

Juin 2024



REFUGES THERMIQUES
POUR L'OMBLE DE FONTAINE
DANS LE BASSIN
DE LA PETITE RIVIÈRE EUSÈBE
Étude d'avant-projet



Cégep de St-Félicien

En partenariat avec

Le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO)

REFUGE THERMIQUE POUR L'OMBLE DE FONTAINE DANS LE BASSIN DE LA PETITE RIVIÈRE EUSÈBE

Étude d'avant-projet

Présentée à

La Fondation de la faune du Québec

et

**Au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements
climatiques, de la Faune et des Parcs**

Juin 2024

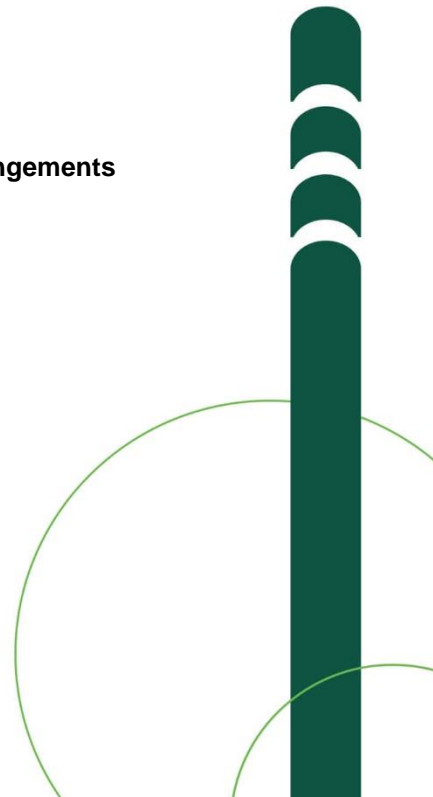




Photo de couverture :

Annie Ménard et Luc Lamontagne

Référence à citer :

LAMONTAGNE L. ET A. MÉNARD. 2024. Refuge thermique pour l'omble de fontaine dans le bassin versant de la Petite rivière Eusèbe— Étude d'avant-projet. Rapport présenté à la Fondation de la faune du Québec et au ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, Cégep de St-Félicien, Québec, 51 pages.

Cégep de St-Félicien

1105, boulevard Hamel, Saint-Félicien (Québec) CANADA, G8K 2R8 Tél. : 418 679-5412 ~ info@cegepstfe.ca

ÉQUIPE DE RÉALISATION

CÉGEP DE ST-FÉLICIEN

Luc Lamontagne : responsable du projet et rédacteur, B. Sc. (biologiste)

Annie Ménard : responsable du projet et rédactrice, B. Sc. (biologiste), M. Sc. (Sciences de la terre)

Cindy Bouchard et Gino Bergeron : révision linguistique

Josie Deschênes : traitement de texte et mise en page

Julie Gagnon : mise en forme du document

PARTENAIRES



Fondation de la faune du Québec



cerfo

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la Fondation de la faune du Québec, le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) et le Cégep de St-Félicien pour le soutien financier et humain qui nous a été accordé pour la réalisation de ce projet. Nous tenons également à remercier notre partenaire, le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO), ainsi que monsieur Julien Walter, professeur dans le Département des sciences appliquées de l'Université de Québec à Chicoutimi (UQAC), pour leur généreuse contribution technique et scientifique au projet. Enfin, nous tenons à ajouter la contribution de Karine Laprise et Marjolaine Veilleux, techniciennes en travaux pratiques, à l'analyse de la physicochimie de l'eau de la rivière : un grand merci pour votre aide.

TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE	1
1. INTRODUCTION	5
1.1 TEMPÉRATURE DE L'EAU ET REFUGES THERMIQUES	5
1.2 IDENTIFICATION DES REFUGES THERMIQUES	7
1.3 OBJECTIFS	7
2. LOCALISATION	9
3. MÉTHODOLOGIE	11
3.1 PORTRAIT THERMIQUE DES EAUX DE SURFACE	11
3.2 TÉLÉDÉTECTION THERMIQUE	12
3.3 CARACTÉRISATION DES SITES DE RÉSURGENCES POTENTIELLES	13
3.4 CHOIX DU SITE POUR LA PROPOSITION D'AMÉNAGEMENT	14
4. PORTRAIT THERMIQUE DES EAUX DE SURFACE	17
5. CARACTÉRISATION	19
6. CONCEPT D'AMÉNAGEMENT DU REFUGE THERMIQUE	29
6.1 DESCRIPTION DE LA RÉSURGENCE	29
6.2 DESCRIPTION DU RUISSEAU DROITE	31
6.3 PARAMÈTRES PHYSICOCHIMIQUES	32
6.4 PROPOSITION D'AMÉNAGEMENT	34
6.5 ÉCHÉANCIER, ÉVALUATION DES COÛTS ET SUIVI	40
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	43
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	CARACTÉRISTIQUES PROVENANT DE L'ANALYSE D'IMAGES THERMIQUES DES RÉSURGENCES POTENTIELLES IDENTIFIÉES EN TERMES DE DIFFÉRENTIEL DE TEMPÉRATURE ET DE SURFACE D'INFLUENCE (VOL AUTOMNAL).....	21
TABLEAU 2	CARACTÉRISATION DES 12 SITES DE RÉSURGENCES POTENTIELLES IDENTIFIÉS PAR TÉLÉDÉTECTION THERMIQUE, CARACTÉRISATION EFFECTUÉE PAR PHOTOINTERPRÉTATION ET PRISES DE DONNÉES.....	24
TABLEAU 3	PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA RÉSURGENCE NUMÉRO 3 ET DU RUISSEAU DROITE	32
TABLEAU 4	ÉCHÉANCIER ET ÉVALUATION DES COÛTS DES TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT DU REFUGE THERMIQUE	41

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	SCHÉMA DES MÉCANISMES POUVANT INDUIRE LA DIVERSITÉ THERMIQUE DANS UNE RIVIÈRE ET QUI ONT LA POSSIBILITÉ DE CRÉER UN REFUGE THERMIQUE (FIGURE TIRÉE INTÉGRALEMENT DE KURYLYK ET COLLAB., 2015)	6
FIGURE 2	LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE LA PETITE RIVIÈRE EUSÈBE, MRC DOMAINE-DU-ROY, RÉGION DU SAGUENAY—LAC-SAINT-JEAN, QUÉBEC	9
FIGURE 3	LOCALISATION DES SONDAS DE TEMPÉRATURE MISES EN PLACE ENTRE LE 29 MAI ET LE 7 NOVEMBRE 2023 SUR LE BASSIN DE LA PETITE RIVIÈRE EUSÈBE	12
FIGURE 4	LOCALISATION DES DIFFÉRENTS RELEVÉS THERMIQUES EFFECTUÉS DANS LE CADRE DU PROJET	13
FIGURE 5	SÉRIES DES TEMPÉRATURES MOYENNES QUOTIDIENNES CALCULÉES À CHACUNE DES STATIONS SUR LE BASSIN VERSANT DE LA PETITE RIVIÈRE EUSÈBE ENTRE LE 29 MAI ET LE 7 NOVEMBRE 2023	17
FIGURE 6	STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES TEMPÉRATURES RÉCOLTÉES PAR LA SONDE TIDBIT AUX STATIONS LOCALISÉES SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT DE LA PETITE RIVIÈRE EUSÈBE ENTRE LE 30 MAI ET LE 6 NOVEMBRE 2023. LES DIFFÉRENTES LETTRES INDIQUENT DES DIFFÉRENCES SIGNIFICATIVES ENTRE LES TEMPÉRATURES DE L'EAU DE SURFACE DES STATIONS	18
FIGURE 7	LOCALISATION DES SITES OÙ DES RÉSURGENCES POTENTIELLES ONT ÉTÉ DÉTECTÉES LORS DES DEUX SÉRIES DE VOLS EN ÉTÉ ET AUTOMNE	19
FIGURE 8	RÉSULTATS DES DEUX PREMIERS TRIS DES IMAGES THERMIQUES	20
FIGURE 9	LOCALISATION DES 12 SITES SÉLECTIONNÉS POUR CARACTÉRISATION DÉTAILLÉE SUR LE TERRAIN.....	21
FIGURE 10	LOCALISATION ET SENS D'ÉCOULEMENT DE LA RÉSURGENCE N° 3 EN LIEN AVEC LE RUISSEAU DROITE	30
FIGURE 11	CONCEPT ET CARACTÉRISTIQUES DE L'AMÉNAGEMENT PROPOSÉ À LA RÉSURGENCE N° 3 LOCALISÉE SUR LE RUISSEAU DROITE	38

MISE EN CONTEXTE

Depuis quelques années, l'aménagement de l'habitat aquatique au Québec est un domaine en pleine transformation, particulièrement en ce qui a trait à la faune aquatique en cours d'eau. Les aménagements traditionnellement conçus et approuvés par les instances gouvernementales ne font plus l'unanimité (seuils, frayères, déflecteurs, stabilisation de berges, nettoyage de cours d'eau, etc.). Même si leurs fondements ont été remis en question par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2021), les recommandations pour la planification et la conception d'aménagements pour l'omble de fontaine du ministère des Pêches et des Océans (Fleury et Boula, 2012) et le Guide de planification, de réalisation et d'évaluation d'aménagements (Fondation de la faune du Québec et ministère de l'Environnement et de la Faune, 1996) demeurent les principales références officielles encadrant la pratique des aménagements pour la faune aquatique en cours d'eau au Québec.

Historiquement, les travaux d'aménagements d'habitats aquatiques en cours d'eau ont mis l'accent sur la création ou la modification de formes fixes telles que des frayères à ouananiche ou omble de fontaine, des seuils en enrochement ou en bois, des déflecteurs ou des structures de stabilisation des berges. Généralement, ces formes ont des effets sur le cours d'eau à une échelle locale dans le bassin versant. Les projets sont essentiellement réalisés par des ingénieurs, des biologistes et des architectes paysagistes (Sears, 1994). Au cours des vingt dernières années, l'approche hydrogéomorphologique, visant avant tout la restauration des processus fluviaux, a progressivement fait sa place dans le domaine de l'aménagement de l'habitat aquatique (Adam et collab., 2007; Agence de l'eau Rhône-Méditerranées et Corse, 2011; Beechie et collab., 2010; Biron, 2017; Biron et collab., 2014; Biron et collab., 2017, Torgersen et collab., 2022; Malavoi et Adam, 2007; Marchand et collab., 2022; Peeters, 2020; Rolan-Meynard, 2019; The River Restoration Centre, 2021; Yochum et Reynolds, 2020). Tenir compte de l'hydrogéomorphologie en aménagement implique une approche plus intégrée qui considère le site dans sa globalité (à toutes les échelles spatiales du bassin versant) et à l'échelle de temps des processus et des interventions humaines (Grabowski et collab., 2014).

L'approche reconnaît l'état dynamique des rivières : elle permet d'établir un diagnostic aux multiples échelles (spatiales et temporelles) et d'identifier les éléments susceptibles de faire échouer le projet de restauration (Peeters, 2020). La science reconnaît également aujourd'hui l'importance des apports de bois sur la rive et dans le lit des cours d'eau (Boivin et collab., 2019; Piégay et collab., 2003; Roni et collab., 2015). Le bois en provenance de la bande riveraine exerce un rôle positif sur la dynamique et la biodiversité fluviale (Boivin et collab., 2019). Parmi les concepts de restauration de rivière, celui proposé par Whool et collab. (2015) regroupe des actions qui ont pour but de rétablir l'intégrité écologique dans un bassin versant dont l'état est dégradé, en restaurant les processus hydrologiques, géomorphologiques et écologiques nécessaires au maintien d'un écosystème naturel au sein du bassin et en réintroduisant les éléments biologiques disparus, endommagés ou menacés. Enfin, la restauration du biome (Johnston et collab., 2019) bonifie le concept de Whool et collab. (2015) quant à l'importance que revêt la résilience des cours d'eau face aux changements climatiques, à l'utilisation du territoire et au mode de gestion futur des rivières. Ce besoin d'améliorer la résilience des cours d'eau est aussi soutenu par Fuller et collab. (2019). Peu importe l'approche de restauration proposée, plusieurs reconnaissent l'importance d'une approche multidisciplinaire, agissant à plusieurs échelles spatio-temporelles (Johnston et collab., 2019; Speed et collab., 2016; Whool et collab., 2015). Dans un article, Szalkiewicz et collab. (2020) soulignent, de plus, l'importance d'incorporer le savoir local des communautés.

Enfin, le nouveau Guide des standards de pratique pour la restauration des écosystèmes, publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation (Nelson et collab., 2024), propose un cadre global pour la bonne pratique de projets de restauration. Avec la popularité de ces nouvelles tendances et leur adoption dans un cadre mondial, le gouvernement fédéral ou provincial devra lui aussi statuer sur les lignes directrices entourant les projets d'aménagement et de restauration d'habitat. En effet, pendant que le pays continue de se développer économiquement et que les projets de compensation d'habitat en milieu hydrique se multiplient, il devient très important d'élaborer de nouvelles lignes directrices relatives à l'aménagement et à la restauration des habitats aquatiques en cours d'eau. Les actions privilégiées pour maximiser la qualité des habitats aquatiques pourront ainsi être mises à la disposition des différents acteurs sur le territoire, et ce, afin d'assurer la mise en œuvre de projets cohérents qui auront un impact positif sur l'écosystème, que ce soit des projets élaborés sur une base volontaire ou dans le cadre d'un projet compensatoire.

C'est dans ce contexte de changement de paradigme sur l'aménagement de l'habitat aquatique, et sur le caractère quasi inéluctable du réchauffement climatique, qu'est né le présent projet d'aménagement d'un refuge thermique dans la Petite rivière Eusèbe (PRE).

L'année 2021 a été particulière pour l'ensemble des rivières du Québec en raison de l'hiver doux, de la faible abondance des précipitations printanières et des températures estivales chaudes (MELCC, 2022). Les cours d'eau ont donc vécu une crue printanière de très faible importance ainsi qu'un étiage estival prolongé (MELCC 2022), engendrant des températures de l'eau plus chaudes que la normale. Si la tendance actuelle se poursuit, ce climat anormalement clément devrait se répéter en 2024 alors qu'au moment d'écrire ces lignes, le Québec vit son hiver le plus doux depuis 80 ans. Selon l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional, les changements futurs du climat seront variables en fonction des saisons et des régions (MELCCFP, 2024). Toutefois, le portrait climatique du Québec, élaboré par le Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques (Ouranos, 2024) à partir du scénario le plus probable d'émissions de gaz à effet de serre est sans équivoque: le Québec n'échappera pas au réchauffement climatique. Dans le scénario actuel des émanations de gaz à effet de serre (scénarios d'émissions élevées), les températures moyennes quotidiennes pourraient s'élever de plus de 4 °C d'ici cinquante ans (Ouranos, 2024). Il est donc justifié de dire que les rivières se réchauffent et qu'elles continueront de se réchauffer, transformant progressivement la nature et la qualité des habitats aquatiques (Whitehead et collab., 2009).



