données ouvertes, pouvant être traitées tant sur ArcGIS Pro que sur d'autres logiciels SIG.

L'un des atouts majeurs de cette méthodologie réside dans son accessibilité, car elle repose exclusivement sur l'utilisation de données ouvertes et gratuites. En mobilisant des sources comme les images satellitaires Sentinel-2 (ESA), les données topographiques LiDAR mises à disposition par les gouvernements, les bases de données hydrogéologiques ouvertes et les plateformes SIG en

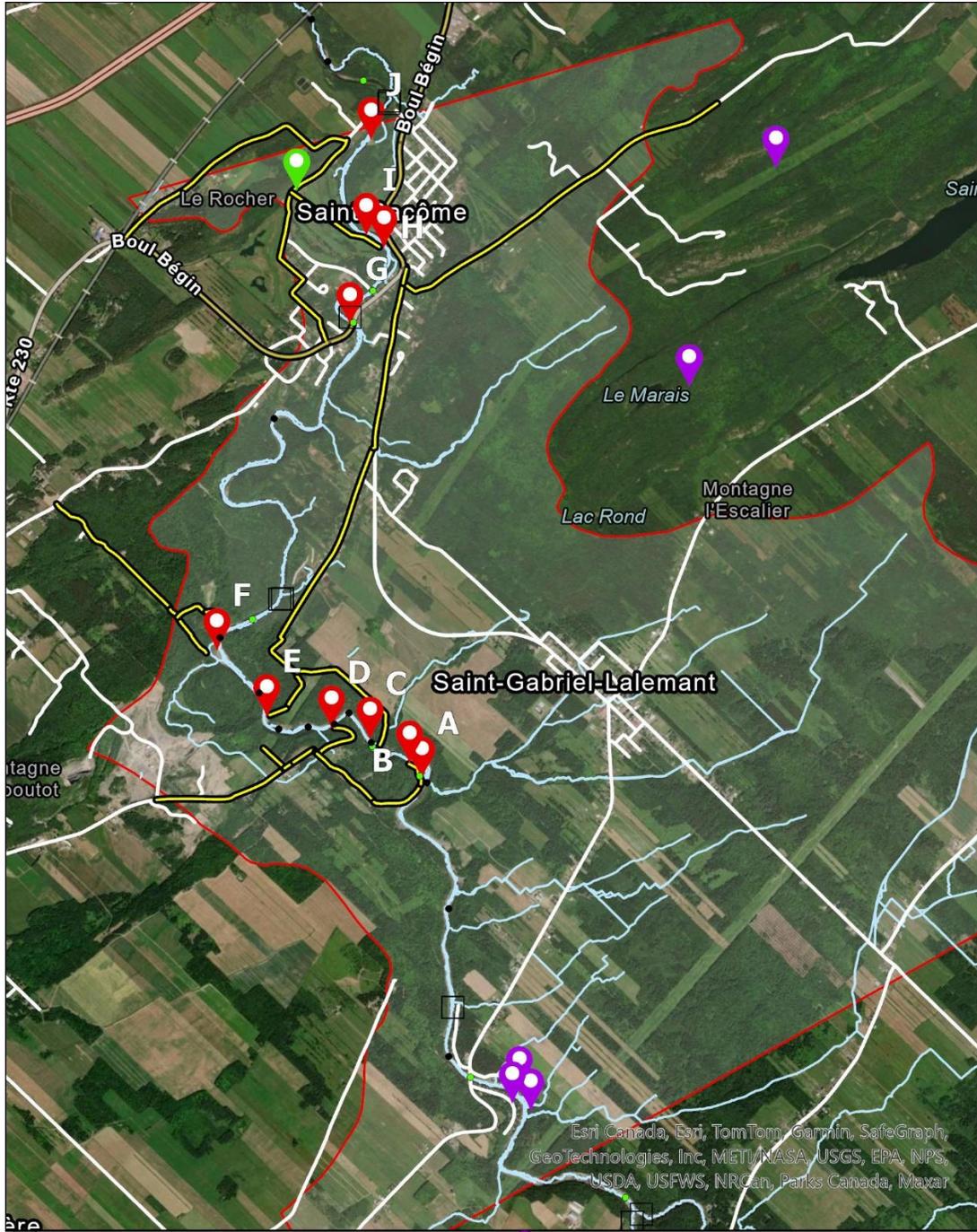
accès libre comme QGIS et PostgreSQL/PostGIS, elle permet une reproductibilité sans contrainte financière. Cette approche démocratise l'accès à des outils avancés de modélisation spatiale et garantit que les gestionnaires locaux, les organismes de conservation et les chercheurs puissent l'adopter sans dépendre de solutions coûteuses. Son intégration aux infrastructures de données ouvertes du Québec et du Canada permettrait d'en élargir la portée et d'en faire une référence pour la gestion des milieux aquatiques à différentes échelles. Les objectifs fixés ont été atteints, et la méthode s'est avérée fonctionnelle dans le cadre de cette preuve de concept. Avec des données supplémentaires, comme des images thermiques (TIR) pour une validation plus robuste, elle pourrait être encore améliorée. En conclusion, cette méthode permet notamment :

1. D'identifier des zones potentielles de refroidissement et de réchauffement.
2. D'optimiser le déploiement stratégique des thermographes pour le suivi des températures.
3. D'identifier les zones à conserver ou à restaurer.
4. De localiser les refuges thermiques potentiellement plus vulnérables.

Ainsi, cette approche offre des pistes concrètes pour une gestion plus précise des régimes thermiques des rivières. De plus, dans le contexte actuel, le gouvernement québécois s'est engagé à atteindre 30 % de conservation du territoire d'ici 2030 et a lancé une initiative visant à promouvoir la protection de la biodiversité. Notre méthode permet d'identifier des secteurs clés, tels que les zones de refroidissement à protéger et les zones de réchauffement à restaurer, afin d'assurer la stabilité des refuges thermiques et la santé des cours d'eau, essentiels pour l'habitat du saumon. Ces résultats et cette méthode pourraient ainsi contribuer à l'identification d'aires à protéger dans le cadre de cette initiative gouvernementale (MELCCFP, 2024b).

La méthode pourra continuer à se développer et offre une base solide pour le projet « Suivi des températures des rivières à saumon 2024-2026 » de la FQSA. Avec plus de ressources, elle pourrait évoluer vers une approche encore plus complète et performante. À terme, cette approche pourrait être intégrée dans un cadre de gestion adaptative à l'échelle provinciale, fournissant un outil robuste pour le suivi des températures et la conservation des habitats aquatiques. Avec davantage de ressources et d'améliorations méthodologiques, elle a le potentiel d'être déployée plus largement, contribuant ainsi aux efforts de conservation des milieux aquatiques et à la résilience des rivières face aux changements climatiques.

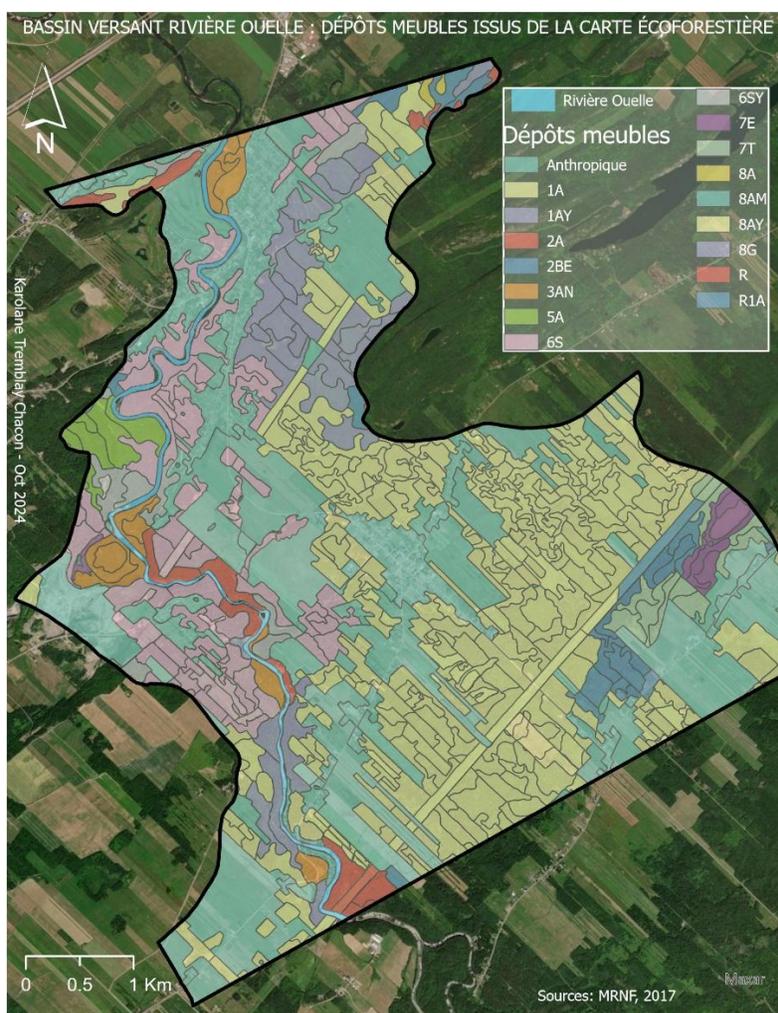
ANNEXE A
CARTE TERRAIN



ANNEXE B

CARTE DES DÉPÔTS MEUBLES – CARTE ÉCOFORESTIÈRE DU MRNF (2017)

La carte des dépôts meubles, tirée de la carte écoforestière du MRNF (2017), illustre la répartition des différentes classes de dépôts dans la zone d'étude. Ces classes incluent :: anthropiques, dépôts glaciaires (1A et 1AY), dépôts fluvioglaciaires (2A et 2BE), dépôts fluviatiles (3an), dépôts marins (5a), dépôts littoraux marins (6s et 6sy), dépôts organiques (7E et 7t), dépôts de pentes et d'altérations (8A, 8AM, 8AY et 8G), ainsi que roches (R et R1). (MRNF, 2024). Cependant, cette classification a des limites, notamment en ce qui concerne les dépôts anthropiques, qui couvrent une grande partie de la zone d'étude. Bien que la carte soit utile, elle ne donne pas toujours assez de détails sur la composition des dépôts, ce qui peut entraîner des erreurs d'interprétation.