1. INTRODUCTION

La Petite rivière Eusèbe coule principalement en milieu agricole, à proximité de la ville de Saint-Félicien, au Saguenay—Lac-Saint-Jean. Depuis 2017, ce cours d'eau fait l'objet d'une démarche de valorisation ayant pour but de mettre en lumière son potentiel de maintien d'une biodiversité aquatique. Entre autres, de nombreux inventaires de poissons ont été effectués afin de caractériser sa composition en espèces et leur abondance relative dans la rivière (Ménard et Lamontagne, 2024). Ces inventaires ont permis de mettre en évidence la présence significative de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) dans le cours d'eau (Ménard et Lamontagne, 2024). Cette espèce, considérée comme un poisson d'eau froide, est sensible à la température de l'eau et croît de manière optimale à des températures qui varient entre 10 °C et 19 °C (Lacasse et Magnan, 1994). Au-delà de 22 °C, la croissance de l'omble de fontaine ralentit (Chadwick et McCormick, 2017). En effet, les températures élevées induisent une réponse de stress aux niveaux cellulaire et endocrinien (Chadwick et McCormick, 2017). Les résultats d'une étude en lac menée par Goyer en 2012 indiquent que lorsque les températures sont supérieures à 22,4 °C, l'omble de fontaine évite le secteur. Une température qui excède 24 °C est considérée comme létale pour le poisson (Jonsson et Jonsson, 2009; Raleigh, 1982).

Ainsi, afin de mieux évaluer la qualité de l'habitat de l'omble de fontaine, une sonde thermique a été installée près de l'embouchure de la Petite rivière Eusèbe, entre le 19 juin et le 17 novembre 2021. Les données enregistrées ont alors permis de constater que la température maximale quotidienne a dépassé 20 °C à quelques reprises au cours du mois d'août (données non publiées). Ces dépassements laissent présager que ce seuil a pu également être dépassé à plusieurs endroits ou occasions dans le bassin versant plus en amont. Ces dépassements permettent également de se questionner sur la pérennité de l'espèce dans le bassin de la Petite rivière Eusèbe ainsi que sur les aménagements d'habitats possibles.

1.1 Température de l'eau et refuges thermiques

La température de l'eau a un impact sur la qualité de l'habitat du poisson (Whitehead et collab., 2009). En effet, elle affecte de manière importante les poissons d'eau douce en ce qui a trait à leur croissance, à leur survie et à leurs caractéristiques démographiques (Jackson et collab., 2016). Il faut dire que l'oxygène dissout se retrouve en moins grande concentration dans de l'eau dont la

température est plus élevée (Ozaki et collab., 2003). De plus, les périodes les plus chaudes de l'année provoquent un stress thermique chez plusieurs espèces de poissons (Isaak et collab., 2012). La réponse à ce stress chez les salmonidés ne dépend pas uniquement de la température absolue de l'eau, mais aussi de la rapidité avec laquelle la température de l'eau augmente (Quigley et Hinch, 2006). Par conséquent, lors d'une hausse importante de la température, ces espèces vont chercher, lorsqu'ils sont disponibles, des refuges thermiques pour se protéger (Dugdale et collab., 2013; Wilbur et collab., 2020). Ainsi, il a été démontré que lors d'épisodes météorologiques particulièrement chauds, le saumon atlantique utilise de manière opportuniste les variations spatiales de l'habitat thermique (Breau et collab., 2007; 2011) en sélectionnant des petites zones d'eau fraîche. Il semble que ces zones jouent un rôle important dans la réduction des effets nuisibles des températures élevées sur les populations de cette espèce (Torgersen et collab., 2012).

Les principales caractéristiques qui définissent un refuge thermique ont été identifiées et catégorisées dans plusieurs études. Elles ont également été illustrées par Kurylyk et ses collaborateurs (2015) dans une étude visant à présenter des concepts pour préserver, augmenter et créer des refuges thermiques en rivière (Figure 1). En effet, les refuges peuvent être créés par l'arrivée d'un petit cours d'eau plus frais créant un panache de température plus froide, par la stratification thermique de la colonne d'eau (pour les rivières à grand débit avec des fosses profondes), par la présence d'un couvert (végétation, berge en surplomb), par la présence d'une alcôve, de zones hyporhéiques ou encore par des apports en eaux souterraines (Bilby, 1984; Dugdale, 2014; Ebersole et collab. 2003; Nielson et collab. 1994). Ces mêmes études ont défini un refuge thermique comme étant un endroit où la température de l'eau est minimalement de 3 °C de plus frais que la température ambiante du cours d'eau (lors des périodes chaudes), avec une surface $\geq 0,5 \text{ m}^2$, et avec un niveau d'oxygène dissout $\geq 3 \text{ mg/l}$.

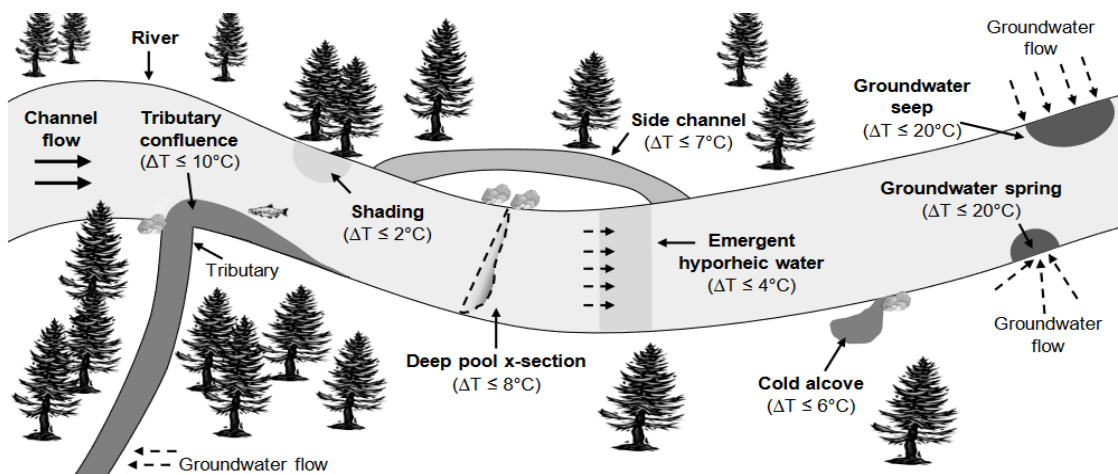


Figure 1 Schéma des mécanismes pouvant induire la diversité thermique dans une rivière et qui ont la possibilité de créer un refuge thermique (figure tirée intégralement de Kurylyk et collab., 2015)

1.2 Identification des refuges thermiques

L'identification des refuges thermiques en rivière représente un défi d'envergure. Il est difficile de déceler l'hétérogénéité des températures en utilisant seulement des sondes thermiques ou des données discrètes sans avoir des informations préalables sur la localisation des zones plus froides (Dole-Olivier et collab., 2019; Wawrzyniak et collab., 2016). Dans une étude, Ebersole et ses collaborateurs (2003) mentionnent que les refuges thermiques ont été détectés en premier lieu par une personne se déplaçant vers l'amont en balayant transversalement la surface du lit du cours d'eau avec un thermomètre digital attaché à une tige de 5 m de longueur. Lorsque des différences de température étaient détectées, une sonde de température était alors installée à l'endroit identifié pour un suivi à plus long terme (Ebersole et collab., 2003). Comme cette méthode est longue, l'utilisation de la télédétection thermique peut être utile pour mettre en évidence la distribution spatiale de la chaleur rayonnante et pour déceler certaines anomalies thermiques (Torgersen et collab., 2001). En mode aéroportée, la télédétection thermique est suffisamment précise pour évaluer la variabilité thermique sur une échelle de plusieurs kilomètres (Burkholder et collab., 2008; Casas-Mulet et collab., 2020; Cristea et Burges, 2009; Dole-Olivier et collab., 2019; Dugdale, 2014; Dugdale et collab., 2015; Loheide et Gorelick, 2006; Tan et Cherkauer, 2013; Tonolla et collab., 2012; Torgersen et collab., 2001; Wilbur et collab., 2020). Cette méthode permet de cartographier le portrait thermique complet d'une rivière avec une rapidité dans l'acquisition des données (Dole-Olivier et collab., 2019). Il a également été démontré que les images thermiques peuvent être utilisées avec succès dans des cas concrets pour localiser des refuges thermiques (Casas-Mulet et collab., 2020; Dole-Olivier et collab., 2019; Dugdale et collab., 2013; Dugdale et collab., 2015; Monk et collab., 2013, Torgersen et collab., 2001, Wawrzyniak et collab., 2013; 2016; Wilbur et collab., 2020).

1.3 Objectifs

L'objectif de la présente étude était d'appliquer la télédétection thermique par drone pour détecter et localiser les résurgences d'eau souterraine à l'échelle du bassin versant d'une petite rivière agricole. L'étude visait ensuite à identifier les résurgences montrant un potentiel pour l'aménagement de refuges thermiques pour l'omble de fontaine. Enfin, l'étude visait à nourrir les réflexions en ce qui a trait à l'aménagement d'habitats aquatiques en proposant un aménagement possible de refuge thermique pour poisson.



2. LOCALISATION

La Petite rivière Eusèbe se situe dans la ville de Saint-Félicien appartenant à la MRC Le Domaine-du-Roy, dans la région du Saguenay—Lac-Saint-Jean (Figure 2). La rivière, tributaire de la rivière Ashuapmushuan, irrigue une superficie d'environ 60 km². Malgré une pente (1%) et un débit moyen plutôt faible (0,5 m³/s), la rivière se comporte de manière torrentielle en affichant des augmentations et des diminutions subites des niveaux d'eau en crue. La rivière prend sa source en milieu forestier dans la ceinture de collines entourant le lac Saint-Jean. Elle transite en zone agricole dans la plaine du lac Saint-Jean, puis dans la forêt d'enseignement et de recherche des chutes à Michel (FERCM), avant de terminer sa route au cœur de la ville de Saint-Félicien. Les eaux de la rivière sont relativement turbides puisque le substrat de son lit est majoritairement composé de sédiments fins (argile, limon et sable fin).

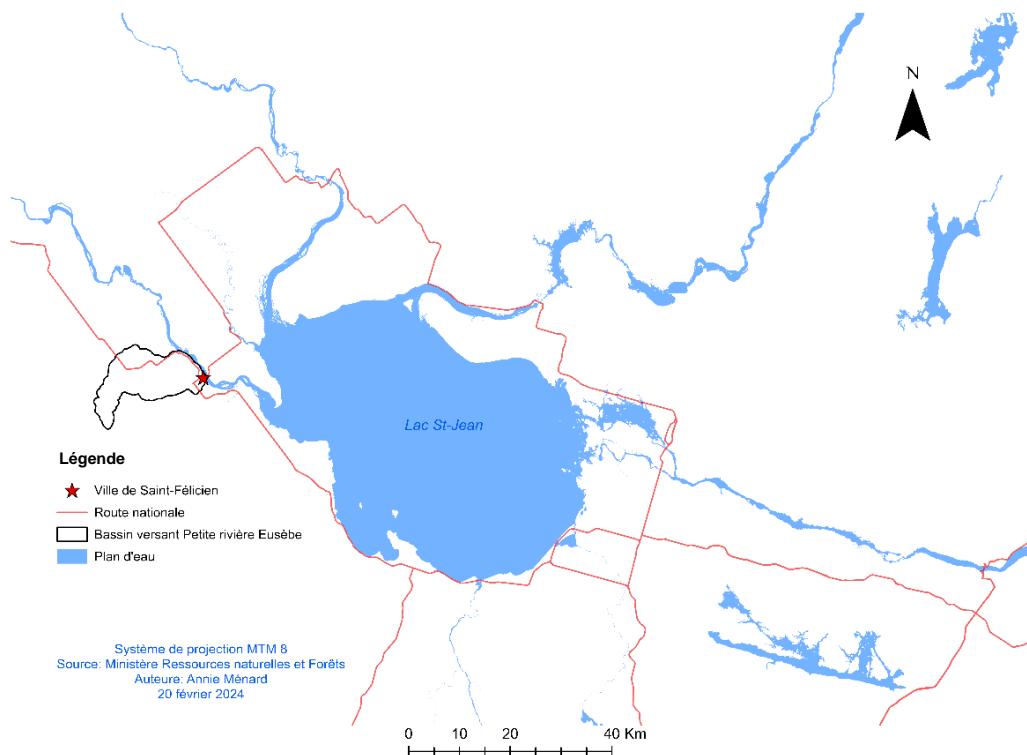


Figure 2 Localisation du bassin versant de la Petite rivière Eusèbe, MRC Domaine-du-Roy, région du Saguenay—Lac-Saint-Jean, Québec



3. MÉTHODOLOGIE

La méthode utilisée pour réaliser le projet a été divisée en quatre étapes distinctes, soit la caractérisation de la température des eaux de surface, la détection des résurgences potentielles au moyen de la télédétection thermique, la caractérisation de ces résurgences potentielles et, enfin, la proposition du concept d'aménagement.

3.1 Portrait thermique des eaux de surface

Afin de caractériser la température des eaux de surface sur le bassin versant de la Petite rivière Eusèbe, 15 thermographes (Onset TID BIT) ont été positionnés de manière à cartographier l'ensemble des branches principales du bassin. Toutes les sondes ont été attachées à des tiges de métal plantées au centre du cours d'eau, à 15 cm de la surface, dans un chenal présentant de l'écoulement laminaire. Une sonde de température et de niveau d'eau (Sonde de niveau d'eau Hobbo) a également été installée à l'embouchure du cours d'eau, à l'intérieur du ponceau traversant le boulevard Saint-Félicien. Les 15 sondes dispersées sur le bassin ont enregistré la température de l'eau toutes les heures tandis que la sonde de niveau d'eau a été programmée pour enregistrer toutes les quatre heures. Les sondes ont été laissées en place entre le 29 mai et le 7 novembre 2023. La figure 3 présente la localisation des sondes.

Pour fin d'analyses, chaque série d'enregistrement de température a été soumise à un test pour vérifier la normalité (test de Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$, $p < 0,0001$). Un test non paramétrique de Friedman pour échantillons appariés (procédure répétée) a aussi été fait pour évaluer la similitude des échantillons ($\alpha = 0,05$, $p < 0,0001$). Des comparaisons multiples par paires ont ensuite été effectuées (procédure Nemenyi). L'ensemble des tests statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel XLSTAT.

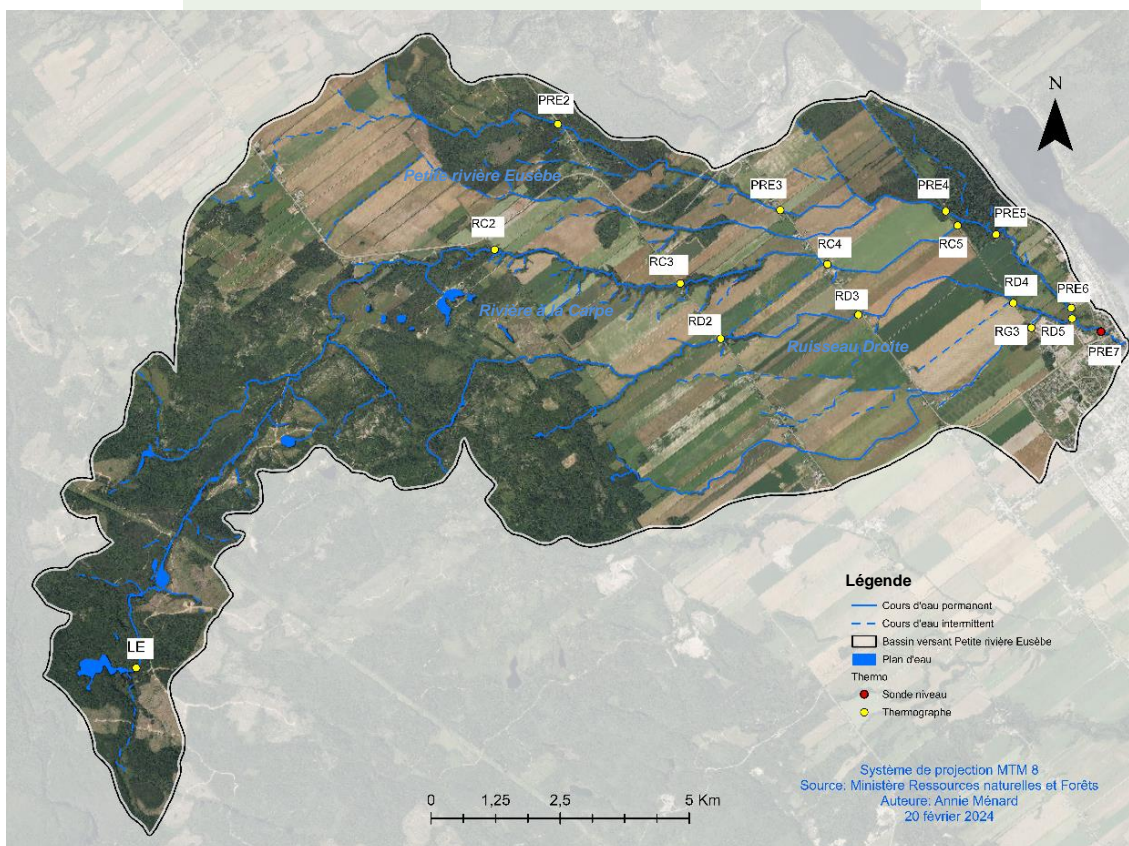


Figure 3 Localisation des sondes de température mises en place entre le 29 mai et le 7 novembre 2023 sur le bassin de la Petite rivière Eusèbe

3.2 Télédétection thermique

L'identification des résurgences potentielles d'eaux souterraines a été effectuée en premier lieu par l'application de télédétection thermique par drone. Les relevés ont été effectués par le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy (CERFO; Bour et collab. 2024). La méthode ainsi que l'ensemble des travaux d'analyse effectués par le CERFO sont présentés de manière détaillée dans leur rapport technique (Bour et collab. 2024). En résumé, la zone d'étude couverte par télédétection infrarouge correspond à 16 km linéaires de cours d'eau (Figure 4). Cette section de cours d'eau présente une largeur moyenne de 3,5 mètres. La canopée y est présente et recouvre parfois presque la totalité de la rivière. Une première série de relevés thermiques par drone a été effectuée le 20 septembre dans cinq secteurs de la rivière totalisant un peu plus de 2 km linéaires de cours d'eau. Ces relevés ont servi à paramétrer l'appareil pour l'acquisition adéquate d'images. Les relevés thermiques estivaux ont été effectués entre le 24 et le 27 juillet

2022. Enfin, un relevé thermique a également été effectué à l'automne, soit le 13 novembre 2023, dans certains secteurs clés de la rivière, totalisant près de 5 km linéaires de cours d'eau. En ce qui a trait aux analyses des images thermiques estivales, elles ont porté sur la recherche de zones significativement plus froides que la température ambiante du cours d'eau. Comme la température d'une résurgence est plus stable annuellement que celle des eaux de surface, l'analyse des images automnales s'est effectuée à l'inverse, par la recherche de zones plus chaudes. Au total, 73 résurgences potentielles ont été identifiées par cette méthode.

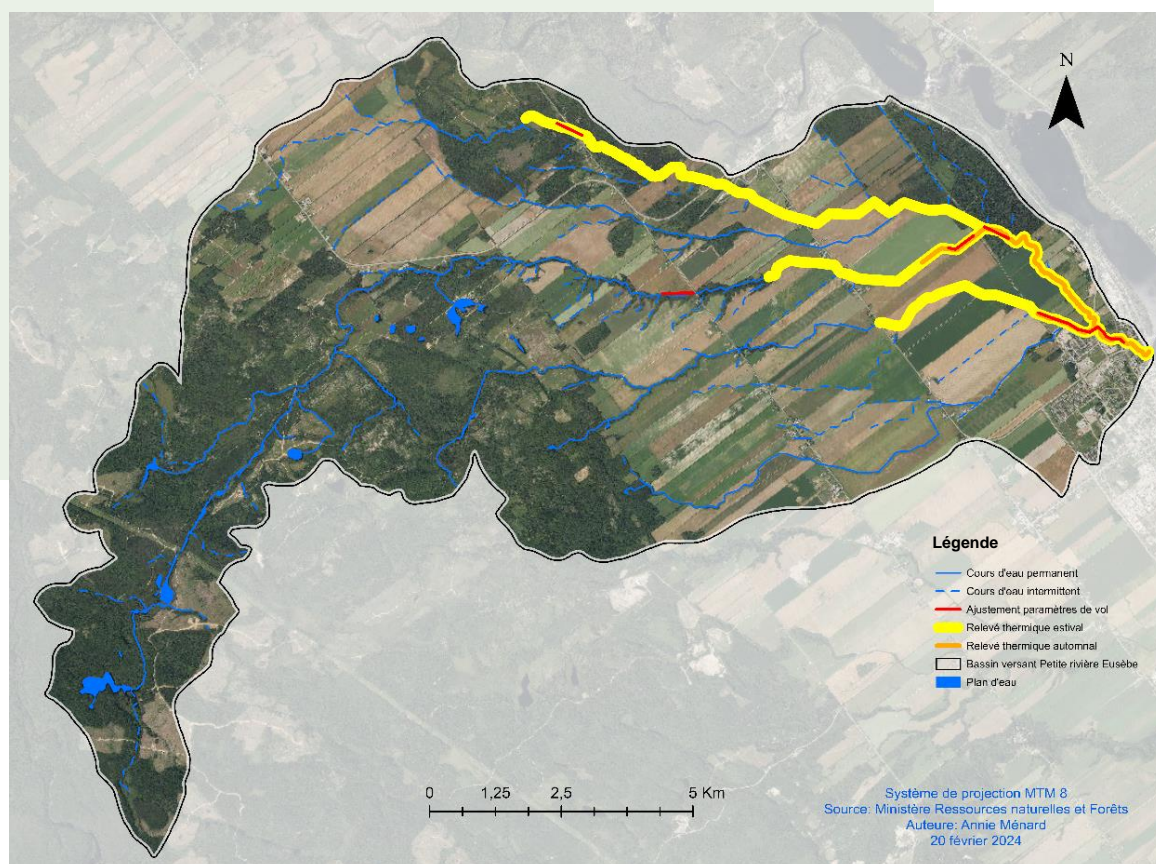


Figure 4 Localisation des différents relevés thermiques effectués dans le cadre du projet

3.3 Caractérisation des sites de résurgences potentielles

Afin de valider la nature réelle des résurgences potentielles, les 73 sites identifiés par imagerie thermique ont fait l'objet de tris par la photointerprétation des images et par l'analyse spatiale en utilisant le logiciel de géomatique ARC GIS PRO.

Le premier tri a été effectué par photointerprétation afin de retirer les sites qui ne correspondaient pas de manière certaine à des résurgences d'eaux souterraines. À cet effet, sept sites ont été attribués à des effluents ou conduites d'eaux pluviales et 14 autres à du drainage agricole. Bien que le drainage agricole puisse constituer une avenue possiblement intéressante en aménagement d'habitat, ces sites n'ont pas été retenus. Par la suite, sept résurgences potentielles qui affichaient un écoulement diffus et quatre autres, qui se situaient trop en rive et n'avaient pas de lien hydrique direct avec le cours d'eau (au moment de la prise d'images), ont également été retirées du lot. Enfin, les 41 sites de résurgences potentielles restants ont ensuite été analysés en fonction de leur superficie et du différentiel de température avec le cours d'eau adjacent. En ce sens, un dernier tri a été effectué afin de sélectionner les sites affichant les caractéristiques les plus favorables pour un projet d'aménagement. Ainsi, 12 sites affichant à la fois une superficie de plus de 1 m² et un différentiel de température avec le cours d'eau de 2 °C et plus ont été sélectionnés pour une caractérisation terrain afin de valider la nature des résurgences potentielles. Il est à noter que ce différentiel de température s'est majoritairement basé sur les données automnales alors que le cours d'eau était plus chaud que les résurgences; il est attendu que l'écart augmente en été lors des périodes de canicule.

Une première étape de reconnaissance sur le terrain a été effectuée le 2 octobre 2023 dans un secteur du ruisseau Droite qui affichait, dès les premiers relevés thermiques, un écoulement significatif. La caractérisation sur le terrain de l'ensemble des 12 résurgences potentielles s'est complétée le 10 mai 2024. Chaque site a fait l'objet d'une reconnaissance dans l'objectif d'identifier précisément la source et la nature de l'écoulement. Des photos ont été prises pour fin de documentation. Enfin, certains paramètres physicochimiques tels que la température, le pH, la conductivité et l'oxygène dissout ont été mesurés *in situ* au moyen d'un multiparamètres ProDSS. De plus, quelques prélèvements d'eau ont été effectués selon le protocole de suivi de la qualité de l'eau des rivières et petit cours d'eau de Hébert et Légaré (2000). Les analyses des différents paramètres de la qualité de l'eau ont été effectuées moins de 24 heures après leur récolte au cégep de St-Félicien, en conformité avec les protocoles respectifs aux analyses du Centre d'expertise en analyse environnementale (CEAEQ 2022). Ainsi, les concentrations en phosphore, en nitrites et nitrates, ainsi qu'en coliformes fécaux ont pu être déterminées au site de la résurgence.

3.4 Choix du site pour la proposition d'aménagement

Le choix du site potentiel pour l'aménagement a été basé principalement sur la capacité des résurgences à pouvoir modifier considérablement les températures dans leur environnement immédiat, et ce, sur la plus grande superficie possible. En effet, le but est d'aménager ou d'améliorer un habitat propice pour les poissons, particulièrement l'omble de fontaine, en tirant

profit d'une résurgence naturelle. Ainsi, plus l'étendue du panache visible (correspondant à un différentiel de température) sur les images thermiques était importante, plus le potentiel de réaliser un aménagement bénéfique pour les communautés de poissons fréquentant la zone était élevé.

Des critères propres à la construction de l'aménagement ont également été pris en considération pour la faisabilité de l'aménagement, tels que :

- L'accessibilité au site et le statut foncier des terres
- La disponibilité et la quantité de matériaux granulaire utilisable sur place
- La possibilité d'utiliser de la machinerie lourde, si nécessaire lors de la construction
- Ainsi que la pérennité et l'intégrité de l'aménagement à long terme

En ce qui concerne les caractéristiques propres à l'habitat du poisson, le site retenu a été caractérisé de manière détaillée lors des visites de terrain du 2 octobre 2023 et du 10 mai 2024. La portion d'écoulement correspondant à la résurgence même ainsi que le tronçon du ruisseau Droite vers lequel s'écoule la résurgence ont été caractérisés. Au total, 400 mètres linéaires du ruisseau droite ont été parcourus, soit 200 mètres en amont et 200 en aval de la résurgence. Les paramètres suivants ont été mesurés :

Caractéristiques générales

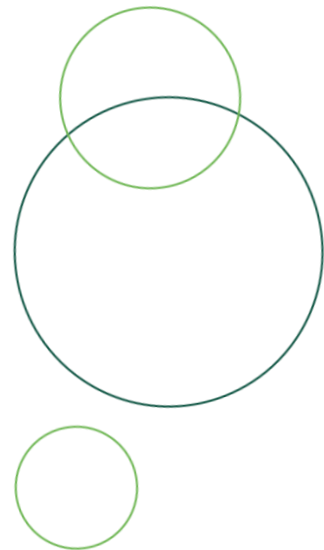
- Les longueurs, largeurs et profondeurs moyennes (m) du tronçon
- Le faciès d'écoulement
- La vitesse d'écoulement moyenne (m/s) (à l'aide d'un courantomètre)

Caractéristiques de la rive

- La hauteur du talus (m)
- Le pourcentage de talus en surplomb
- Le pourcentage d'érosion des rives
- La végétation riveraine dominante

Caractéristiques du lit

- La granulométrie (% de recouvrement par classe granulométrique)
- L'état du substrat
- La compaction du substrat
- La présence d'obstacles à la libre circulation du poisson



Caractéristiques de l'habitat du poisson

- La présence d'abris aquatiques (% de recouvrement)
- La présence de végétation en surplomb (% de recouvrement)
- La présence de végétation aquatique (% de recouvrement)
- La présence et les caractéristiques de zones de fraie potentielles



4. PORTRAIT THERMIQUE DES EAUX DE SURFACE

Cette section présente le portrait global de la rivière en ce qui concerne les températures des eaux de surface. Sur les 16 sondes installées dans le bassin de la Petite rivière Eusèbe, quatre n'ont pas été retrouvées dans le cours d'eau au moment de leur récupération à l'automne, soit celles des stations RC2, RD2, PRE5 et PRE6. Les températures moyennes quotidiennes sont illustrées sous forme de graphique à la Figure 5.