RÉFÉRENCES

- Abdollahnejad, A., Panagiotidis, D., Surový, P. (2017). Forest canopy density assessment using different approaches – Review, *Journal of forest science*, [En ligne]. (<https://jfs.agriculturejournals.cz/pdfs/jfs/2017/03/01.pdf>). Page consultée le 30 août 2024.
- Akike, S., Samanta, S. (2005). Land Use/Land Cover and Forest Canopy Density Monitoring of Wafi-Golpu Project Area, Papua New Guinea, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, [En ligne]. (<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=69399>). Page consultée le 11 novembre 2024.
- Alexander, M.D., Caissie, D. (2003). Variability and Comparison of Hyporheic Water Temperatures and Seepage Fluxes in a Small Atlantic Salmon Stream, *Groundwater*, [En ligne]. (<https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02570.x>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- April, J., Bujold, V., Cauchon, V., Doucet-Caron, J., Gagnon, K., Guérard, M., Le Breton, S., Nadeau, V., Plourde-Lavoie, P. et Bujold, J-N. (2023). *Information sur le saumon atlantique (Salmo salar) au Québec pour la préparation du deuxième rapport de situation du Comité sur la situation des espèces en péril au Canada* [En ligne]. Ministère des Pêches et des Océans Canada. (MPO). (<https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41117517.pdf>)
- Aschan-Leygonie, C., Cuntly, C., Davoine Cursus, P-A. (2019). Les systèmes d’information géographique : Chapitre 6. Aperçu de l’analyse spatiale avec les SIG, *Armand Colin*. [En ligne]. (<https://shs.cairn.info/introduction-aux-systemes-d-information-geographiq--9782200617189-page-222?lang=fr&tab=premieres-lignes>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Association des gestionnaires régionaux des cours d’eau du Québec. (AGRCQ) (2024) (Page consultée le 25 août 2024). *Guide sur la gestion des cours d’eau du Québec : Chapitre 4 : Fonctions écologiques des cours d’eau et de leurs bandes riveraines; aspect écologique et apport de la bande riveraine à la gestion des cours d’eau*, [En ligne]. (<https://agrcq.ca/guide-gestion-cours-eau/>).
- Azizi, Z., Najafi, A., Sohrabi, H. (2008). Forest canopy density estimating, using satellite images, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/263901692_FOREST_CANOPY_DENSITY_ESTIMATING_USING_SATELLITE_IMAGES?channel=doi&linkId=5436e0aa0cf2dc341db4c445&showFulltext=true). Page consultée le 30 août 2024.
- Baril, R. Rochefort, B. (1965). *Étude pédologique du comté de Kamouraska*. Québec : Station de recherche scientifique du ministère de l’Agriculture du Canada, en collaboration avec la Faculté d’agriculture de l’Université Laval et le ministère de l’Agriculture de la Province de Québec. 116 pages.

- Bélanger, C. (1993). Étude géomorphologique des basses terres sur la côte sud de l'estuaire laurentien. Thèse de doctorat, Québec: Université Laval, Département de géographie.
- Bélorgey, P., Van Laethem, N. (2017). La méga boîte à outils du Manager leader : Chapitre V : Efficience managériale, *Dunod*, [En ligne]. ([https://www.e-marketing.fr/Thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/La-matrice-de-decision-multicritere-326121.htm#:~:text=L'analyse%20multicrit%C3%A8re%20permet%20d,son%20importance%20\(poids%20relatif\)](https://www.e-marketing.fr/Thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/La-matrice-de-decision-multicritere-326121.htm#:~:text=L'analyse%20multicrit%C3%A8re%20permet%20d,son%20importance%20(poids%20relatif).)). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Bera, B., Saha, S., & Bhattacharjee, S. (2020). Estimation of forest canopy cover and forest fragmentation mapping using Landsat satellite data of Silabati River Basin (India), *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, [En ligne]. (<https://doi.org/10.1007/s42489-020-00060-1>). Page consultée le 8 septembre 2024.
- Bergeron, N.E., Gignac, C., Benacchio, V., Devaux, P. (2020) *Caractérisation du profil en long de la température de l'eau et des refuges thermiques estivaux potentiels sur les rivières Dartmouth, York et Saint-Jean. Rapport thématique no. 2.*, Rapport de recherche. Québec : Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Eau Terre et Environnement, 46 pages.
- Berthiaume, P., Carle-Pruneau, E., Ouellet, C., Morrissette-Boileau, C., 2022. *Rapport synthèse de la caractérisation des refuges thermiques du saumon atlantique le long de la rivière Jacques-Cartier à l'été 2020 et 2021*. Bureau du Nionwentsio, Conseil de la Nation huronne-wendat, Wendake, 29 pages.
- Bérubé, J., Boivin, M. (2021). Étude hydrogéomorphologique d'un cours d'eau influencé par des barages de castor (*Castor canadensis*) et analyses des contraintes migratoires pour le saumon atlantique (*Salmo salar*) dans la rivière Ouelle, Rapport de recherche présenté à l'Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-duLoup (OBAKIR). Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée. LERGAUQAC, [En ligne]. (<https://constellation.uqac.ca/id/eprint/6752/>). Page consultée le 15 novembre 2024.
- Beschta, R.L., Bilby, R.E., Brown, G.W., Holtby, L.B., Hofstra, T.D. (1987). Stream temperature and aquatic habitat, *Streamside Management: Forestry and Fishery Interactions*, [En ligne]. (https://www.fs.usda.gov/rm/boise/AWAE/labs/awae_flagstaff/Hot_Topics/riphreatbib/beschta_etal_streamtempaquahab.pdf). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Journal*, [En ligne]. (<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667909491834>) Page consultée le 29 décembre 2024.
- Bibly, R., R. (1984). Characteristics and frequency of cool-water areas in western Washington stream, *Journal of Freshwater Ecology*, [En ligne]. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:A1984TZ34500009>) Page consultée le 28 décembre 2024.
- Bilir, T. E., Fung, I., Dawson, T. E. (2021). Slope-Aspect induced climate differences influence how water is exchanged between the land and atmosphere, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*,

- [En ligne]. (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020JG006027>). Page consultée 29 août 2024.
- Biradar, C., Raju, P.L.N., Saran, S., Roy, P.S. (2005). Forest Canopy Density Stratification: How relevant is Biophysical Spectral Response Modelling Approach?, *Geocarto International*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/233077681_Forest_Canopy_Density_Stratification_How_Relevant_is_Biophysical_Spectral_Response_Modelling_Approach). Page consultée le 11 novembre 2024.
- Bond, R. M., Stubblefield, A. P., Van Kirk, R. W. (2015). Sensitivity of summer stream temperatures to climate variability and riparian reforestation strategies, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, [En ligne]. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815000865?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b7f6b4f697d4bbf). Page consultée le 25 août 2024.
- Bourque, P-A. (2010). *Planète Terre*, [En ligne], Québec : Université Laval, (http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html). Page consultée le 17 novembre 2024.
- Briggs, M.A., Goodling, P., Johnson, Z.C., Rogers, K.M., Hitt, N.P., Fair, J.B., Snyder, C.D. (2022). Bedrock depth influences spatial patterns of summer baseflow, temperature and flow disconnection for mountainous headwater streams, *Hydrology and Earth System Sciences*, [En ligne]. (<https://hess.copernicus.org/articles/26/3989/2022/>). Page consultée le 31 décembre 2024.
- Briggs, M.A., Lane, J.W., Snyder, C.D., White, E.A., Johnson, Z.C., Nelms, D.L., Hitt, N.P. (2018). Shallow bedrock limits groundwater seepage-based headwater climate refugia, *Limnologica*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0075951117300592#bib0210>). Page consultée le 31 décembre 2024.
- Brooks, R.T., Kyker-Snowman, T.D. (2009). Forest-floor temperatures and soil moisture across riparian zones on first- to third- order headwater streams in southern New England, USA, *Forest Ecology and Management*, [En ligne]. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112709005581?casa_token=X8cycsoG2KMAAAA:iVInujfrpYhVr3neymk2IXK4epyzSErchzAk6h0qU4qEuZ3J6g85WXquE_FqJwKT2G1pG5I2HK9b). Page consultée le 18 juillet 2024.
- Brown, G.W. (1970). Predicting the effect of clearcutting on stream temperature, *Journal of Soil and Water Conservation*, [En ligne]. (<https://alsea.library.oregonstate.edu/node/17381>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Brown, G. W., Krygier, J.T. (1970). Effects of clear-cutting on stream temperature, *Water Resources Research*, [En ligne]. (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR006i004p01133>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Budd, W.W., P. L. Cohen, P. R. Saunders et F. R. Steiner (1987). *Stream Corridor Management in the Pacific Northwest: Determination of Stream Corridor Widths*, *Environmental Management*, [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01880157>). Page consultée le 30 août 2024.