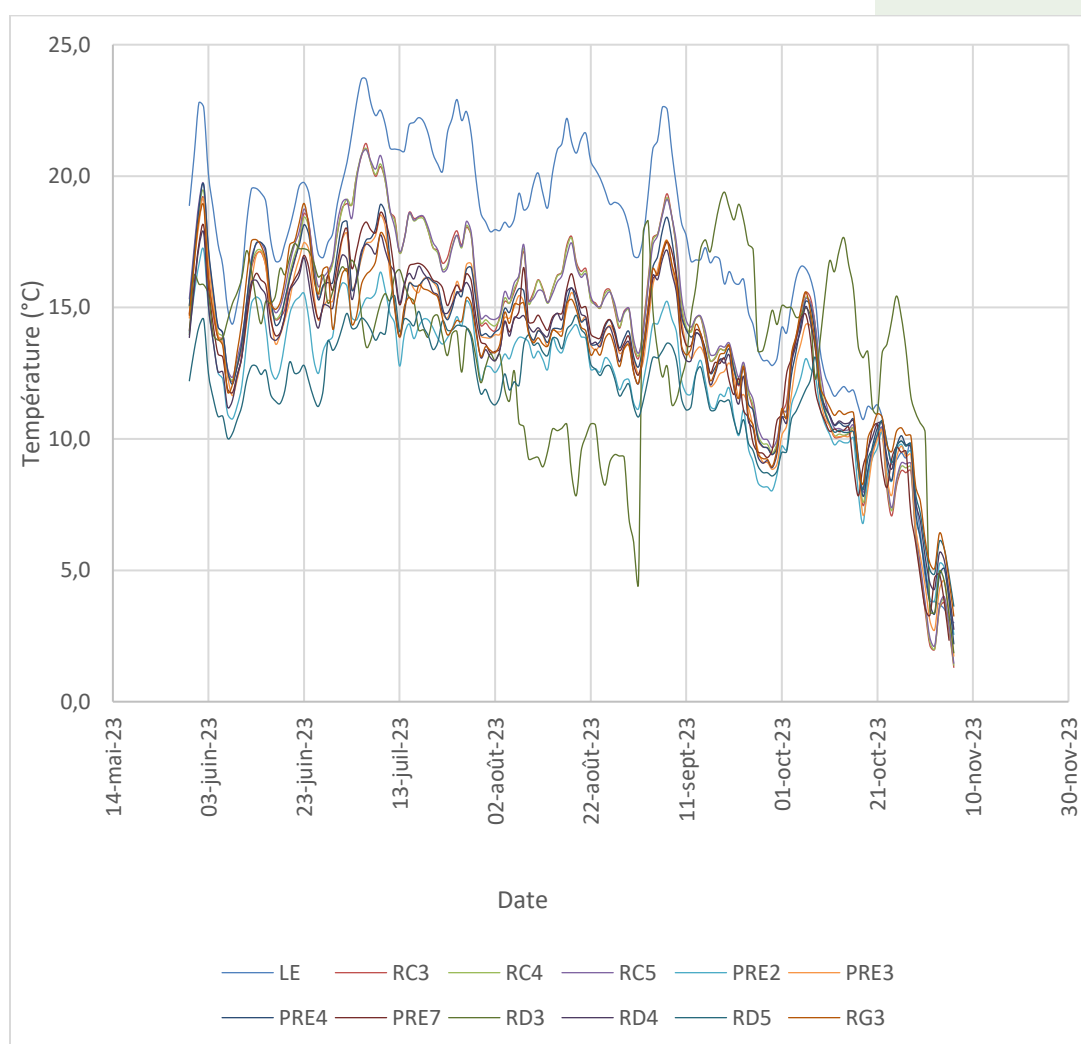


Figure 5 Séries des températures moyennes quotidiennes calculées à chacune des stations sur le bassin versant de la Petite rivière Eusèbe entre le 29 mai et le 7 novembre 2023

Cette figure montre que les températures varient tout au long de la saison en suivant des tendances similaires, à l'exception de la station RD3 située sur le ruisseau Droite. En effet, alors que l'ensemble des autres stations se réchauffent, cette dernière, à partir du début août, se refroidit graduellement, puis se réchauffe brusquement au début septembre. Des apports externes pourraient expliquer cette variation. La température moyenne quotidienne pour l'ensemble des stations varie entre 11,8 °C et 17,1 °C pour une moyenne globale de $13,8 \pm 3,8$ °C.

Afin de pouvoir afficher certaines tendances et différences, les données de température ont été regroupées et affichées sous forme de boîtes à moustache (Figure 6). En bref, la température des eaux de surface enregistrée en tête du bassin (LE) est significativement plus chaude que celles captées par l'ensemble des autres stations dispersées sur le bassin (moyenne quotidienne = 17,1 °C, $p < 0.0001$). Les stations PRE2 et RD5 sont, quant à elles, significativement plus froides que l'ensemble des autres stations (respectivement 12,2 °C et 11,8°C, $p < 0.0001$). Le ruisseau Droite affiche même une diminution des températures de l'amont vers l'aval.

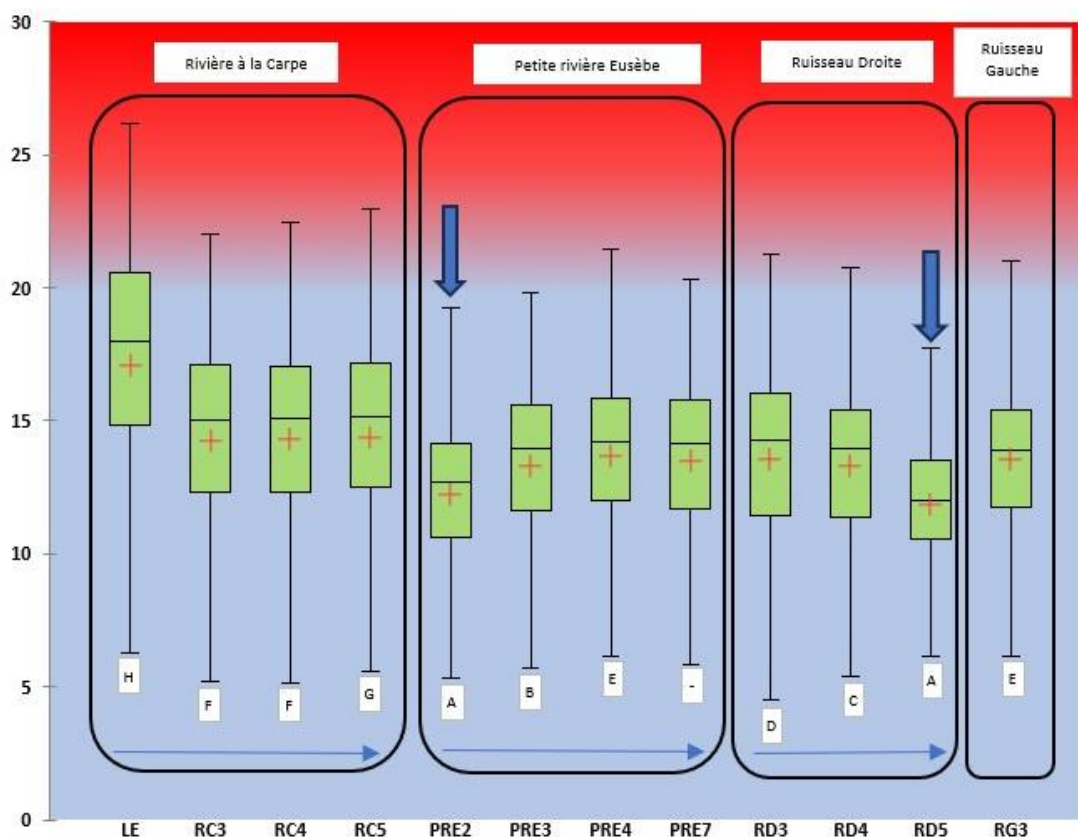


Figure 6 Statistiques descriptives des températures récoltées par la sonde TIDBIT aux stations localisées sur l'ensemble du bassin versant de la Petite rivière Eusèbe entre le 30 mai et le 6 novembre 2023. Les différentes lettres indiquent des différences significatives entre les températures de l'eau de surface des stations

5. CARACTÉRISATION

La figure 7 montre l'emplacement des 73 sites où des résurgences potentielles ont été identifiées à la suite de l'analyse des images thermiques (CERFO, 2024). L'analyse des images estivales a permis d'identifier huit sites de résurgences potentielles. Tous les sites ont à nouveau été identifiés à l'automne (à l'exception d'un seule qui se trouvait à l'extérieur de la zone couverte à l'automne). Le relevé automnal a permis la détection de 62 sites supplémentaires. En effet, l'absence de canopée couvrant le cours d'eau semble avoir favorisé la détection des résurgences potentielles à l'automne.

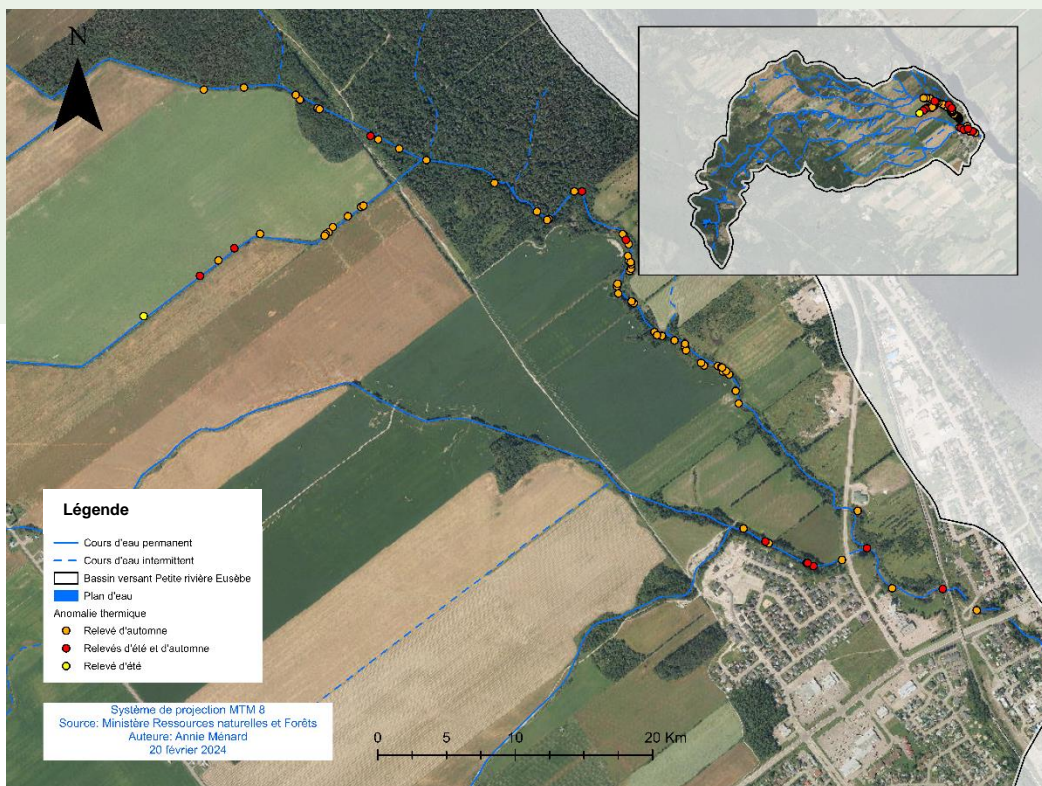


Figure 7 Localisation des sites où des résurgences potentielles ont été détectées lors des deux séries de vols en été et automne

La figure 8 montre les résultats des deux premiers tris. Comme indiqué dans la méthodologie (section 3.3), les sites présentant des caractéristiques qui semblaient résulter d'un drainage agricole (N=14) ont été enlevés, ainsi que les effluents externes (N=7). Les sites situés directement sur un lit d'écoulement potentiel (identifié par les produits dérivés du LIDAR) ont également été enlevés (N=4). Enfin, ceux dont la source semblait trop diffuse et non localisée ou qui ne présentaient pas de lien hydrique avec le cours d'eau au moment du vol ont été enlevés (N=7). Au total, 41 sites de résurgences potentielles ont donc été formellement identifiés.

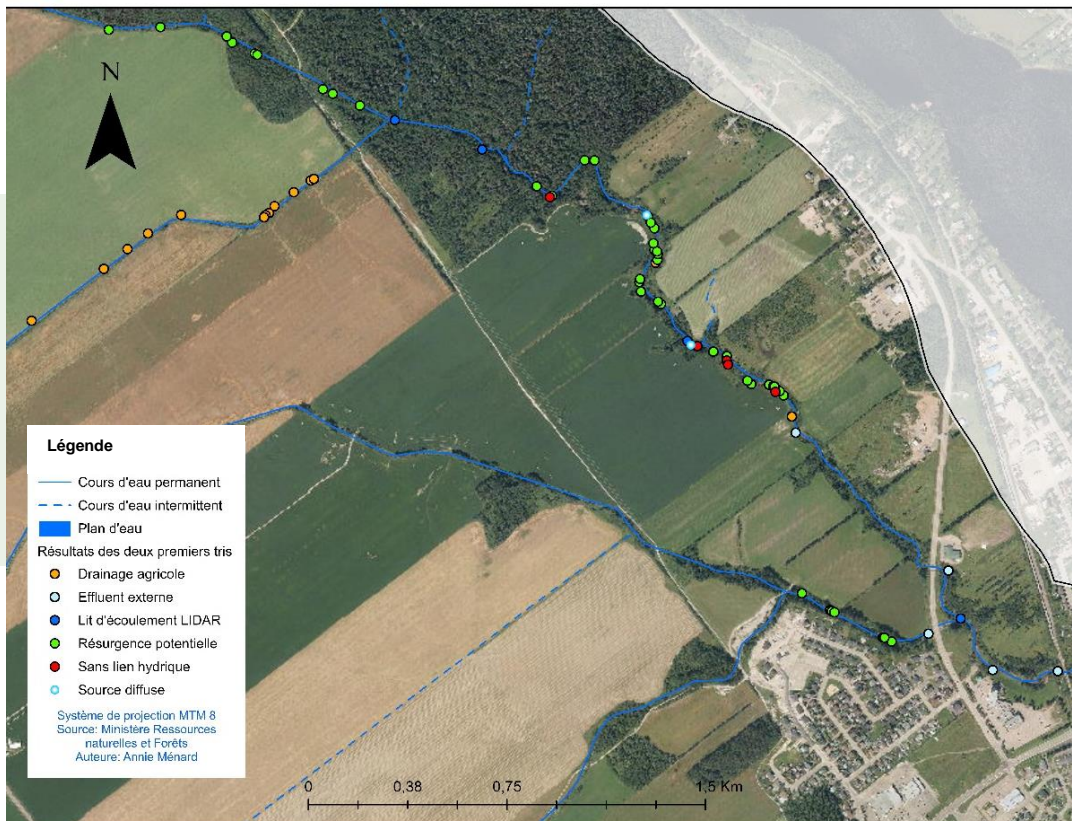


Figure 8 Résultats des deux premiers tris des images thermiques

Parmi les 41 sites de résurgences potentielles retenus, les données provenant de l'imagerie thermique ont permis de calculer le différentiel de température entre le site de la résurgence et le cours d'eau principal, qui a varié entre 0,5 °C et 4,7°C, pour une valeur moyenne de 2 °C (tableau 1; basé sur les données du vol automnal). La superficie de chaque résurgence potentielle a, quant à elle, été hautement variable en affichant des valeurs comprises entre 0,1 m² et 16,9 m², pour une moyenne de 0,6 m². En effet, la majorité des résurgences potentielles identifiées étaient de petite superficie au moment de l'analyse d'image.

Tableau 1 Caractéristiques provenant de l'analyse d'images thermiques des résurgences potentielles identifiées en termes de différentiel de température et de surface d'influence (vol automnal)

Statistique	Δt	Surface (m ²)
Nombre d'observations	41	41
Minimum	0,5	0,1
Maximum	4,7	16,9
1^{er} Quartile	1,0	0,3
Médiane	2,0	0,6
3^e Quartile	2,8	1,7
Moyenne	2,0	1,8
Variance (n-1)	1,0	11,1
Écart-type (n-1)	1,0	3,3

Enfin, parmi les 41 sites analysés, les 12 présentés à la figure 9 ont été sélectionnés pour une caractérisation détaillée sur le terrain. Dix des sites se trouvaient directement sur le bras principal de la Petite rivière Eusèbe et deux sur le ruisseau Droite.

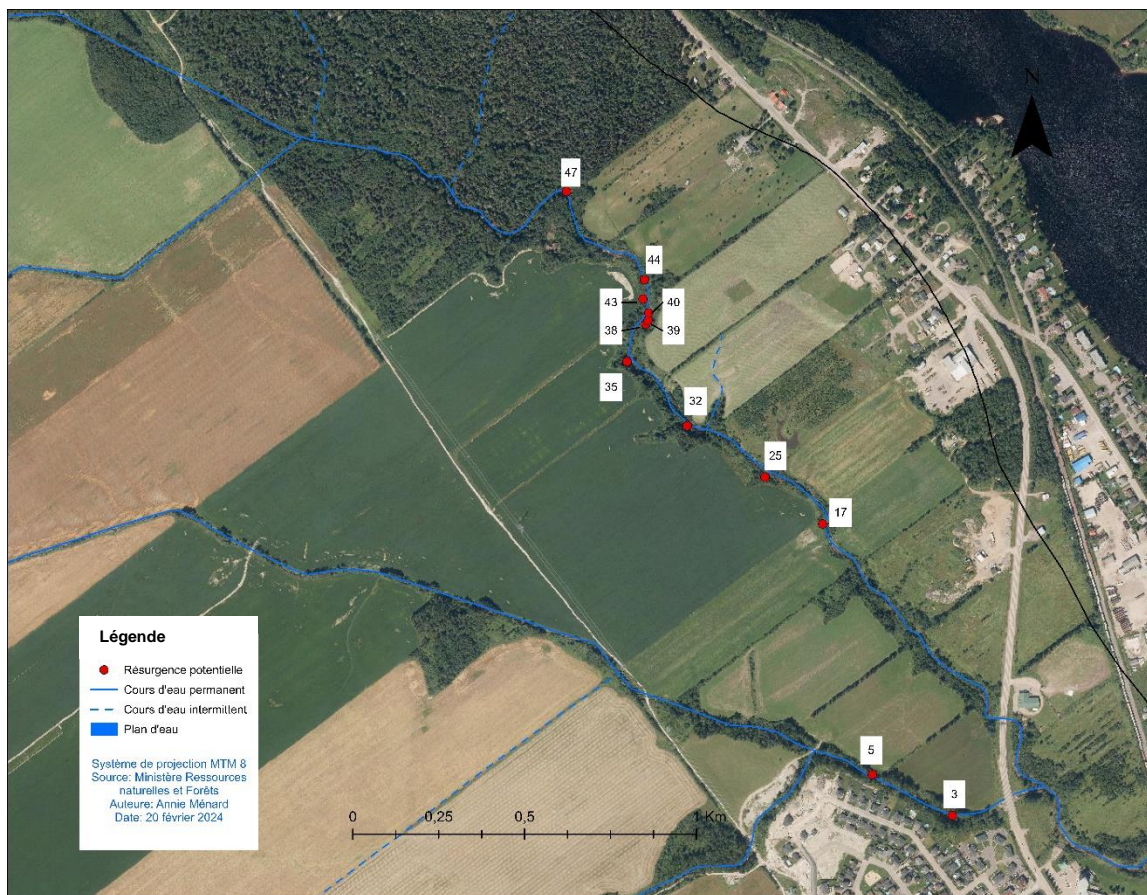


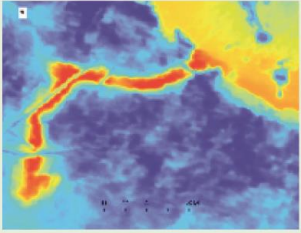
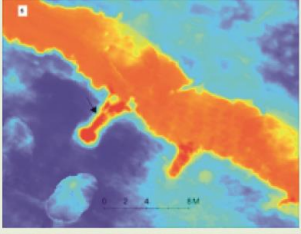
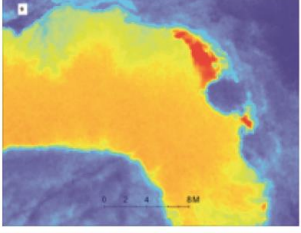
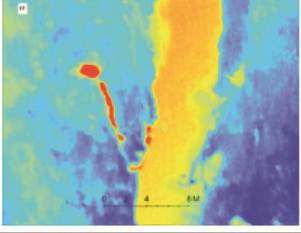
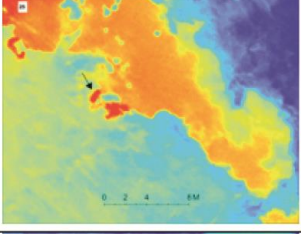
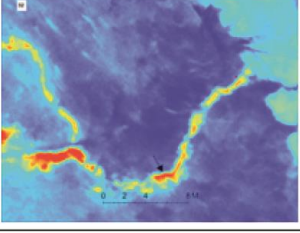
Figure 9 Localisation des 12 sites sélectionnés pour caractérisation détaillée sur le terrain



La caractérisation sur le terrain a permis de confirmer que seuls deux sites sur les douze représentaient des résurgences probables (Tableau 2). Ces deux sites se situent en aval du ruisseau Droite. Une coupe stratigraphique longitudinale de ce ruisseau, effectuée par des étudiants du Baccalauréat en génie géologique de l'Université du Québec à Chicoutimi, indique qu'une couche de gravier superpose le socle rocheux (Martel et Deme, 2024). Même si les dépôts d'argile recouvrent et confinent la couche de gravier sur une grande partie du bassin, celle-ci est dénudée dans les hautes terres et donc propice à l'infiltration des eaux de surface et à la circulation des eaux souterraines (Martel et Deme, 2024). Cette couche de gravier refait aussi surface en aval dans le lit du ruisseau. Selon l'équipe de géologues, il est possible que cet environnement soit propice aux résurgences (Martel et Deme, 2024).

Les dix autres résurgences potentielles détectées sur la branche principale de la Petite rivière Eusèbe par l'imagerie thermique constituaient essentiellement de l'eau de drainage agricole ou de l'écoulement de subsurface. En effet, l'eau d'infiltration peut difficilement percoler à travers la surface imperméable d'argile qui compose le dépôt meuble principal dans ce secteur de la rivière. À cet effet, dans les courbes externes de méandres où la berge argileuse était apparente, l'écoulement de subsurface était perceptible sous la litière et la couche meuble, juste au-dessus de l'argile. Pour ce qui est de l'absence de résurgence sur cette branche de cours d'eau, le secteur aval de la Petite rivière Eusèbe est caractérisé par la présence d'argile massive qui forme possiblement un aquitard (aquifère confiné), réduisant ainsi la possibilité de connexion hydraulique avec le cours d'eau (Martel et Deme, 2024).

Tableau 2 Caractérisation des 12 sites de résurgences potentielles identifiés par télédétection thermique, caractérisation effectuée par photointerprétation et prises de données

N° résurgence potentielle	Télédétection			Température °C	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
	Δt °C automne (été)	Superficie (m ²) automne (été)	Image thermique		
3	3,1 (7,3)	16,6 (9,2)		8,2	476
5	2 (3,2)	3,5 (0,1)		8,0	372
9	2,1 (-)	5,3 (-)		-	-
17	5,0	2,7		-	-
25	2,2	1,4		-	-
32	2,0	16,9		8,4	205






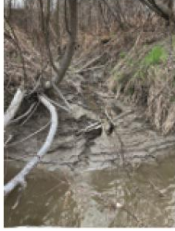
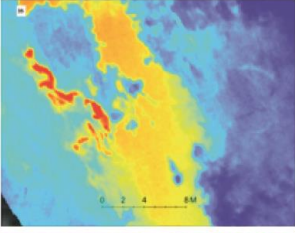
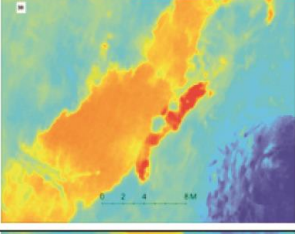
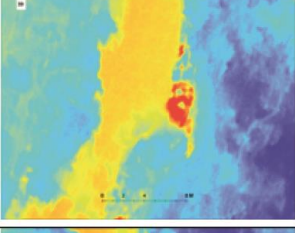
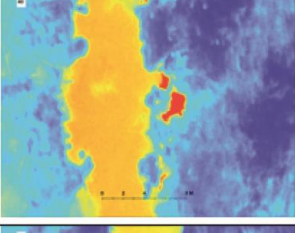
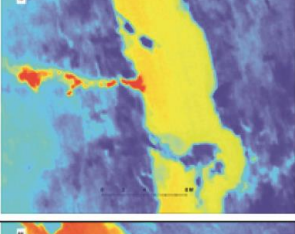
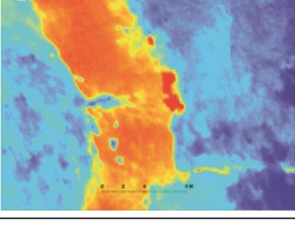






Caractérisation terrain				Résurgence (oui/non)
O ₂ (mg/l)	O ₂ (%)	Photo	Description	
9,58	81		Résurgence avec canal d'environ 20 m jusqu'au lit de la rivière. L'eau semble arriver sous pression et crée des bouillons.	Oui
9,35	79		Résurgence aménagée par un riverain (petit substrat rocheux et chute). Il y en a deux espacées de quelques mètres l'une de l'autre.	Oui
-	-		Talus argileux, écoulement de subsurface par-dessus la couche d'argile. Écoulement non visible au moment du terrain, mais qui doit être actif lors des pluies.	Non
-	-		Il semble y avoir petit lit d'écoulement, entièrement asséché.	Non
-	-		Drainage agricole, conduite observée	Non
13,00	110		Lit d'écoulement bien défini, mais qui semble atteindre la nappe phréatique à proximité du cours d'eau, peut-être alimenté en eau souterraine.	Non

Tableau 2 (suite) Caractérisation des 12 sites de résurgences potentielles identifiés par télédétection thermique, caractérisation effectuée par photointerprétation et prises de données

N° résurgence potentielle	Télédétection			Température °C	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	O ₂ (mg/l)
	Δt °C automne (été)	Superficie (m ²) automne (été)	Image thermique			
35	3,0	3,4		8,6	122	17,00
38	3,6	5,3		-	-	-
39	2,8	2,2		-	-	-
40	3,5	1,7		-	-	-
43	4,7	4,0		6,3	104	17
44	3,0	2,1		7,4	80	13,8

Caractérisation terrain			Résurgence (oui/non)
O ₂ (%)	Photo	Description	
122		Écoulement de subsurface. L'eau provient du haut du talus, au-dessus de la couche d'argile, et percole à travers le talus par des petits canaux jusqu'au cours d'eau.	Non
-		Talus argileux, écoulement de subsurface au-dessus de la couche d'argile. Bien que l'eau perle doucement sur le talus d'argile, le phénomène doit être plus important lors des pluies.	Non
-		Talus argileux, écoulement diffus au-dessus de la couche d'argile. Bien que l'eau perle doucement sur le talus d'argile, le phénomène doit être plus important lors des pluies.	Non
-		Aucun écoulement visible ni différence de température observés dans le secteur.	Non
116		Drainage agricole, conduite observée.	Non
115		Lit d'écoulement d'un cours d'eau. Drainage du champ adjacent.	Non



6. CONCEPT D'AMÉNAGEMENT DU REFUGE THERMIQUE

Parmi l'ensemble des résurgences détectées sur le bassin versant de la Petite rivière Eusèbe, la résurgence numéro 3 présente les caractéristiques les plus favorables pour permettre un aménagement d'habitat fonctionnel. En effet, cette résurgence affiche un débit plus élevé que les autres et produit un changement notable de la température sur une grande superficie d'habitat du poisson.

6.1 Description de la résurgence

Au site même de la résurgence se trouve un petit bassin d'une profondeur moyenne de 0,6 mètre et d'une superficie de 1,0 m². Il est possible d'y apercevoir clairement un écoulement souterrain qui soulève, sous forme de bouillon, le substrat fin au fond du bassin (Photos 1 et 2).



Photos 1 et 2 Résurgence (n° 3)

L'eau qui s'écoule de la résurgence a façonné un court canal préférentiel avant de rejoindre le ruisseau Droite (Photos 3, 4 et figure 10). Ce petit écoulement d'une longueur de 16,7 mètres affiche une profondeur et une largeur moyenne de 0,2 et 0,65 mètre respectivement. Le débit

mesuré au centre de celui-ci était de 0,024 m³/s au moment de la visite du 2 octobre et de 0,023 m³/s le 10 mai 2024. Le canal est essentiellement composé de substrat fin, principalement de sable (75 %) et d'argile (25%). Il est bordé par un talus herbacé d'une hauteur moyenne de 1,5 mètre, affichant une pente de 1 V : 2 H. Les rives ne présentent pas de signe d'érosion. Quelques abris aquatiques sont présents, majoritairement des débris ligneux.



Photos 3 et 4 Écoulement provenant de la résurgence, vue amont et aval

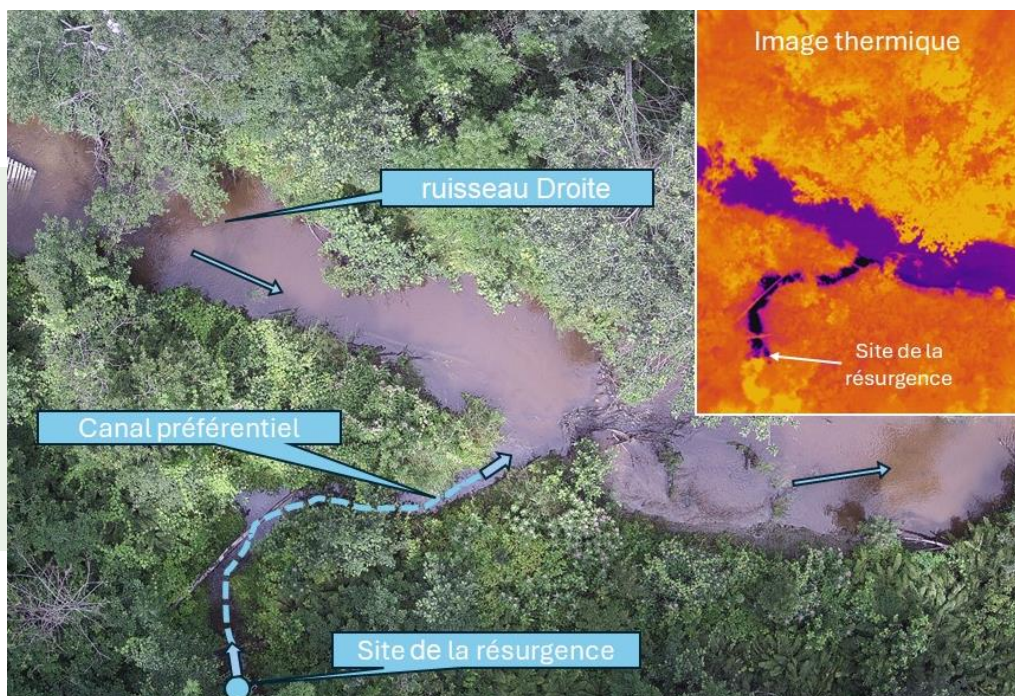


Figure 10 Localisation et sens d'écoulement de la résurgence n° 3 en lien avec le ruisseau Droite

6.2 Description du ruisseau Droite

Le tronçon caractérisé du ruisseau Droite (400 mètres), au droit de la résurgence, affiche un faciès d'écoulement principalement de type plat lentique (photo 5). Toutefois, lorsque le cours d'eau se trouve en période d'étiage, quelques courtes sections de type seuil se définissent. La profondeur et la largeur moyenne du tronçon sont respectivement de 0,2 mètre et 2,8 mètres, et la vitesse d'écoulement moyenne est de 0,36 m/s. Le substrat est principalement composé de sable (60 %), d'argile (35 %) et, dans une moindre mesure, de galets et de quelques petites superficies de gravier isolées (photo 6).