- Buffin-Bélanger, T., Chaillou, G., Cloutier, C-A., Touchette, M., Héту, B., McCormack, R. (2015). *Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL)*, Rapport final, Université du Québec à Rimouski, [En ligne]. (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/PACES/rapports-projets/BasStLaurent/BSL-scientif-UQAR-201503.pdf>). Page consultée le 2 mai 2024.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: a review, *Freshwater Biology*, [En ligne]. (https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfi/x/exhibits/docs/Stockton/part2rebuttal/stkn_64.pdf). Page consultée le 26 août 2024.
- Caissie, D., Satish, M. G., El-Jabi, N. (2007). Predicting water temperatures using a deterministic model: Application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada), *Freshwater Biology*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169407000169?via%3Dihub>). Page consultée le 29 décembre 2024.
- Canada. Environnement et Ressources Naturelles (2024). *Rapport de données quotidiennes*, [En ligne]. Canada. (https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html). Page consultée le 27 décembre 2024.
- Canada. Gouvernement du Canada. (2013). *Agriculture et Agroalimentaire Canada: Base nationale de donnée sur les sols (BNDS) : Table des définitions du relief : Classe de pente de relief*, [En ligne]. Canada. (https://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/slc/v3.2/ldt/lf_slope.html). Page consultée le 5 janvier 2025.
- Canada. Ministère des Pêches et des Océans Canada. (MPO) (2009). *Cycle vital du saumon de l'Atlantique*, [En ligne]. Canada. (<https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/40729606.pdf>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Canada. Ministère des Pêches et des Océans Canada. (MPO) (2009). *Politique du Canada pour la conservation du saumon atlantique sauvage*, [En ligne]. Canada. (<https://www.dfo-mpo.gc.ca/reports-rapports/regs/wasp-pss/wasp-psas-2009-fra.htm>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Canada. Ministère des Pêches et des Océans Canada. (MPO) (2023). *Information sur le saumon atlantique (Salmo salar) au Québec pour la préparation de deuxième rapport de situation du Comité sur la situation des espèces en péril au Canada* [En ligne]. Canada. (https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/mpo-dfo/fs70-5/Fs70-5-2023-008-fra.pdf). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Canada. Parcs Canada (2022). *Rétablissement du saumon dans les parcs de l'Atlantique* [En ligne]. Canada. (<https://parcs.canada.ca/nature/science/especes-species/saumon-salmon/decouverte-about>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Castelle, A. J., A. W. Johnson, et C. Conolly (1994). Wetland and Stream Buffer Requirement in Forest Operations: A Review, *Journal of Environmental Quality*, [En ligne].

(<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq1994.00472425002300050004x>). Page consultée le 30 août 2024.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). (2015). (Page consultée le 23 juin 2024.). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. [En ligne]. (https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/atlas/Atlas_hydroclimatique_2015.pdf)

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). (2024). (Page consultée le 26 décembre 2024). *Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques : Station 022704 Ouelle*. [En ligne]. (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=022704&Zone=&Secteur=null#Fiche>)

Chanket, U., Mongkolsawat, C. (2019). Evaluation of Forest Canopy Density and Forest Fragmentation Using Landsat Data in Phu Khieo Wildfire Sanctuary, Thailand, *International Journal of Geoinformatics*, [En ligne]. (<https://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/1855>). Page consultée le 20 novembre 2024.

Chitroub, S. (2004). Analyse en composantes principales d'Images optiques de télédétection : Approche neuronale. Algérie : USTHB, Département de Télécommunication, Faculté d'Électronique et d'Informatique. [En ligne]. (<https://www.cari-info.org/actes-2004/3-Chitroub.pdf>). Page consultée le 27 décembre 2024.

Cluis, D. (1972). *Relation entre la température de l'eau d'une rivière et la température ambiante*. Québec : INRS-Eau, Rapport de recherche. [En ligne]. (<https://espace.inrs.ca/id/eprint/753/1/R000003.pdf>). Page consultée le 26 décembre 2024.

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2006a) (Page consultée le 15 décembre 2023). *Assessment and Update Status Report on the Atlantic Salmon *Salmo salar* Inner Bay of Fundy populations in Canada*, [En ligne]. (https://www.sararegistry.gc.ca/virtual_sara/files/cosewic/sr_atlantic_salmon_inner_bay_e.pdf).

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2006b) (Page consultée le 15 décembre 2023). *Assessment and Status Report on the Atlantic Salmon *Salmos alar* – Lake Ontario population in Canada*, [En ligne]. (https://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/virtual_sara/files/cosewic/sr_atlantic_salmon_lake_ont_e.pdf)

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2011) (Page consultée le 06 juillet 2023). *Rapport annuel du COSEPAC*, [En ligne]. (https://wildlife-species.az.ec.gc.ca/species-risk-registry/virtual_sara/files/cosewic/CESCC_2010_2011_fra.pdf).

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (Page consultée le 16 novembre 2024). *Saumon atlantique (population de l'intérieur du Saint-Laurent – UD10)* [En ligne]. (<https://www.dfo-mpo.gc.ca/species-especes/profiles-profil/salmon-saumon-DU10-fra.html>).

- Constantz, J. (1998). Interaction between stream temperature, streamflow, and groundwater exchanges in alpine streams, *Water Resources Research*, [En ligne]. (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98WR00998>). Page consultée le 30 août 2024.
- Corey, E.M., Linnansaari, T., O’Sullivan, A.M., Curry, R.A., Cunjak, R.A. (2023). Quantifying Movement Patterns of Wild Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*) in Relation to High Water Temperature and Proximity to Thermal Refuges, Thèse de doctorat, Fredericton: University of New Brunswick.
- D’Anglejan, B. (1981). Évolution post-glaciaire et sédiments récents de la plate-forme infra-littorale, baie de Sainte-Anne, estuaire du Saint-Laurent, Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, [En ligne]. (<https://www.erudit.org/fr/revues/gpq/1981-v35-n2-gpq1496625/1000442ar.pdf>). Page consultée le 11 novembre 2024.
- Desrosier, M., Caron, P., Lefrançois, C., Gagné, L. (2013). *Documentation des enjeux fauniques identifiés dans le cadre du processus d’identification des préoccupations et d’entérinement des enjeux aux Plans d’aménagement forestier intégré (PAFI) de la Gaspésie. Consortium en foresterie Gaspésie-Les-Îles, Gaspé (Québec), pour le compte du ministère des Ressources naturelles. Version 2. 62 pages.*
- Detty, J.M., McGuire, K.J. (2010). Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment, *Water Resources Research*, [En ligne]. (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010WRR...46.7525D/abstract>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Devito, K.J., Hill, A.R. (1999). Sulphate mobilization and pore water chemistry in relation to groundwater hydrology and summer drought in two conifer swamps on the Canadian Shield, *Water, Air & Soil Pollution*, [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005081505086#citeas>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Dionne, J-C., Pfalzgraf, F. (2001). Fluctuations holocènes du niveau marin relatif à Rivière-Ouelle, côte sud du moyen estuaire du Saint-Laurent : données complémentaires, *Géographie physique et Quaternaire*, [En ligne]. (<https://www.erudit.org/fr/revues/gpq/2001-v55-n3-gpq540/006856ar.pdf>). Page consultée le 15 novembre 2024.
- Dionne, J-C. (1977). La mer de Goldthwait au Québec, *Géographie physique et Quaternaire*, [En ligne]. (<https://www.erudit.org/fr/revues/gpq/1977-v31-n1-2-gpq1486106/1000055ar.pdf>). Page consultée le 15 novembre 2024.
- Dionne, J.-C. (1988). Note sur les variations du niveau marin relatif à l’Holocène, à Rivière-Ouelle, côte sud du Saint-Laurent, *Géographie physique et Quaternaire*, [En ligne]. (<https://www.erudit.org/en/journals/gpq/1988-v42-n1-gpq1927/032711ar/>). Page consultée le 15 novembre 2024.
- Dionne, J-C. (2002). Une nouvelle courbe de niveau marin relatif pour la région de Rivière-du-Loup (Québec), *Géographie physique et Quaternaire*, [En ligne].

(<https://www.erudit.org/fr/revues/gpq/2002-v56-n1-gpq737/008603ar.pdf>). Page consultée le 15 novembre 2024.

Dugdale, S. J., Bergeron, N. E., St-Hilaire, A. (2013) Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river, *Remote Sensing of Environment*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425713001727?via%3Dihub>). Page consultée le 25 juillet 2024.

Dugdale, S.J., Franssens, J., Corey, E., Bergeron, N. E., Lapointe, M., Cunjak, R. A. (2015) *Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environment, Groupe de Recherche Interuniversitaire en Limnologie et en Environnement Aquatique (GRIL), Rapport de recherche*. Canada : Department of Geography - McGill University and Department of Biology & Canadian Rivers Institute - University of New Brunswick. Published, 17 pages.

Dugdale, S.J., Hannah, D. M., Malcolm, I. A. (2017). River temperature modelling : A review of process-based approaches and future directions, *Earth-Science Reviews*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825217300417>). Page consultée le 29 décembre 2024.

Dunne, T., Leopold, L.B. (1978). *Water in environmental planning*, San Francisco : W.H, Freeman.

Dymond, J.R. (1963). Family Salmonidae, *Fishes of the Western North Atlantic*,3, 457-502

Dymond, J. (1983). Water temperature change caused by abstraction, *Journal of hydraulic engineering*, 110,987-991.

Ebersole, J. L., Liss, W. J., Frissel, C. A. (2007) Cold water patches in warm streams: physicochemical characteristics and the influence of shading, *Journal of the American Water Resources association*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04390.x>) Page consultée le 26 aout 2024.

Ebersole, J.L., Liss, W.J., Frissel, C.A. (2001). Relationship between Stream Temperature, Thermal Refugia and Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* Abundance in Arid-Land Streams in the Northwestern United States, *Ecology of Freshwater Fish*, [En ligne]. (https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1034/j.1600-0633.2001.100101.x?casa_token=yGHJjZjKe3YAAAAA:cvfcYbQMVLaikqpo5pG8P7tPyffnpt4qDF0gWDtE3IjACnuu5pVWGDyHuke7xpNXwGJEDppUxR5EHx52Hg). Page consultée le 31 décembre 2024.