Les rives sont recouvertes d'une strate bien établie d'herbacées, d'arbustes et d'arbres feuillus matures. Le recouvrement du cours d'eau par la végétation en surplomb est faible (< 10 %). La hauteur du talus en rive gauche varie de 5 mètres à plus de 8 mètres par endroit, tandis qu'en rive droite (bordée par une terre agricole), la pente est plus faible et la hauteur du talus ne dépasse pas 1,5 mètre de hauteur. De nombreuses zones d'érosion sont observées (plus de 60 % des rives droite et gauche), marquées par de nombreuses sections de talus en surplomb, conséquence directe des crues printanières d'envergure dans ce cours d'eau. Ces nombreux talus en surplomb offrent de bons abris pour la faune aquatique. Une bonne proportion des abris aquatiques (20 % de recouvrement) se retrouvent dans le cours d'eau et sont composés principalement de débris ligneux (photo 7). Ces débris peuvent potentiellement contribuer à la formation d'embâcles. La présence de végétation aquatique dans le cours d'eau est marginale; toutefois, des secteurs colonisés par des algues ont été observés. Ces secteurs offrent un certain couvert pour la faune aquatique.



Photos 5, 6 et 7 Ruisseau Droite, faciès d'écoulement, substrat et abris aquatiques.

Aucune entrave à la libre circulation des poissons n'a été observée lors des deux visites. Toutefois, une digue de castor (de plus de 1,5 mètre de hauteur) a déjà été présente dans le secteur (en 2021). Celle-ci pouvait momentanément constituer un obstacle infranchissable en période d'étiage.

6.3 Paramètres physicochimiques

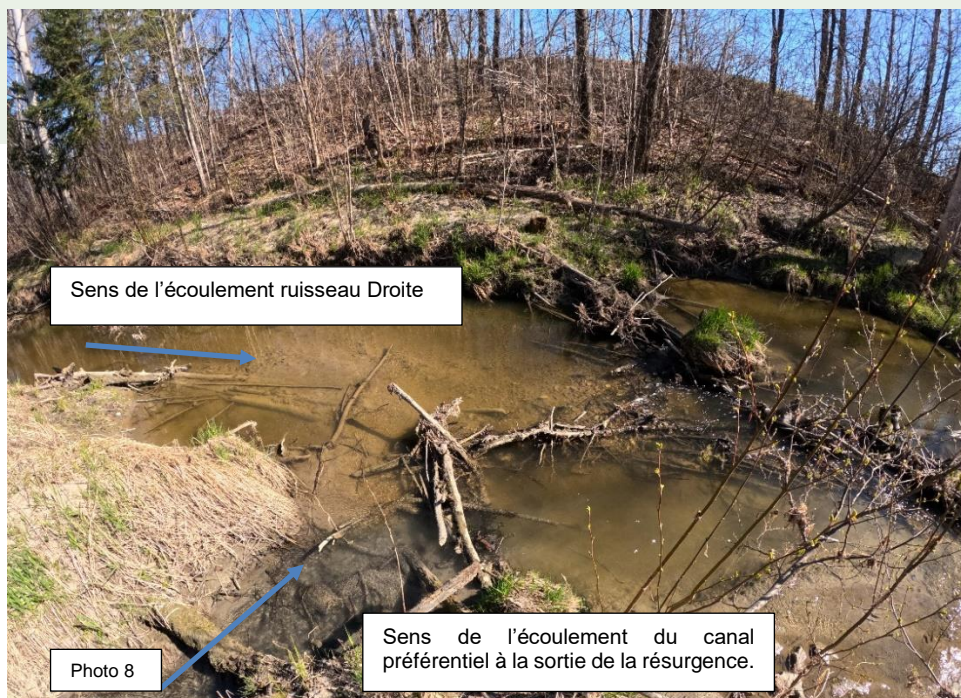
Les paramètres physicochimiques au niveau du site de la résurgence numéro 3 ainsi qu'au ruisseau Droite (en amont du canal d'arrivée de la résurgence) sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous. Une concentration inférieure en oxygène est observée dans l'eau de la résurgence, comparativement aux valeurs mesurées dans le ruisseau Droite. Toutefois, cette concentration (4,85 mg/l) demeure au-dessus du seuil établi dans la littérature pour définir un refuge thermique (voir section 1.1). La mesure de conductivité est également plus élevée que dans celle du ruisseau Droite, ce qui est naturellement le cas dans des sources d'eaux souterraines.

Tableau 3 Paramètres physico-chimiques de la résurgence numéro 3 et du ruisseau Droite

Paramètres mesurés	Résurgence no 3		Ruisseau Droite	
	Coordonnées degré décimal (48,65852 N - 72,46027 O)		Coordonnées degré décimal (48,65852 N - 72,46027 O)	
Date	2 oct. 2023	10 mai 2024	2 oct. 2023	10 mai 2024
Température (°C)	7,9	8,2	10,0	6,8
pH	8,56	-	8,43	-
Oxygène dissout (mg/l)	4,85	9,6	8,29	17,0
Oxygène dissout (% saturation)	55	81	73,3	112
Conductivité spécifique (µS/cm)	688	476	290	146
Turbidité (NTU)	3,48	-	12	-
Phosphore total (mg/l)	0,003	0,002	- ¹	-
Nitrite (mg/l)	<0,1	<0,01	- ¹	-
Nitrate (mg/l)	<0,5	1,09	- ¹	-
Coliformes fécaux (UFC/100 ml)	-	0,0	- ¹	-

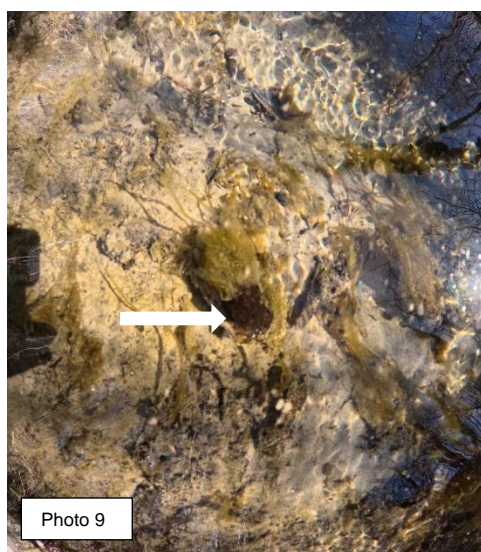
- Des échantillons d'eau récoltés biannuellement dans le ruisseau Droite entre 2017 et 2022 (N = 10) affichent une concentration en nitrite-nitrate variant entre 0,44 mg/l et 1,068 mg/l, une concentration en phosphore total variant entre 0,018 mg/l et 0,075 mg/l et une concentration en coliformes fécaux variant entre 283 et 35000 UFC/100 ml.

En ce qui a trait à la turbidité, la photo 8 illustre bien la couleur limpide de l'eau à la sortie de la résurgence, comparativement à celle du ruisseau Droite.



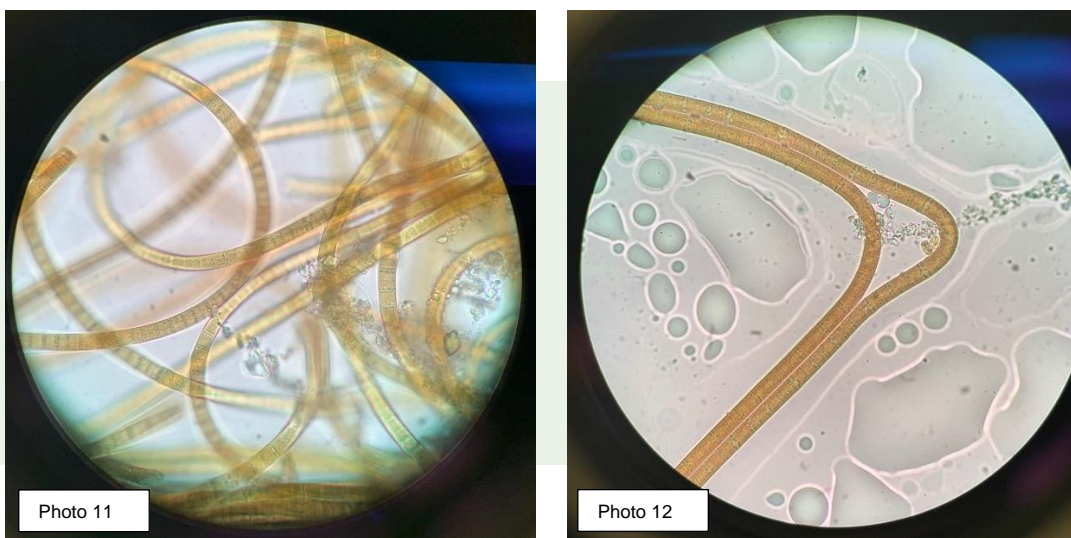
Photos 8 Embouchure du canal préférentiel sur le ruisseau Droite

Au moment de la caractérisation du 10 mai 2024, des algues formant des masses visqueuses et noirâtres ont été observées dans le canal préférentiel jusqu'à la résurgence, tant sur le fond du lit du canal que flottant en amas sur la surface (photo 9 et 10).



Photos 9 et 10 Présence d'algues à proximité de la résurgence

Aucune observation de ce type d'algue n'a été effectuée ailleurs dans le bassin versant. L'analyse d'un échantillon apporté au laboratoire suggère la présence d'une cyanobactérie de la famille des oscillatoriales et du genre phormidium (photos 11 et 12). Ce genre d'algue peut croître tant en milieu oligotrophe qu'eutrophe et les conditions qui favorisent sa prolifération sont encore mal connues. Certaines espèces sont toxiques. Bien que cette résurgence ait été sélectionnée pour proposer un aménagement, il est sous-entendu que l'identification de l'espèce d'algue ainsi que des analyses plus poussées de la physicochimie de l'eau devront être réalisées.



Photos 11 et 12. Vue au microscope de la cyanobactérie (grossissement 1000x)

6.4 Proposition d'aménagement

Un concept d'aménagement d'habitat tirant profit d'une résurgence est présenté dans cette section pour créer un refuge thermique pour les poissons, particulièrement l'omble de fontaine. Il doit être perçu comme une contribution additionnelle aux grands chantiers de réflexion entourant l'aménagement et la restauration d'habitats aquatiques dans la province. En ce sens, une série de seuils/bassins pourraient être aménagés dans le canal préférentiel de 16,7 mètres créés par la résurgence afin de rehausser le niveau d'eau dès la sortie de la résurgence et ainsi d'augmenter la profondeur d'eau et les superficies pouvant bénéficier du refroidissement provenant des eaux souterraines. Ainsi, lorsque les températures moyennes du ruisseau Droite augmentent en période estivale, s'approchant souvent des limites critiques pour les salmonidés, cet habitat demeurerait accessible et fonctionnel pour les besoins variés associés au cycle de vie des espèces plus sensibles. Cet aménagement devrait contribuer à diversifier le type de faciès d'écoulement que l'on retrouve dans le canal préférentiel, permettre de présenter des vitesses d'écoulement plus variées et offrir quelques aires de repos, d'alevinage et d'alimentation pour l'ensemble des espèces de poissons qui fréquentent le secteur.



Le concept de l'aménagement s'inspire de techniques récemment popularisées au Québec, mais qui ont été amplement utilisées pour la protection des berges et la restauration des cours d'eau à l'extérieur de la province (Alaska Department of Fish and Game, 2005; Eubanks et Meadows, 2002; Bray et Mylechreest, 2003; Roni et collab., 2015; Slaney et Zaldokas, 1997; Sylte et Fischenich, 2000; United States Department of Agriculture, 2021). Il représente une alternative moins intrusive et anthropisée dans son procédé de mise en œuvre et dans le choix des matériaux que les méthodes standards utilisent couramment. Il n'implique pas d'enrochement, utilise des matériaux naturels et permet de conserver l'intégrité écologique du cours d'eau, car il n'interfère pas avec les processus fluviaux.

La mise en place de cinq séries de seuils/bassins assurera la connectivité hydrologique avec le ruisseau Droite (Figure 11). Le contour de la ligne des hautes eaux a été utilisé pour obtenir la cote d'élévation souhaitée pour la retenue d'eau. Cette ligne de niveau d'eau correspond au niveau moyen observé au printemps, lorsque le ruisseau Droite inonde la résurgence (soit une élévation de 106,75 mètres par rapport au niveau de la mer). C'est ce niveau d'eau que l'on vise à maintenir pendant la saison estivale à proximité immédiate de la résurgence





Les seuils sont construits avec des sections de troncs d'arbres à fortes racines (d'environ 1 mètre de longueur et d'un diamètre variant de 20 à 30 cm), auquel le système racinaire est toujours attaché. Avant la réalisation des travaux, ceux-ci sont déracinés à l'aide de machinerie, ou encore récoltés en forêt dans un secteur ayant subi des affaissements (vents forts ou chablis). Les arbres et leurs racines doivent être sains et peuvent être écorcés afin de prolonger la durée de vie des seuils. Le système racinaire n'a pas besoin d'être conservé au complet, le but étant d'avoir un bon réseau d'interstices entre les racines existantes.

Chaque seuil est constitué de deux sections d'arbres partiellement enfouis en angle (entre 10 et 20 degrés) dans le lit du cours d'eau. Le positionnement des seuils doit induire un rehaussement du niveau d'eau en amont (<15 cm) et former un écoulement préférentiel en son centre (jet de surface), assurant ainsi la libre circulation du poisson en tout temps. La portion du système racinaire est ancrée solidement dans la berge et les déblais végétaux sont remis en place au travers des racines qui émergent de la berge. L'ensemble de la structure ne doit pas dépasser de façon significative le niveau d'eau souhaité en amont afin d'éviter de créer inutilement une résistance à l'écoulement. L'imperméabilisation de la structure est assurée, au besoin, par l'ajout de substrat hétérogène composé de gravier et de cailloux (calibre 2 -10 cm). Le matériau doit être libre de sédiments fins, et provenir d'un dépôt fluvial. Il contribue également à diversifier la granulométrie du cours d'eau. Quelques blocs seront ajoutés dans les petits bassins créés par les seuils afin d'offrir des abris et des zones de repos (contre-courant) pour les poissons.

Chaque seuil permettra de rehausser graduellement de 0,15 mètre, le niveau d'eau. Sur une longueur totale de 16,7 mètres, cette hausse permettra d'obtenir à la source de la résurgence un bassin d'une profondeur d'eau de 0,75 m et d'une superficie de 8 m². La superficie totale de l'habitat créé par l'ensemble de l'aménagement sera de 25 m².