Ebersole, J. L., Liss, W. J., Frissel, C. A. (2003) Thermal heterogeneity, stream channel morphology, and salmonid abundance in northeastern Oregon streams, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/237175546_Thermal_Heterogeneity_Stream_Channel

[Morphology and Salmonid Abundance in Northeastern Oregon Streams](#)). Page consultée le 23 juillet 2024.

Elson, P.F. (1975). Atlantic salmon rivers, smolt production and optimal spawning: an overview of natural production, *International Atlantic Salmon Foundation Special Publication Series*, 6, 96-119.

Endreny, T.A. (2003). Fluvial Geomorphology Module. Syracuse, NY: University Corporation for Atmospheric Research; National Oceanic and Atmospheric Administration River Forecast Center; State University of New York College of Environmental Science and Forestry, Department of Environmental Resources Engineering. [En ligne] (https://fgmorph.eng.buffalo.edu/fg_2_21.php).

Esri. (2024a). (Page consultée le 29 décembre 2024). *Arc Hydro: Wetland Identification Mode*, [En ligne]. (<https://downloads.esri.com/ARCHYDRO/ArcHydro/Doc/Arc%20Hydro%20-%20Wetland%20Identification%20Model.pdf>)

European Space Agency (ESA). (2015). (Page consultée le 29 août 2024). *Sentinel-2: Colour vision for Copernicus*. [En ligne]. (https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Sentinel-2_Colour_visions_brosch%C3%BCre_eng.pdf)

European Space Agency (ESA). (2015). (Page consultée le 29 septembre 2024). *Sentinel-2: User Handbook*. [En ligne]. (https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook).

European Space Agency (ESA). (2024). (Page consultée le 29 septembre 2024). *Copernicus Browser* [En ligne]. (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE>)

Fakhari, M., Raymond, J., Martel, R., Dugdale, S., Bergeron, Normand., (2022). Identification of Thermal Refuges and Water Temperature Patterns in Salmonid-Bearing Subarctic Rivers of Northern Quebec, *Geographies*, [En ligne]. (<https://espace.inrs.ca/id/eprint/13091/1/P4183.pdf>). Page consultée le 15 décembre.

Falensky, M., Marko, K., Putra, R. D., Sulti, A. L. (2020). Application of Forest Canopy Density (FCD) Model for the Hotspot Monitoring of Crown Fire in Tebo, Jambi Province, *Jurnal Geografi Lingkungan Tropik*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/339624736_Application_of_Forest_Canopy_Density_FCD_Model_for_the_Hotspot_Monitoring_of_Crown_Fire_in_Tebo_Jambi_Province). Page consultée le 30 août 2024.

Fasil, M., Surendran, U. P., Gopinath, G., Karimbanakkuzhi, A., Sahadevan, A. S. (2022) Integration of GIS, remote sensing, and spectral indices for evaluation of forest canopy density model in drought and wet years in Western Ghats region of humid tropical Kerala, India, *Arabian Journal of Geosciences*, [En ligne] (<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-022-10368-z>). Page consultée le 30 août 2024.

- Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA) (2012). (Page consultée le 15 décembre 2023). *Développement de stratégies et de modalités de protection de l'habitat du saumon dans un contexte de gestion intégrée forêt-faune*, [En ligne]. (<https://www.saumonquebec.com/media/2377/developpement-des-strategies-et-de-modalites-de-protection-de-l-habitat-du-saumon-2012.pdf>).
- Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA) (2022a). (Page consultée le 15 décembre 2023). *Mémoire sur les enjeux, préoccupations et pistes de solution sur l'adaptation de l'industrie de la pêche au saumon du Québec face aux changements climatiques*, [En ligne]. (https://www.salmonconservation.ca/wp-content/uploads/2022/07/Memoire-eau-chaude-et-changements-climatiques_VP-002.pdf).
- Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA) (2022b). (Page consultée le 25 août 2024). *Plan de conservation du saumon atlantique et de développement durable de la pêche sportive sur la rivière Nouvelle*, [En ligne]. (https://www.salmonconservation.ca/wp-content/uploads/2022/07/Memoire-eau-chaude-et-changements-climatiques_VP-002.pdf).
- Fekete, B.M., Vörösmarty, C.K., Lammers, R.B. (2001). Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: development, analysis, and control of error. *Water Resources Research*. [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/228879798_Scaling_gridded_river_networks_for_macroscale_hydrology_Development_analysis_and_control_of_error). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Ferlatte, M., Tremblay, Y., Rouleau, A., Larouche, U. F. (2014). *Notions d'hydrogéologie – Les eaux souterraines pour tous. Première édition*, Réseau québécois sur les eaux souterraines (RQES), [En ligne]. (https://rqes.ca/wp-content/uploads/2016/08/HYDROGEOLOGIE_notions_et_figures_oct2014-1.pdf). Page consultée le 11 novembre 2024.
- Frechette, D. M., Dugdale, S.J., Dodson, J. J., Bergeron, N. E. (2018). Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring and acoustic telemetry, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, [En ligne]. (<https://espace.inrs.ca/id/eprint/7135/1/P3318.pdf>). Page consultée le 25 juillet 2024.
- Freeze, R. A., Cherry, J.A. (1979). *Groundwater, The Groundwater Project: Chapitre 4: Géologie des eaux souterraines*, [En ligne]. (<https://fc79.gw-project.org/francais/chapitre-4/>). Page consultée le 17 juillet 2024.
- Furois, V. (2016). Plan stratégique de développement durable de la pêche au saumon atlantique de la rivière Ouelle, *Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)*. [En ligne] (<https://www.st-pacome.ca/wp-content/uploads/2016/04/Plan-conservation-Ouelle-2016-vers-final1.pdf>). Page consultée le 23 juin 2024.
- Furois, V. (2018). Suivi biologique des refuges thermiques du bassin versant de la rivière Ouelle, *Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)*. [En ligne] (<https://www.obakir.qc.ca/wp-content/uploads/2022/05/rapport-suivi-biologique-refuges-thermiques.pdf>). Page consultée le 23 juin 2024.

- Gagnon, E., Gangbazo, G. (2007). *Efficacité des bandes riveraines : analyse de la documentation scientifique et perspectives*, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, [En ligne]. Québec. (https://belsp.uqtr.ca/id/eprint/643/1/Gagnon_2007_bandes-riv_A.pdf). Page consultée le 30 août 2024.
- Garner, G., Malcolm, I. A., Sadler, J. P., Millar, C. P., Hannah, D. M. (2014). Inter-annual variability in the effects of riparian woodland on micro-climate, energy exchanges and water temperature of an upland Scottish stream, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hyp.10223>). Page consultée le 26 août 2024.
- Garner, G., Malcolm, I. A., Sadler, J. P., Hannah, D. M., (2017). The role of riparian vegetation density, channel orientation and water velocity in determining river temperature dynamics, *Journal of Hydrology*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417301695>) Page consultée le 25 août 2024.
- Gauthier, B. (2001). *La végétation du milieu riverain forestier québécois : Biodiversité à préserver*. Conférence présentée à l'atelier sur le milieu riverain forestier, à Shawinigan. [En ligne]. (<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/BGauthier.pdf>). Page consultée le 25 août 2024.
- Gendron, J. (2013). *Physical Controls on Summer Thermal Refuges for Salmonids in Two Gravel-Cobble Salmon Rivers with Contrasting Thermal Regimes: The Ouelle and Ste-Marguerite Rivers*, Mémoire de maîtrise, Montréal: Université McGill, Département de géographie, [En ligne]. (<https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/4b29b931v>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Georgi, J. N., Dimitriou, D. (2010). The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities; Case study of China, Greece, *Building and Environment*, [En ligne] (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132309003564>). Page consultée le 26 août 2024.
- Giridharan, N., Sivakumar, R. (2022). NDVI based Image Processing for Forest change Detection in Sathyamangalam Reserve Forest, Conférence: 2022 2nd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS). [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/366664318_NDVI_based_Image_Processing_for_Forest_change_Detection_in_Sathyamangalam_Reserve_Forest). Page consultée le 30 août 2024.
- Godbout, P-M. (2013). *Géologie du quaternaire et hydrostratigraphie des dépôts meubles du bassin versant dans la rivière bécanour et des zones avoisinantes*, Québec. Mémoire de maîtrise publiée. Montréal : Université du Québec à Montréal, Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère. [En ligne]. (<https://archipel.uqam.ca/5603/1/M12984.pdf>). Page consultée le 15 novembre 2024.
- Godinho, S., Gil, S., Guiomar, N., Neves, N., Pinto-Correira, T. (2016). A remote sensing-based approach to estimating montado canopy density using the FCD model: a contribution to identifying HNV farmlands in southern Portugal, *Agroforestry Systems*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/268502479_A_remote_sensing-

- [based approach to estimating montado canopy density using the FCD model a contribution to identifying HNV farmlands in southern Portugal](#)). Page consultée le 30 août 2024.
- Gohen, S., Wan, T., Islam, M.T., Syvitski, J.P.M. (2018). Global river slope: A new geospatial dataset and global-scale analysis, *Journal of Hydrology*, [En ligne]. ([https://sdml.ua.edu/wp-content/uploads/2018/08/Cohen et al JofHydrology2018 GloRS.pdf](https://sdml.ua.edu/wp-content/uploads/2018/08/Cohen_et_al_JofHydrology2018_GloRS.pdf)). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Gomi, T., Moore, R. D., Dhakal, A. S. (2006). Headwater stream temperature response to clear-cut harvesting with different riparian treatments, coastal British Columbia, Canada, *Water Resources Research*, [En ligne]. (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005WR004162>) Page consultée le 26 août 2024.
- Gonia, T.M., Keefer, M.L., Bjornn, T.C., Peery, C.A., Bennet, D.H., Stuehrenberg, L.C. (2006). Behavioral Thermoregulation and Slowed Migration by Adult Fall Chinook Salmon in Response to High Columbia River Water Temperatures, *Transactions of the American Fisheries Society*, [En ligne]. (https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1577/T04-113.1?casa_token=myufoKptUb0AAAAA%3AWO-W7uiXJXRUdjx6Oi2lhrA6JQJ_OHO5Qwf1dTOJgZbA4g-rIY4fD5djCBOVy-LwFw2wYqaCLsutFRdc). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Goodchild, M.F. (2001). Part 1 – Spatial Analyst and GIS Practitioners. The current Status of GIS and Spatial Analysis, *Journal of Geographical System*, (<https://link.springer.com/article/10.1007/s101090050022>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Gouvernement du Canada. (1990). *Loi sur les pêches : Règlement de pêche du Québec (DORS-90-214)*. <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/dors-90-214/index.html>
- Gouvernement du Québec. (2010). *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (Chapitre A-18.1)*. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cs/A-18.1.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2013). *Loi sur les forêts (Chapitre F-4.1)*. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/cs/F-4.1.pdf>
- Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., Laudon, H. (2009). Modeling spatial patterns of saturated areas : A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model, *Journal of Hydrology*, [En ligne]. (<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:275565/FULLTEXT01.pdf>). Page consultée le 29 décembre 2024.
- Groupe Salar. (1992) *Plan de mise en valeur du potentiel salmonicole de la rivière Ouelle*. Rapport. 92 pages.
- Guillemette, Nicolas. (2009). *Modélisation de la température de l'eau basée sur une méthode d'interpolation spatiale combinée à une approche multivariée*. Mémoire de maîtrise. Québec : Université du Québec – Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement. [En ligne]. (<https://espace.inrs.ca/id/eprint/1623/>). Page consultée le 14 juillet

2024.

- Hamblin, P.F. (1976). Seiches, Circulation and Storm Surges of an Ice-Free Lake Winnipeg, *Journal of the Fisheries Board of Canada*, [En ligne]. (<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/f76-284>). Page consultée le 17 juillet 2024.
- Hannah, D. M., Malcolm, I. A., Soulsby, C., Youngson, A. F. (2008) A comparison of forest and moorland stream microclimate, heat exchanges and thermal dynamics, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.7003>). Page consultée 26 août 2024.
- Heggenes, J., Krog, O., M. W., Lindås, O. R., & Dokk, J. G. (1993). Homeostatic Behavioural in a Changing Environment: Brown Trout (*Salmo trutta*) become Nocturnal during Winter, *Journal of Animal Ecology*, [En ligne]. (<https://www.jstor.org/stable/5361>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Higginbottom, T.P., Field, C.D., Rosenburgh, A.E., Wright, A., Symeonakis, E. (2018). High resolution wetness index mapping: A useful tool for regional scale wetland management, *Ecological informatics*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954118300918?via%3Dihub>). Page consultée le 29 décembre 2024.
- Hockey, J. B., Owens, I. F., Tapper, N. J. (1982). Empirical and theoretical models to isolate the effect of discharge on summer water temperatures in the Hurunui River, *Journal of hydrology*, 21, 1-12.
- Hotelling, H. (1993). Analysis of a complex of a statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, [En ligne]. (<https://psycnet.apa.org/doiLanding?doi=10.1037%2Fh0071325>). Page consultée le 13 novembre 2024.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., Shao, G. (2020). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing, *Journal of Forestry Research*, [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-020-01155-1>). Page consultée le 30 août 2024.
- Huang, S., Fu, P. (2009). Modelling Small Areas Is a Big Challenge: Using the solar radiation analysis tool in ArcGIS Spatial Analyst. *ArcUser The Magazine for ESRI Software Users*, [En ligne]. (<https://www.esri.com/news/arcuser/0309/files/arcuser45/arcuser-spring09.pdf>). Page consultée le 28 novembre 2024.
- Huemrich, K. F. (1996). Effects of shadows on vegetation indices, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. [En ligne]. (<https://doi.org/10.1109/igarss.1996.516990>). Page consultée le 8 septembre 2024.
- Huntsman, A.G. (1942). Death of Salmon and Trout with High Temperature, *Journal of the Fisheries Board of Canada*, [En ligne]. (https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/f40-051?casa_token=OiAvd-

[9zJjwAAAAA:0kl9cXNz9zxwAnBpqUrlP3_wKhDwllt_VzflQtg8zD_mzl86GgG7GknX67z7x3y52PEZ1cDPAk8Cdxg](https://doi.org/10.1002/rra.1608)). Page consultée le 31 décembre 2024.

Imholt, C., Soulsby, C., Malcolm, I. A., Hrachowitz, M., Gibbins, C. N., Langan, S., Tetzlaff, D. (2011). Influence of scale on thermal characteristics in a large montane river basin, *River Research and Applications*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.1608>). Page consultée le 26 août 2024.

Imholt, C., Soulsby, C., Malcolm, I. A., Gibbins, C. N. (2012). Influence of contrasting riparian forest cover on stream temperature dynamics in salmonid spawning and nursery streams, *Ecohydrology*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eco.1291>). Page consultée le 26 août 2024.

Isaak, D.J., Wenger, S.J. Young, M. K. (2017). Big biology meets microclimatology: defining thermal niches of ectotherms at landscape scales of conservation planning, *Ecological Applications*, [En ligne]. (<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eap.1501>). Page consultée le 29 décembre 2024.

Janssen, R., Rietveld, P. (1990). Multicriteria analysis geographical information systems: an application to agricultural land use in the Netherlands, *The GeoJournal Library*, [En ligne]. (https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-1677-2_12#citeas) Page consultée le 28 décembre 2024.

Jeong, D., St-Hillaire, A. (2013) Development of a Stochastic Water Temperature Model And Projection of Future Water Temperature And Extreme Events In The Ouelle River Bassin in Québec, Canada, *River Research and Applications*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/235225673_Development_of_a_Stochastic_Water_Temperature_Model_And_Projection_of_Future_Water_Temperature_And_Extreme_Events_In_The_Ouelle_River_Basin_In_Qubec_Canada). Page consultée le 25 juillet 2024.

Johnson, S., Jones, J. A. (2000). Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, [En ligne]. (<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/f00-109>). Page consultée le 26 août 2024.

Kalny, G., Laaha, G., Melcher, A., Trimmel, H., Weihs, P., Rauch, H. P. (2017). The influence of riparian vegetation shading on water temperature during low flow conditions in medium sized river, *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, [En ligne]. (https://www.kmae-journal.org/articles/kmae/full_html/2017/01/kmae160097/kmae160097.html). Page consultée le 25 août 2024.

Klingbeil, R., Kleinedam, S., Asprion, U., Aigner, T., Teutsch, G. (1999). Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits, *Sedimentary Geology*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0037073899000676>). Page consultée le 7 janvier 2025.

Kobayashi, D. (1985). Separation of the snowmelt hydrograph by stream temperatures, *Journal of Hydrology*, [En ligne].

- (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022169485900964>). Page consultée le 31 décembre 2024.
- Koirala, S., Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Kanae, S. (2014). Global assessment of agreement among streamflow projections using CMIP5 model outputs, *Environmental Research Letters*, [En ligne]. (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/6/064017>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Koroleva, P.V., Rukhovich, D. I., Rukhovich, A.D., Rukhovich, D.D., Kulyanitsa, A.L.,)Trubnikov, A.V, Kalinina, N.V., Simakova, M.S. (2017). Location of Bare Soil Surface and Soil Line on the RED-NIR Spectral Plane, *Genesis and Geography of Soils*. [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229317100040>). Page consultée le 30 août 2024.
- Koycheva, Y. (2003). Stream water temperature and climate change: an ecological perspective, mémoire de maîtrise, Toronto: University of Toronto, Department of Civil Engineering, [En ligne]. (<https://utoronto.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/e84ec78f-6488-45b5-ac81-b7ea0102a9e1/content>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Kurylyk, B.L., MacQuarrie, K.T.B, Linnansaari, T., Cunjak, R.A (2015). Preserving Augmenting and Creating Cold-water Thermal Refugia in Rivers: Concepts Derived from Research on the Miramichi River, New Brunswick (Canada), *Ecohydrology*, [En ligne]. (https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eco.1566?casa_token=r6mpuzSy-CsAAAAA%3AF59tYEby2YjHEXNwAY87bHTT5OgOmT8PNJCKNNII2h1oF2H4oD3R-21d47fBfSse33duSXseoc-H2MXUgw). Page consultée le 30 décembre 2024.
- L'Heureux, J. (2002). *Analyse des relations entre température des cours d'eau et température de l'air dans le bassin de la Seine*. Paris: Sorbonne Université, UMR Mixte de Recherche METIS. [En ligne]. (<https://www.metis.upmc.fr/~ducharne/documents/lheureux.pdf>). Page consultée le 26 décembre 2024.
- Leopold, L. B., Maddock, T. Jr. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*, U.S Geological Survey.
- Lin, H., Wang, J., Liu, S., Qu, Y., Wan, H. (2005). *Studies on urban areas extraction from Landsat TM images*, Conference Geoscience and Remote Sensing Symposium, (https://www.researchgate.net/publication/4183530_Studies_on_urban_areas_extraction_from_Landsat_TM_images).
- Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y., Huang, P.H., Tsai, J.S. (2006). Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5911>). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Linnansaari, T., O'Sullivan, A.M., Breau, C., Corey, E.M., Collet, E.N., Curry, R.A., Cunjak, R.A. (2023). The Role of Cold-Water Thermal Refuges for Stream Salmonids in a Changing Climate: Experiences from Atlantic Canada, *Fishes*, [En ligne]. (<https://www.mdpi.com/2410->

[3888/8/9/471#B7-fishes-08-00471](#)). Page consultée le 30 décembre 2024.