Concept d'aménagement proposé

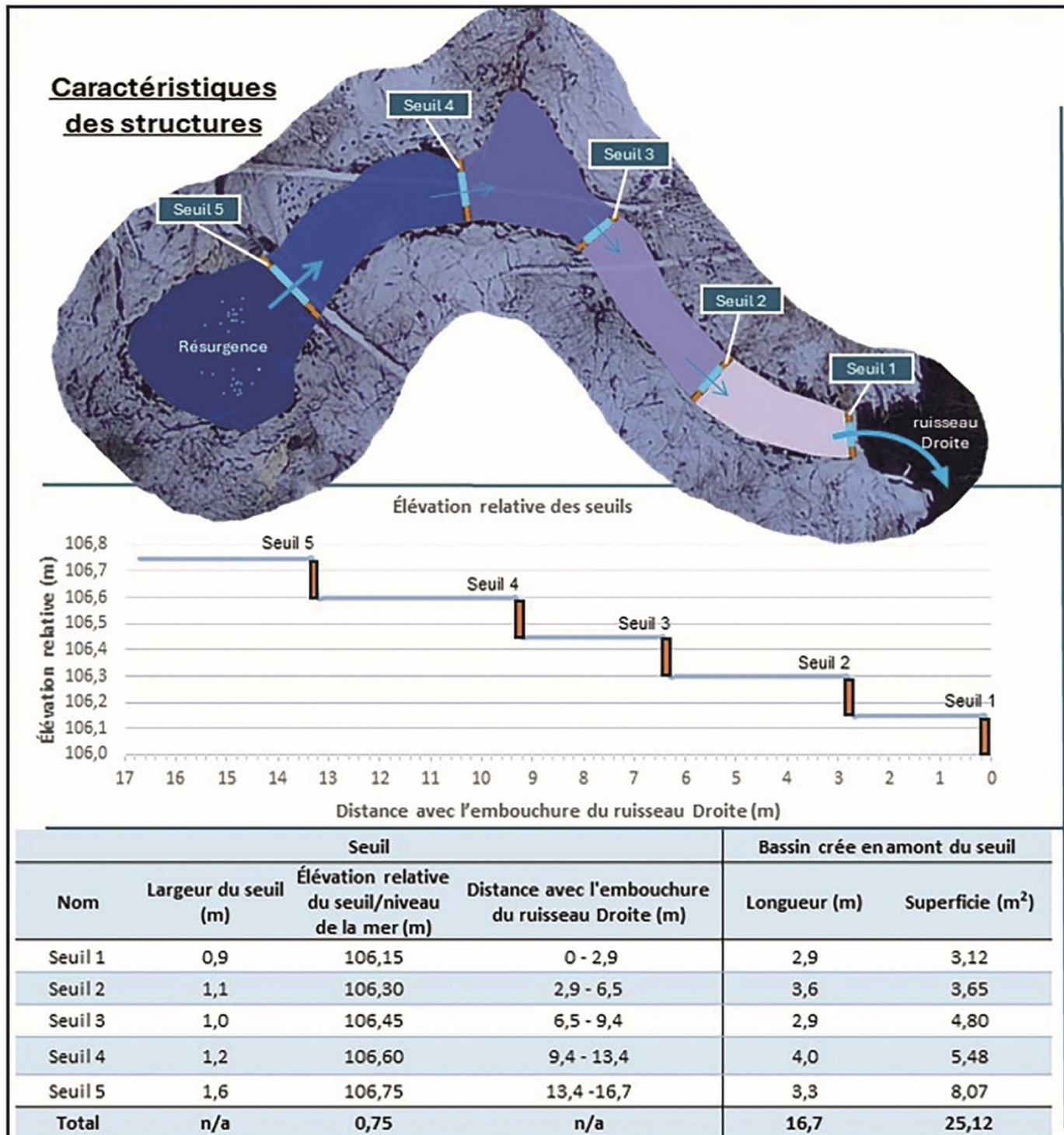
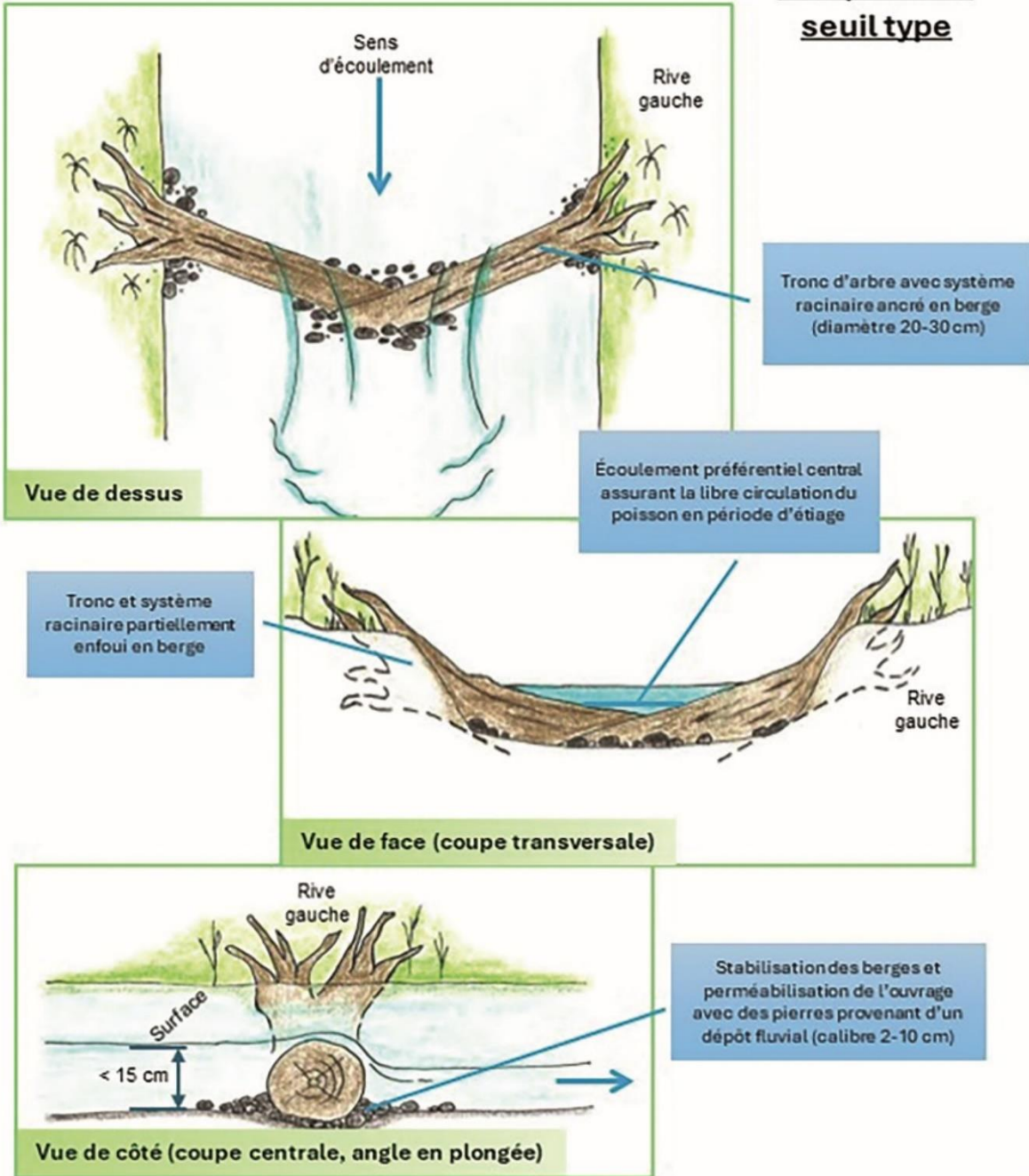


Figure 11 Concept et caractéristiques de l'aménagement proposé à la résurgence n° 3 localisée sur le ruisseau Droite

Croquis d'un seuil type



6.5 Échéancier, évaluation des coûts et suivi

Il est important de noter qu'un état de référence concernant la variation des températures locales et la physicochimie de l'eau devrait être conduit (incluant l'identification des algues présentes). Les prises des mesures devront s'effectuer sur une échelle temporelle qui inclut la période estivale et automnale avant le début des travaux d'aménagement. Les travaux pourraient ainsi être réalisés à l'été 2026, avant le 15 septembre, afin de ne pas perturber la reproduction de l'omble de fontaine. Ils seraient réalisés manuellement, c'est-à-dire qu'aucune machinerie ne serait utilisée pour effectuer les travaux.

Le tableau 4 présente les principales étapes de réalisation, la durée ainsi que les coûts estimés pour la réalisation du projet. Il est proposé de réaliser un premier suivi en 2027, soit un an après les travaux, qui évaluera :

- le suivi de l'influence de l'aménagement sur les variations des températures locales;
- la stabilité (instabilité, affouillement des structures, érosion, ensablement, état des berges, etc.);
- les caractéristiques physiques (granulométrie, profondeur, écoulement, conditions physiques de libre passage du poisson, etc.);
- l'utilisation générale, par les poissons fréquentant le secteur, de l'habitat aménagé (présence de juvéniles ou d'adultes);
- les recommandations de mesures correctrices au besoin.

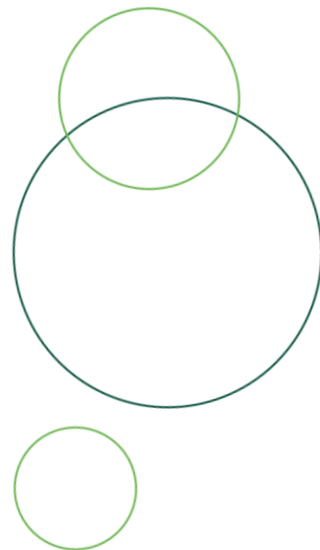


Tableau 4 Échéancier et évaluation des coûts des travaux d'aménagement du refuge thermique

Activité	Début	Fin	Coût estimé
État de référence			
État de référence (la variation des températures et physicochimie de l'eau)	2025-04-01	2025-11-01	2400 \$
Coordination, préparation et autorisation			
Approcher propriétaires et usagers	2026-03-01	2026-03-30	300 \$
Obtention des autorisations (accès, lettres de conformité MRC et Ville, etc.)	2026-04-01	2026-04-15	550 \$
Élaboration de la demande d'autorisation CA	2026-04-01	2026-04-15	1650 \$
Dépôt de la demande d'autorisation CA	2026-04-15	2026-04-15	n/a
Obtention du CA	2026-07-15	2026-07-15	n/a
Octroi du mandat	2026-07-15	2026-07-15	n/a
Préparation et achat de matériaux (tamisage du gravier, récolte des troncs d'arbre, etc.)	2026-07-20	2026-08-30	2450 \$
Réalisation des travaux			
Travaux d'aménagements de la résurgence	2026-09-01	2026-09-05	2700 \$
Caractérisation après travaux	2026-09-06	2026-09-06	110 \$
Rédaction du rapport des travaux d'aménagement	2026-09-10	2026-09-20	1760 \$
Dépôt du rapport des travaux	2026-09-20	2026-09-20	n/a
Suivi de l'aménagement			
Suivi de la variation des températures locale de la résurgence suivant la mise en place de l'aménagement	2027-04-01	2027-11-01	1400 \$
Premier suivi après travaux	2027-08-20	2027-08-20	110 \$
Total			13 430 \$



CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La présente étude visait à appliquer la télédétection thermique par drone dans le bassin de la Petite rivière Eusèbe pour localiser et caractériser des résurgences potentielles et proposer l'aménagement conceptuel d'un refuge thermique pour l'omble de fontaine.

En premier lieu, la méthode utilisée pour détecter les résurgences potentielles semble avoir été efficace, surtout à l'automne alors que la canopée est inexistante. Des relevés au printemps pourraient s'avérer tout aussi concluants. Combinée à des étapes de tri par photointerprétation, analyse géospatiale et caractérisation sur le terrain, la démarche réalisée est efficace pour détecter des résurgences potentielles à une échelle spatiale relativement grande. La méthode de tri pourrait éventuellement être automatisée par une programmation dans des logiciels de géomatique. Malgré l'automatisation de certains processus, il demeure important d'effectuer une reconnaissance et une caractérisation terrain pour fin de validation. Cette caractérisation doit inclure des analyses détaillées de la physicochimie de l'eau (contaminants, métaux lourds, etc.) et des communautés biotiques vivants au gré de la résurgence, et cela, afin de s'assurer de la présence de conditions propices à l'aménagement d'un habitat adéquat. Dans ce cas-ci, la présence de la cyanobactérie devrait être considérée de manière sérieuse.

Enfin, le concept proposé se base sur plusieurs méthodes qui ont été popularisées à travers le monde. Dans le concept proposé, le refuge n'interfère aucunement avec les processus fluviaux du cours d'eau. Les matériaux choisis s'intègrent bien à l'environnement naturel. Les auteurs considèrent qu'il s'avère toutefois primordial, dans le cas de la mise en œuvre de cet aménagement, d'effectuer un suivi rigoureux avant et après le projet, et cela, sur plusieurs années puisqu'il est question ici d'un projet de recherche appliquée. Ces suivis devront tenir compte de la structure physique de l'aménagement, des paramètres physicochimiques tels que la température de l'eau et de l'utilisation réelle du site par l'omble de fontaine en période d'étiage estival.

Avant de promouvoir la démarche, les auteurs tiennent à souligner la nécessité de poursuivre les travaux d'acquisition de connaissances dans ce domaine, qui mettent à contribution différentes disciplines, soit la biologie, l'hydrogéologie et l'hydrogéomorphologie.

En somme, cette initiative s'inscrit dans le chantier actuel des réflexions concernant l'aménagement de l'habitat aquatique et la restauration de cours d'eau. Les auteurs reconnaissent l'importance d'intégrer la résilience des cours d'eau aux changements climatiques dans les futures approches qui seront adoptées par les différents paliers gouvernementaux.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam, P., N. Debiais et J.-R. Malavoi. 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'eau Seine-Normandie, Direction de l'eau, des milieux aquatiques et de l'agriculture (DEMAA), Service eaux de surface, 60 + 100 p. Disponible en ligne à : <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/manuel-restauration-hydromorphologique-cours-eau>.
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse. 2011. Guide technique SDAGE – Restauration hydromorphologique et territoires : Concevoir pour négociier, 105 p. Disponible à <https://www.trameverteetbleue.fr/documentation/references-bibliographiques/guide-technique-sdage-restauration-hydromorphologique>.
- Alaska Department of Fish and Game, Division of Sport Fish, Streambank Revegetation and Protection: A guide for Alaska, Revised 2005, Protection Techniques: Root Wads. <https://www.adfg.alaska.gov/index.cfm?adfg=streambankprotection.main>. [Visité le 20 mars 2024].
- Beechie, T., D.A. Sera, J.D. Olden, G.R. Press, J.M Buffington, H. Moir, P. Roni et M.M. Pollock. 2010. Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *Bioscience*, vol. 60 (3):209-222. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.7>.
- Bilby, R.E. 1984. Characteristics and Frequency of Cool-water Areas in a Western Washington Stream. *Journal of Freshwater Ecology*, 2 (6): 593-602. <https://doi.org/10.1080/02705060.1984.9664642>.
- Biron, P., T. Buffin-Bélanger et S. Massé. 2017. The Need for River Management and Stream Restoration Practices to Integrate Hydrogeomorphology: Stream Restoration and Hydrogeomorphology. *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*. Vol. 62 (2), 288-295. <https://doi.org/10.1111/cag.12407>.
- Biron, P., T. Buffin-Bélanger, M. Laroque, G. Choné, C.-A. Cloutier, M.-A. Ouellet, S. Demers, T. Olsen, C. Desjarlais et J. Eyquem. 2014. Freedom Space for Rivers: A sustainable management Approach to Enhance River resilience. *Environmental Management*, 54, 1056-1073. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0366-z>.
- Biron, Pascale M. 2017. La restauration de l'habitat du poisson en rivière : une recension des écrits. Rapport scientifique présenté à la Fondation de la Faune du Québec, 70p. Disponible en ligne à <https://robvq.qc.ca/public/documents/bibliotheque/uploaded/tq0imwj6.pdf>.
- Boivin, M., M. Maltais et T. Buffin-Bélanger. 2019. Guide d'analyse de la dynamique du bois en rivière. Guide scientifique présenté au Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie et à la Fondation de la Faune du Québec. 97 p. Disponible en ligne à : https://recherche.uqac.ca/lerga/wp-content/uploads/sites/9/2019/03/Boivin-et-al.-2019.-Guide-dynamique-du-bois-en-riviere-UQAC-UQAR_.pdf.