Loi, D. T., Fang, Y.-M., Chou, T.-Y. (2017). Integration of GIS and Remote Sensing for Evaluating Forest Canopy Density Index in Thai Nguyen Province, Vietnam, *International Journal of Environmental Science and Development*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/319045433_Integration_of_GIS_and_Remote_Sensing_for_Evaluating_Forest_Canopy_Density_Index_in_Thai_Nguyen_Province_Vietnam). Page consultée le 30 août 2024.

Marteau, B., Piégay, H., Moatar, F. (2023). L'infrarouge thermique aéroporté, un outil de connaissance des rivières face au changement climatique, *Le Graie : pôle Eau et Territoires*, [En ligne]. (https://www.graie.org/graille/grailedoc/doc_telech/ZABR/IRTa_outil_connaissance_rivi%C3%A8res-Marteau_Pi%C3%A9gay_Moatar_2023.pdf). Page consultée le 2 septembre 2024.

Mason, J. (1983) *Effects of topographic shading on the energy budget of small lakes*. Mémoire de maîtrise non-publié. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, Engineering.

Mayorga, E., Logsdon, M.G., Ballester, M.V.R, Richey, J.E. (2005). Estimating cell-to-cell land surface drainage paths from digital channel networks, with an application to the Amazon basin, *Journal of Hydrology*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169405001861>). Page consultée le 30 novembre 2024.

McBride, G. B., Cooke, J. G., Cooper, A. B., Smith, C. M. (1993). Optimizing the compensation flow requirements of a river impounded for water supply, *Rivers for our future*, 4B/1/, 1-15.

Mellina, E., Moore, R.D, Hinch, S.G., Macdonald, J.S., Pearson, G. (2002). Stream temperature responses to clearcut logging in British Columbia: the moderating influences of groundwater and headwater lakes, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, [En ligne]. (https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/f02-158?casa_token=0whDDSubVrAAAAAA:uaNesjJysFyycEm7eCEL-D4ZpsLMMZTa496ohHD8S8BVizKAj1FiE3rwtREwIWwQAmEsZMWChdUNDP). Page consultée le 30 décembre 2024.

Monk, W.A., Wilbur, N.M., Curry, R.A., Gagnon, R., Faux, R.N. (2013). Linking landscape variables to cold water refugia in rivers, *Journal of Environmental Management*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479712006627?via%3Dihub>). Page consultée le 29 décembre 2024.

Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.3360050103>). Page consultée le 30 novembre 2024.

Moore, R.D., Spittlehouse, D.L., Story, A. (2005). Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review, *Journal of the American water resources association*, [En ligne]. (<https://www.sierraforestlegacy.org/Resources/Conservation/FireForestEcology/Threatene>

[dHabitats/Aquatic/AquaticRiparian-Moore05.pdf](#)). Page consultée le 25 août 2024.

Morin, G., Nzakimuena, T.J., Sochanski, W. (1994). Préviation des températures de l'eau en rivières à l'aide d'un modèle conceptuel : le cas de la rivière Moisie, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 63-75.

Morrill, J.C., Bales, R.C., Conklin, M.H. (2001). The Relationship Between Air Temperature and Stream Temperature. *American Geophysical Union*, [En ligne]. (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AGUSM...H42A09M/abstract#:~:text=The%20majority%20of%20streams%20instead,degree%20increase%20in%20air%20temperature>). Page consultée le 26 décembre 2024.

Morse, W. L. (1972). Stream temperature prediction under reduced flow, *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, [En ligne]. (<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JYCEAJ.0003330>). Page consultée 28 décembre 2024.

MRC de Kamouraska. (2024). (Page consultée le 31 octobre 2024). *Plan régional des milieux humides et hydriques : Service de l'aménagement et de la mise en valeur du territoire*, [En ligne], Québec. (https://mrckamouraska.com/wp-content/uploads/2024/05/PRMHH-FINAL-MRC-de-Kamouraska_14-mai-2024.pdf).

Nagler, P. L., Doody, T. M., Glenn, E. P., Jarchow, C. J., Barreto-Muños, A., Didan, K. (2015). Wild-area estimates of evapotranspiration by red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) and associated vegetation in the Murray-Darling River Basin, Australia, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10734>). Page consultée le 29 août 2024.

Nagler, P. L., Barreto-Muños, A., Chavoshi Borujeni, S., Doody, T. M., Jarchow, C. J., Gómez-Sapiens, M. M., Nouri, H., Herrmann, S. M., Didan, K. (2020). Ecohydrological responses to surface flow across borders: Two decades of changes in vegetation greenness and water use in the riparian corridor of the Colorado River delta, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.13911>). Page consultée le 29 août 2024.

Namasivayam, G., Ramamoorthy, S. (2024). Estimation of forest canopy density through Geospatial Technology-a case study on Sathymangalam Forest, Erode District, Tamil Nadu, *Environ Monit Assess*, [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-024-12356-0#citeas>). Page consultée le 30 août 2024.

Nandy, S., Joshi, P. K., Das, K. K. (2003). Forest canopy density stratification using biophysical modeling, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03007349>). Page consultée le 30 août 2024.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2012). (Page consultée le 14 juillet 2024). *Landsat: Data Continuity Mission*. [En ligne]. (https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2012/12/20101119_LDCMbrochure.pdf).

- Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Diem, P. K., Huo, L-Z. (2021) A Modified Bare Soil Index to identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8, *Land*, [En ligne]. (<https://www.mdpi.com/2073-445X/10/3/231>). Page consultée le 30 août 2024.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2024). (Page consultée le 4 septembre 2024). Global Monitoring Laboratory : NOAA Solar Calculator, [En ligne]. (<https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/>).
- O'Sullivan, A., Linnansaari, T., Curry, R. A. (2019a). Ice Cover Exists (ICE): A quick method to delineate groundwater inputs in running waters for cold and temperate regions, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/334768781_Ice_Cover_Exists_ICE_A_quick_method_to_delineate_groundwater_inputs_in_running_waters_for_cold_and_temperate_regions). Page consultée le 12 janvier 2024.
- O'Sullivan, A.M., Devito, K.J., Curry, R.A. (2019b). The influence of landscape characteristics on the spatial variability of river temperatures, *CATENA*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816219300566?via%3Dihub>). Page consultée le 29 décembre 2024.
- Olivera, F. (2001). Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modeling, *Journal of Hydrologic Engineering*, [En ligne]. ([https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:6\(524\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:6(524))). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Openshaw, S., Openshaw, C. (1997). Artificial Intelligence in Geography, *The Geographical Journal*, [En ligne]. (<https://www.jstor.org/stable/3060633?origin=crossref>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Ozaki, V. (1988). Geomorphic and hydrologic conditions for cold pool formation on Redwood Creek, California, *International Association of Hydrological Sciences*, [En ligne]. (<https://scholar.google.com/scholar?hl=en&q=Ozaki%2C+V.+%281988%29.+Geomorphic+and+hydrologic+conditions+for+cold+pool+formation+on+Redwood+Creek%2C+California.+Redwood+National+Park%2C+Technical+Report+24.+Arcata%2C+California>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Pace, G., Gutiérrez-Cánovas, C., Henriques, R., Carvalho-Santos, C., Cássio, F., Pascoal, C. (2022). Remote sensing indicators to assess riparian vegetation and river ecosystem health, *Ecological Indicators*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X2200992X>). Page consultée le 30 août 2024.
- Peng, J., Liu, Z., Liu, Y., Wu, J., Han, Y. (2012). Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent, *Ecological Indicators*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X1100255X?via%3Dihub>). Page consultée le 29 août 2024.
- Prévil, C., Thériault, M., Rouffignat, J. (2004). Analyse multicritère et SIG pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : vers une amélioration du processus décisionnel?, *Cahiers de*

- géographie du Québec*, [En ligne]. (<https://www.erudit.org/fr/revues/cgq/2003-v47-n130-cgq717/007968ar/#:~:text=L%20analyse%20multicrit%C3%A8re%20repose%20sur,susceptibles%20d%27influencer%20la%20d%C3%A9cision>). Page consultée le 28 décembre 2024.
- Poole, G.C., O’Daniel, S.J., Jones, K.L., Woessner, W.W., Bernhardt, E.S., Helton, A.M., Stanford, J.A., Boer, B.R., Beechie, T.J. (2008). Hydrologic spiralling : the rôle of multiple interactive flow paths in stream ecosystems, *River Research and Applications*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.1099>). Page consultée le 30 décembre 2024.
- Québec. Cabinet du ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs. (2019). Bas-Saint-Laurent-Rivière Ouelle et Grande Rivière - Zone 2: Remise à l’eau obligatoire de tous les saumons, *CISION*, mai, [En ligne]. (<https://www.newswire.ca/fr/news-releases/bas-saint-laurent-riviere-ouelle-et-grande-riviere-zone-2-remise-a-l-eau-obligatoire-de-tous-les-saumons-828978695.html>). Page consultée le 23 juin 2024.
- Québec. Cabinet du ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs. (2022a). Le ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs annonce le dépôt du cadre de gestion pour l’harmonisation des usages des rivières à saumon, *CISION*, juin, [En ligne]. (<https://www.newswire.ca/fr/news-releases/le-ministre-des-forets-de-la-faune-et-des-parcs-annonce-le-depot-du-cadre-de-gestion-pour-l-harmonisation-des-usages-des-rivieres-a-saumon-891479251.html>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Données Québec. (2024). *Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)*, [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Gouvernement du Québec. (2024). *À propos du régime transitoire de gestion des zones inondables, des rives et du littoral*, [En ligne]. Québec. (<https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-de-protection-du-territoire-face-aux-inondations/gestion-rives-littoral-zones-inondables/regime-transitoire/a-propos>). Page consultée le 25 août 2024.
- Québec. Gouvernement du Québec. (2018). *Couverture territoriale de la connaissance sur les eaux souterraines*. 1 :2 000 000, NAD 83 Conforme conique de Lambert, Direction générale des politiques de l’eau : Direction de l’eau potable et des eaux souterraines, [En ligne]. (<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/souterraines/programmes/carte-projets.pdf>).
- Québec. Gouvernement du Québec. (2024). *Projet d’acquisition de données par le capteur LiDAR à l’échelle provinciale : Analyse des retombées et recommandations*, [En ligne]. Québec. (https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/Analyse_retombees_LiDAR-Finale.pdf). Page consultée le 25 août 2024.
- Québec. Ministère du Développement Durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2015). *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables*, [En ligne]. Québec. (<https://mddep.gouv.qc.ca/eau/rives/guide-interpretationPPRLPI.pdf>). Page consultée le 25 août 2024.

- Québec. Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) (2018). *Métadonnées : Bassins hydrographiques multicéchelles du Québec*, [En ligne]. Québec. (https://stqc380donoppdtdce01.blob.core.windows.net/donnees-ouvertes/Bassins_hydrographiques_multi_echelles/Bassins_hydrographiques_multi_echelles.pdf). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) (2021). *Cadre de référence hydrologique du Québec : Guide de l'utilisateur version 1.1*, [En ligne]. Québec. (https://stqc380donoppdtdce01.blob.core.windows.net/donnees-ouvertes/Cadre_reference_hydrologique/guide_crhq_2021_v1_1.pdf). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCCFP) (2020a). *Métadonnées du SIH*, [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/eau-souterraines-sih-index/ressource/789c4657-b600-4bd4-adc1-c18ddaa2c984>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2023a). *Bilan de l'exploitation du saumon au Québec en 2022*, [En ligne]. Québec. (<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/faune/bilan-exploitation-saumon-2022.pdf>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2024a). *Bilan de l'exploitation du saumon au Québec en 2023*, [En ligne]. Québec. (<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/faune/peche/bilan-exploitation-saumon-2023.pdf>). Page consultée le 26 décembre 2024.
- Québec. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2024b). *Lancement de l'appel à projets d'aires protégées en territoire public dans le sud du Québec*, [En ligne]. Québec. (<https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/lancement-de-lappel-a-projets-daires-protégees-en-territoire-public-dans-le-sud-du-quebec-56397>). Page consultée le 26 décembre 2024.
- Québec. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2023b). *Cadre de gestion pour l'harmonisation des activités récréatives sur les rivières à saumon situées dans les territoires fauniques structurés*, [En ligne]. Québec. (<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/faune/peche/cadre-gestion-saumon.pdf>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2023c). *Réglementation sur la pêche – Nouveautés 2024-2026*, [En ligne]. Québec. (<https://www.quebec.ca/tourisme-et-loisirs/activites-sportives-et-de-plein-air/peche-sportive/nouveautes?type=117&exclurePid=&exclureAnnexesPid=#;~:text=Harmonisation%20de%20la%20p%C3%A9riode%20de,bar%20ray%C3%A9%20y%20demeure%20interdite>). Page consultée le 23 juin 2024.

- Québec. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2023d). *Retombées économiques des activités de chasse, de pêche, de piégeage et d'observation de la faune au Québec en 2022*, [En ligne]. Québec. (<https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/faune/documents/statistiques/faits-saillants-retombees-economique-chasse-peche-piegeage-observation-faune-Quebec-2022.pdf>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Ministère de l'Environnement, Lutte Contre les Changement climatiques, Faune et Parcs (MELCCFP). (2020b). *Système d'information hydrogéologique (SIH)*, [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/eau-souterraines-sih-index>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) (2019). *Géobase du réseau hydrographique du Québec : Guide de l'utilisateur*, [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq/resource/8e997dc8-d1a5-4fd1-acac-aca83c50e7af>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) (2020). *Guide d'utilisation des produits dérivés du LiDAR*, [En ligne]. Québec. (<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/guide-interpretation-lidar.pdf>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) (2021). *Description du produit : Indice d'humidité topographique*, [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/indice-humidite-topographique-issu-du-lidar/resource/840d6ab7-0e83-4729-9a79-903bdb3a6a82>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2017). *Guide d'utilisation du LiDAR pour l'identification des dépôts de surface et des bancs d'emprunt*, [En ligne]. Québec. (https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/Guide_utilisation_lidar_depots.pdf). Page consultée le 13 novembre 2024.
- Québec. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) (2016). *Plan de gestion du saumon atlantique 2016-2022*, [En ligne]. Québec. (https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/faune/documents/gestion-especes/Plans-gestion/PL_gestion-saumon-atlantique.pdf). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF) (2024). *Carte du cinquième inventaire écoforestier du Québec méridional : Méthodes et données associées*, [En ligne]. Québec. (https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/carto_5E_methodes_donnees.pdf). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF) (2017). *Carte écoforestière à jour*, [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>). Page consultée le 15 décembre 2023.

- Québec. Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF) (2020). *Indice d'humidité topographique issu du LiDAR* [En ligne]. Québec. (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/indice-humidite-topographique-issu-du-lidar>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Rampton, V.N., Gauthier, R.C., Thibault, J., Seaman, A.A. (1984). Quaternary geology of New Brunswick, *Commission géologique du Canada*, [En ligne]. (<https://ostrnrcan-dostrncan.canada.ca/entities/publication/1ee6cfbe-4ecb-405d-9b82-d5be9e812704>). Page consultée le 29 décembre 2024.
- Reed, S.M. (2003). Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling, *Water Resources Research*, [En ligne]. (<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003WR001989>). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Rikimaru, A., Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density, *Tropical Ecology*, [En ligne]. (<https://www.semanticscholar.org/paper/Tropical-forest-cover-density-mapping-Rikimaru-Roy/076b1060b928d1bf7a4ae1107ec82b291867c61e>). Page consultée le 30 août 2024.
- RivTemp. (2024a). Stations RivTemp, [En ligne]. (<https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=0a0e1a14ef814dd987252a083c43cca9>). Page consultée le 30 août 2024.
- Roy, P. S., Sharma, K. P., & Jain, A. (1996). Stratification of density in dry deciduous forest using satellite remote sensing digital data - An approach based on spectral indices, *Journal of Biosciences*, [En ligne]. (<https://doi.org/10.1007/BF0270314>) Page consultée le 8 septembre 2024.
- Rutherford, J. C., Blackett, S., Blackett, C., Saito, L., Davies-Colley, R. J. (1997). Predicting the effects of shade on water temperature in small streams, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, [En ligne]. (<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00288330.1997.9516801>). Page consultée le 8 septembre 2024.
- Saadi, Al Mahdi. (2020). *Estimation de l'aire des refuges thermiques potentiels en rivière par l'utilisation du Modèle additif généralisé (GAM) et le modèle de régression multivariée par spline adaptatifs (MARS) : Étude de cas de la rivière Ste-Marguerite (Québec, Canada)*. Mémoire de maîtrise.
- Québec : Université du Québec – Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, [En ligne]. (<https://espace.inrs.ca/id/eprint/11839/1/T984.pdf>). Page consultée le 14 juillet 2024.
- Sahana, M., Sajjad, H., Ahmed, R. (2015). Assessing spatio-temporal health of forest cover using forest canopy density model and forest fragmentation approach in Sundarban reserve forest, India, *Modeling Earth Systems and Environment*, [En ligne]. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-015-0043-0>). Page consultée le 26 août 2024.
- Salas, E. A. L., Kumaran, S. S. (2023). Hyperspectral Bare Soil Index (HBSI): Mapping Soil Using an Ensemble of Spectral Indices in Machine Learning Environment, *Land*, [En ligne].

(<https://www.mdpi.com/2073-445X/12/7/1375#B13-land-12-01375>). Page consultée le 30 août 2024.

Saumon Québec (2019). *Fosses à saumon : Rivière Ouelle*. [En ligne]. (https://www.saumonquebec.com/media/2643/riviere_ouelle.pdf). Page consultée le 12 août 2024.

Schindler, D.W. (2001). The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, [En ligne]. (https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-1493-0_11). Page consultée 28 décembre 2024.

Sinokrot, B.A., Stefan, H.G., McCormick, J.H., Eaton, J.G. (1995). Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs, *Climate Change*, [En ligne]. (https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagcd%3A8%3A2656472/detailv2?sid=ebsco%3Aocuid%3Aecord&id=ebsco%3Aagcd%3A7953069&bquery=DE%20%22FISH%20habitats%22&page=1&link_origin=www.google.com). Page consultée le 28 décembre 2024.

Sinokrot, B.A., Gulliver, J.S. (2000). In-stream flow impact on river water temperatures, *Journal of Hydraulic Research*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/245328408_In-Stream_Flow_Impact_on_River_Water_Temperatures). Page consultée le 28 décembre 2024.

Soulsby, C., Tetzlaff, D., Dunn, S. M., Waldron, S. (2006). The influence of landscape characteristics on the spatial variability of river temperatures, *CATENA*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816219300566>). Page consultée le 28 décembre 2024.

Sridhar, V., Sansone, A. L., LaMarche, J., Dubin, T., Lettenmaier, D. P., (2004). Prediction of stream temperature in forested watershed, *Journal of the American Water Resources Association*, [En ligne]. (https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01019.x?casa_token=YuZHi401CNsAAAAA%3AKydA-QMHs5BYcbZC1cu04P4bZPX6SqDo_SdaDHGwJ_p8lNsyjubGM7CBpeo9BWG8_O078L7MHjCRsnKEA). Page consultée le 26 août 2024.

Story, A., Moore, R.D, Macdonald, J.S. (2003). Stream temperatures in two shaded reaches below cutblocks and logging roads: downstream cooling linked to subsurface hydrology, *Canadian Journal of Forest Research*, [En ligne]. (https://cdsciencepub.com/doi/abs/10.1139/x03-087?casa_token=vOfslvJousAAAAA:k75V5DsWdZCSDQVYVRXBAPQb7Xjfsu3JAzG9oXHiD9REVs49yUuJ3tKsH4I3YUIxBR7tdFT8hsDJMe8). Page consultée le 30 décembre 2024.

Sullivan, C.J, Vokoun, J., Helton, A., Briggs, M., Kurylyk, B. (2021). An ecohydrological typology for thermal refuges in streams and rivers, *Ecohydrology*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eco.2295>). Page consultée le 15 décembre 2023.

- Tague, C., Grant, G. E. (2004). A geological framework for interpreting the low-flow regimes of Cascade streams, Willamette River Basin, Oregon, *Water Resources Research*, [En ligne]. (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004WRR....40.4303T/abstract>). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Thielen, A.H., Luècke, A., Diekkruèger, B., Richter, O. (1999). Scaling input data by GIS for hydrological modelling, *Hydrological Processes*, [En ligne]. ([https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199903\)13:4%3C611::AID-HYP758%3E3.0.CO;2-6](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-1085(199903)13:4%3C611::AID-HYP758%3E3.0.CO;2-6)). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Tsai, C-W., Young, T., Warren, P H., Maltby, L. (2017). Riparian thermal conditions across a mixed rural and urban landscape, *Applied Geography*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622816302430>). Page consultée le 25 août 2024.
- Valentini, E., Sapio, S., Schiavon, E., Righini, M., Monteleone, B., Taramelli, A. (2024). Development of a Pre-Automatized Processing Chain for Agricultural Monitoring Using a Multi-Sensor and Multi-Temporal Approach, *Land*, [En ligne]. (<https://www.mdpi.com/2073-445X/13/1/91>). Page consultée le 30 août 2024.
- Varin, M. (2021). Analyse de l'efficacité de l'indice d'humidité topographique (TWI) à cartographier les milieux humides, *CERFO*. [En ligne]. (<https://cerfo.qc.ca/analyse-de-lefficacite-de-lindice-dhumidite-topographique-twi-a-cartographier-les-milieux-humides/>). Page consultée le 29 décembre 2024.
- Walker, J.P., Willgoose, G.R. (1999). On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology, *Water Resources Research*. [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/2470457_On_the_Effect_of_Digital_Elevation_Model_Accuracy_on_Hydrology_and_Geomorphology). Page consultée le 30 novembre 2024.
- Wang, T., Kelson, S. J., Greer, G., Thompson, S. E., Carlson, S. M. (2020). Tributary confluences are dynamic thermal refuges for a juvenile salmonid in a warming river network, *River Research and Applications*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rra.3634>) Page consultée le 5 décembre 2024.
- Wasser, L. A. (2024). The Basics of LiDAR – Light Detection and Ranging Remote Sensing, *National Ecological Observatory Network*, [En ligne]. (<https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>). Page consultée le 29 septembre 2024.
- Watkins, T. (2020). *Transformations in Remote Sensing*. San José State University. Emeritus Faculty, Economics, [En ligne]. (<https://gis.unbc.ca/wp-content/uploads/2020/10/transforms2020.pdf>). Page consultée le 12 novembre 2024.
- Wilbur, N.M, O'Sullivan, A.M., MacQuarrie, K.T.B., Linnansaari, T., Curry, R.A. (2020). Characterizing Physical Habitat Preferences and Thermal Refuge Occupancy of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*) and Atlantic Salmon (*Salmo salar*) at High River Temperatures, *River Research and Applications*, [En ligne].

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rra.3570?casa_token=P43U2K6WS7kAAAAA%3A9vxz94ODHabCqgUXxhq_KqupCBhpfYwvdcVjVZUTI3kTFvd-cTMLn7ZTMoHkIG8bGJ1LXTthaqviXOOFG). Page consultée le 31 décembre 2024.

Wilzbach, M.A., M.E. Mather, C.L. Folt, A. Moore, R.J. Naiman, A.F. Youngson, and J. McMenemy. (1998). Proactive responses to human impacts that balance development and Atlantic salmon (*Salmo salar*) conservation: an integrative model, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55 (Suppl. 1), 288-302.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M. (1998). Ground Water and Surface Water: A Single Resource, *U.S. Geological Survey Circular*, [En ligne]. (https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=visG1yDeSooC&oi=fnd&pg=PR6&ots=-NTWLMW2E1&sig=I8bkAX33W6HIIJLwSSzJ3hzdjdg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Page consultée le 30 décembre 2024.

Wondzell, S.M., Gooseff, M.N. (2013). Geomorphic Controls on Hyporheic Exchange Across Scales: Watersheds to Particles, *Treatise on Geomorphology*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123747396002384?via%3Dihub>). Page consultée le 30 décembre 2024.

Yager, D.B. (2002). *Gradient determinations for the Anima's River and its major headwater tributaries, animas river watershed, La Plata and San Juan Counties, Colorado*. 1: 48 000, Contour interval 40 feet, National Geodetic Vertical Datum of 1929, USGS: US Department of the interior, U.S. Geological Survey, [En ligne]. (https://pubs.usgs.gov/dds/dds-071/gradient_maps/gradient_map.pdf).

Yan, W. Y. (2023). Airborn Lidar Data Artifacts: What we know thus far, *IEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/372107397_Airborne_Lidar_Data_Artifacts_What_we_know_thus_far). Page consultée le 29 septembre 2024.

Zaimes, G. N., Gounaridis, D., Symeonakis, E. (2019). Assessing the impact of dams on riparian and deltaic vegetation using remotely-sensed vegetation indices and Random Forests modelling, *Ecological Indicators*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X19302900?via%3Dihub>). Page consultée le 29 août 2024.

Zoomer, R. J., Trabucco, A., Bossio, D. A., Singh, V.P., Gupta, D.C., Yuanjie, L. (2007). Trees and Water: Smallholder Agroforestry on Irrigated Lands in Northern India. Colombo, Sri Lanka. *IWMI Research Report 122, International Water Management Institute*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/284503783_Trees_and_Water_Smallholder_Agroforestry_on_Irrigated_Lands_in_Northern_India_Colombo_Sri_Lanka). Page consultée le 15 novembre 2024.

BIBLIOGRAPHIE

- Blank, K., Nerbonne, J.F., Vondracek, B. (2002). Relationship of riparian buffer type to water temperature in the driftless area ecoregion of Minnesota. *Fisheries Management*, 22(2) : p. 441-451.
- Dussault, A., Côté, Y., Laberge, G., Blanchette, F., Côté, J.-F., Leblond, J., Lemieux, É., (2013). *Protection des habitats du saumon atlantique des cours d'eau du milieu forestiers : Propositions de nouvelles modalités de protection : Impact sur la possibilité forestière et sur certaines variables économiques*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, [En ligne]. (<https://www.oifq.com/images/pdf/4-cote.pdf>). Page consultée le 25 août 2024.
- Furois, V. (2021). Aménagements pour le saumon, adaptés à l'hydrologie de la rivière Ouelle, *Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR)*. [En ligne] (<https://www.obakir.qc.ca/wp-content/uploads/2022/05/rapport-suivi-biologique-refuges-thermiques.pdf>). Page consultée le 23 juin 2024.
- Gagnon, F. (2015). *Plan d'action pour la conservation et la mise en valeur de la biodiversité dans le tronçon agricole de la rivière Ouelle, rapport préliminaire, Mars 2015*. Organisme de bassins versants de Kamouraska, L'Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR). 23 p.
- Gidas, N. (1985). *Étude sur les inondations causées par les débâcles et la sédimentation (Rivière Ouelle, municipalité de Saint-Pacôme, comté de Kamouraska)*. Ministère de l'Environnement. Direction des études du milieu aquatique. 37 pages.
- Harra, Abderrahim. (1996). *Minéralogie et géochimie des pélites de la formation de la rivière Ouelle, Appalaches du Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise. Québec : Université du Québec à Chicoutimi – Sciences de la Terre. [En ligne]. (<https://constellation.uqac.ca/id/eprint/1131/1/1529538.pdf>). Page consultée le 11 juillet 2024.
- Québec. Cabinet du ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs. (2017). 7.5 millions de dollars sur cinq ans pour le développement de la pêche au saumon atlantique, *CISION*, novembre, [En ligne]. (<https://www.newswire.ca/fr/news-releases/75-millions-de-dollars-sur-cinq-ans-pour-le-developpement-de-la-peche-au-saumon-atlantique-655849043.html>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Québec. Cabinet du ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs. (2022b). Québec investit plus de 2.7 M\$ pour favoriser la pratique de la pêche en partenariat avec la Fédération québécoise pour le saumon atlantique, *CISION*, juin, [En ligne]. (<https://www.newswire.ca/fr/news-releases/quebec-investit-plus-de-2-7-m-pour-favoriser-la-pratique-de-la-peche-en-partenariat-avec-la-federation-quebecoise-pour-le-saumon-atlantique-871931603.html>). Page consultée le 15 décembre 2023.
- Tricard, J. (1960). Les types de lits fluviaux, *L'information géographique*, [En ligne]. (https://www.persee.fr/doc/ingeo_0020-0093_1960_num_24_5_2025#:~:text=La%20hi%C3%A9rarchie%20chenal%2C%20lit%20mineur,rythme%20des%20variations%20de%20d%C3%A9bit). Page consultée le 14 août 2024.
- Wilkerson, E. Hagan, J.M, Whitman, A. A. 2006. The effectiveness of different buffer widths for protecting headwater stream temperature in Maine. *Forest Sci*, 55(3): p. 221-231.