- Bour, B., Brousseau, M., Dubois, A.-M., Martineau M.-A., Marseille, C.M. et M. Varin. 2024. Détection de potentiels refuges thermiques pour l'omble de fontaine dans la Petite rivière Eusébe. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2024-11. 35 pages.
- Bray, K.E. et P. Mylechreest. 2003. Evaluation of Habitat Enhancement in Camp Creek, For Columbia Basin Fish and Wildlife Compensation Program. Revelstoke, B. C., 52 p. et annexes. Disponible en ligne à : https://www.sgrc.selkirk.ca/bioatlas/pdf/Evaluation_of_Habitat_Enhancement_in_Camp_Creek.pdf.
- Breau, C., R.A. Cunjak et G. Bremset. 2007. Age-specific aggregation of wild juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* at cool water sources during high temperature events. Journal of Fish Biology, 71 (4): 1179-1191. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01591.x>.
- Breau, C., R.A. Cunjak et S.J. Peake. 2011. Behaviour during elevated water temperatures: can physiology explain movement of juvenile Atlantic salmon to cool water? Journal of Animal Ecology, 80 (4): 844-853. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01828.x>.
- Burkholder, B.K., G.E. Grant et R. Haggerty. 2008. Influence of hyporheic flow and geomorphology on temperature of a large, gravel-bed, Clackamas River, Oregon, USA. Hydrological Processes, 22 (7): 941-953. <https://doi.org/10.1002/hyp.6984>.
- Casas-Mulet R., J. Pander, D. Ryu, M.J. Stewardson et J. Geist. 2020. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Thermal Infra-Red (TIR) and Optical Imagery Reveals Multi-Spatial Scale Controls of Cold-Water Areas over a Groundwater-Dominated Riverscape. Frontiers in Environmental Science, 8 (64): 1-16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00064>.
- [CEAEQ] Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. 2022. Méthodes d'analyses. Disponible en ligne à : https://www.ceaegouv.qc.ca/methodes/methode_para.htm. Site consulté le 3 mai 2024.
- Chadwick, J.G. et S.D. McCormick. 2017. Upper thermal limits of growth in brook trout and their relationship to stress physiology. Journal of Experimental Biology, 220 (21): 3976-3987. <https://doi.org/10.1242/jeb.161224>.
- Cristea, N.C. et S.J. Burges. 2009. Use of Thermal Infrared Imagery to Complement Monitoring and Modeling of Spatial Stream Temperatures. Journal of Hydrologic Engineering, 14 (10): 1080-1090. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000072](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000072).
- Dole-Olivier, M.J., V. Wawzyniak, M.C. des Châtelliers, et P. Marmonier. 2019. Do thermal infrared (TIR) remote sensing and direct hyporheic measurements (DHM) similarly detect river-groundwater exchanges? Study along a 40 km-section of the Ain River (France). Science of the Total Environment, 66: 1097-1110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.294>.
- Dugdale Stephen. 2014. Analyse de la variabilité spatio-temporelle des refuges thermiques à l'échelle du paysage lotique : Importance pour les populations de saumon atlantique (*Salmo salar*). Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D) en sciences de la terre, 260 p. Disponible en ligne à : <https://www.proquest.com/dissertations-theses/analyse-de-la-variabilite-spatio-temporelle-des/docview/2812056120/se-2?accountid=160421>.
- Dugdale, S.J., N.E. Bergeron et A. St-Hilaire. 2013. Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. Remote Sensing of Environment, 736: 358-373. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.018>.

- Dugdale, S.J., N.E. Bergeron et A. St-Hilaire. 2015. Spatial distribution refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment*, 160: 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.021>.
- Ebersole, J.L., W.J. Liss, et C.A. Frissell. 2003. Cold water patches in warm streams: physiochemical characteristics and the influence of shading. *Journal of the American Water Resources Association*, 39 (2): 355-368. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04390.x>.
- Eubanks, E., et D. Meadows, D. 2002. Soil bioengineering techniques. Dans: *A soil bioengineering guide for streambank and lakeshore stabilization* (pp. 75-141).: U.S. Department of Agriculture Forest Service, San Dimas, California 184 p. Disponible en ligne à: https://books.google.ca/books/about/A_Soil_Bioengineering_Guide_for_Streambank_and_Lakeshore_Stabilization?id=ONM5zFih6acC&redir_esc=y.
- Fleury, M. et D. Boula. 2012. Recommandations pour la planification et la conception d'aménagements d'habitat pour l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 0706-657N° 3008. Ministère des Pêches et des Océans, Canada, 34p. Disponible en ligne à: <https://publications.gc.ca/site/fra/9.629019/publication.html>.
- Fondation de la faune du Québec et ministère de l'Environnement et de la Faune. 1996. Habitat du poisson. Guide de planification, de réalisation et d'évaluation d'aménagements. Québec. 140 p.
- Fuller, I.C., D.J. Gilvear, M.C. Thoms et R.G. Death. 2019. Framing resilience for river geomorphology: reinventing the wheels? *River Research and Applications*, 35 (2) : 91-106. <https://doi.org/10.1002/rra.3384>.
- Goyer, K. 2012. Tactiques de thermorégulation comportementales chez l'omble de fontaine. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'environnement, 86p. Disponible en ligne à: <https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/4443/>.
- Grabowski R.C., N. Surian et A.M. Gurnell. 2014. Characterizing geomorphological change to support sustainable river restoration and management. *WIREs Water*, 1: 483-512. <https://doi.org/10.1002/wat2.1037>.
- Hébert, S. et S. Légaré. 2000. Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau. Direction du suivi de l'état de l'environnement. Ministère de l'environnement, Gouvernement du Québec, Octobre 2000. 48 pages. Disponible en ligne à: https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/rivieres/sommaire.htm.
- Jackson, F.L., I.A. Malcolm et D.M. Hannah. 2016. A novel approach for designing large-scale river temperature monitoring networks. *Hydrology Research*, 47 (3): 569-590. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.106>.
- Johnston, M.F., C.R. Thorne, J.M. Castro, G.M. Kondolf, C.S. Mazzacano, S.B. Rood et C. Westbrook. 2019. Biomic river restoration: a new focus for river management. *River research and Applications*, 36: 3-12. <https://doi.org/10.1002/rra.3529>.
- Jonsson, B. et N. Jonsson. 2009. A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of Fish Biology*, 75, 2381-244. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02380.x>.

- Kurylyk, B.L., K.T.B. MacQuarrie, T. Linnansaari, R.A. Cunjack, R.A. Curry. 2015. Preserving, augmenting, and creating cold-water thermal refugia in rivers: concepts derived from Research on the Miramichi River, New-Brunswick (Canada). *Ecohydrology*, 8 (6): 1095-1108. <https://doi.org/10.1002/eco.1566>.
- Lacasse Sylvain et Pierre Magnan. 1994. Distribution post-glaciaire de l'omble de fontaine dans le bassin hydrographique du fleuve Saint-Laurent : Impact des interventions humaines. Laboratoire de recherche sur les communautés aquatiques Université du Québec a Trois-Rivière et ministère de l'Environnement et de la faune. 99 p.
- Loheide S.P. et S.M. Gorelick. 2006. Quantifying Stream-Aquifer Interactions through the Analysis of Remotely Sensed Thermographic Profiles and In Situ Temperature Histories. *American Chemical Society*, 40 (10): 3336-3341. <https://doi.org/10.1021/es0522074>.
- Isaak, D.J., S. Wollrab, D. Horan et G. Chandler. 2012. Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980-2009 and implications for salmonid fishes. *Climatic Change*, 113: 499-524. DOI [10.1007/s10584-011-0326-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0326-z).
- Malavoi, J.-R. et P. Adam. 2007. La restauration hydromorphologique des cours d'eau : concepts et principes de mise en œuvre. *Ingénierie*, 50 :49-61. Disponible en ligne à : <https://revue-set.fr/article/view/6204>.
- Marchand, J.-P., P.Biron et T. Buffin-Bélanger. 2022. High-resolution spatiotemporal analysis of hydrologic connectivity in the historical flood plain of straightened lowland agricultural streams. *River Research and Applications*, vol. 38 (6) :1061-1079. <https://doi.org/10.1002/rra.3990>.
- Ménard A. et L. Lamontagne. 2024. De la ouananiche (*Salmo salar*) dans une rivière en milieu agricole près de chez-vous : le cas de la Petite rivière Eusèbe au Saguenay-Lac-Saint-Jean. *Le Naturaliste Canadien*, 148 (1) : 11-24. <https://doi.org/10.7202/1110195ar>.
- Martel, O. et A. Deme. 2024. Caractérisation hydrogéologique de la Petite rivière Eusèbe pour l'aménagement du territoire de l'omble de fontaine. Rapport d'ingénierie détaillé conçu dans le cadre du programme Génie géologique (6GLG735-Projet d'envergure en génie géologique II). 99 pages.
- [MELCC] ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques. 2022. Faits saillants- bilans climatologiques officiels et répertoire divers événements climatiques qui ont marqué le Québec ces dernières années-2021. Disponible en ligne à : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/Faits-saillants/index.htm>.
- [MELCCFP] Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. 2024. Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Expertise hydrique et barrage. Disponible en ligne à : <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/>. [Visité le 29 septembre 2023].
- Monk, W.A., N.M. Wilbur, R.A. Curry, R. Gagnon et R.N. Faux. 2013. Linking landscape variables to cold water refugia in rivers. *Journal of Environmental Management*, 118: 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.024>.

- Nelson, C.R., J.G. Hallett, A.E. Romero Montoya, A. Andrade, C. Besacier, V. Boerger, K. Bouazza, R. Chazdon, E. Cohen-Shacham, D. Danano, A. Diederichsen, Y. Fernandez, G.D. Gann, E.K. Gonzales, M. Gruca, M.R. Guariguata, V. Gutierrez, B. Hancock, P. Innecken, S.M. Katz, R. McCormick, L.F.D. Moraes, C. Murcia, N. Nagabhatla, D. Pouaty Nzembialela, F.J. Rosado-May, K. Shaw, K. Swiderska, L. Vasseur, R. Venkataraman, B. Walder, Z. Wang et E.W.A. Weidlich. 2024. Standard of practice to guide ecosystem restoration- A contribution to the United Nation Decade on Ecosystem Restoration 2021-2030. Rome, FAO, Washington, DC, SER & Gland, Switzerland, IUCN CEM, 106 p. <https://doi.org/10.4060/cc9106en>.
- Nielson, J.L., T.E. Lisle et V. Ozaki. 1994. Thermally Stratified Pools and Their Use by Steelhead in Northern California Streams, Transactions of the American Fisheries Society, 123(4): 613-626. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1994\)123<0613:TSPATU>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1994)123<0613:TSPATU>2.3.CO;2).
- Ouranos. Pôle d'innovation sur la climatologie régionale. 2022. Disponible en ligne à : https://portraits.ouranos.ca/fr/spatial?yr=2071&scen=ssp370&p=50&r=0&i=tg_mean&s=annual&d=espog. Consulté le 21 mars 2024.
- Ozaki N., T. Fukushima, H. Harasawa, T. Kojiri, K. Kawashima et M. Ono. 2003. Statistical analyses on the effects of air temperature fluctuations on river water qualities. Hydrological Processes, 17 (4): 2837–2853. <https://doi.org/10.1002/hyp.1437>.
- Peeters, A. 2020. Apports de la géomorphologie dans les processus de conception, de suivi et d'évaluation de projets de restauration de cours d'eau à différentes échelles spatiales et temporelles. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade Docteur en Sciences. Faculté des Sciences, Département de Géographie, Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale, Université de Liège, 240 p. Disponible en ligne à : https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/254729/1/These_AlexandrePeeters_2020.pdf.
- Piégay, H., G. Pautou et C. Ruffinoni. 2003. Les forêts riveraines des cours d'eau. Écologie, fonctions et gestion. Institut pour le développement forestier, Paris, France, 464 p. Disponible en ligne à : https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=1rZXRh5vDX8C&oi=fnd&pg=PA5&dq=Pi%C3%A9gay,+H.,+G.+Pautou+et+C.+Ruffinoni.+2003.+Les+for%C3%AAts+riveraines+des+cours+d%E2%80%99eau.+%C3%89cologie,+fonctions+et+gestion.+Institut+pour+le+d%C3%A9veloppement+forestier,+Paris,+France,+464+p.+&ots=z3311bOIK0&sig=aH-8USGHMU1HOL0rD6XUIgyiwXA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- Quigley, J.T. et S.G. Hinch. 2006. Effects of rapid experimental temperature increases on acute physiological stress and behaviour of stream dwelling juvenile chinook salmon. Journal of Thermal Biology, 31 (5): 429-441. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.02.003>.
- Raleigh, Robert F. 1982. Habitat suitability index models: Brook trout. U.S. Department of the Interior. Fish and Wildlife Service, 42 p. Disponible en ligne à : <https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=VLNenglyrZ4C&oi=fnd&pg=PR3&dq=raleigh+1982&ots=NmozP9O955&sig=I9815zDP5oUaYOU45WulJwUt-Mw#v=onepage&q=raleigh%201982&f=false>.
- Rolan-Meynard, M. 2019. Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité. Collection Guides et protocoles, 189 p. Disponible en ligne à : <https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-guides-protocoles/guide-lelaboration-suivis-doperations-restauration-hydromorphologique-en>.

- Roni, P., T. Beechie, G. Pess et K. Hanson. 2015. Wood placement in river restoration: fact, fiction, and future direction. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72 (3): 466-478. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0344>.
- Sear D.A., 1994. River restoration and geomorphology. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 4 (2): 169-177. <https://doi.org/10.1002/aqc.3270040207>.
- Slaney, P. et D. Zaldokas. 1997. Fish habitat rehabilitation procedures, watershed restoration technical bulletin No. 9. Vancouver, British Columbia: Ministry of Environment, Lands, and Parks and Ministry of Forestry. Disponible en ligne à: https://a100.gov.bc.ca/pub/acat/documents/r15714/Fish_Habitat_Rehabilitation_12294563_07589_60d06fb366d66d9a96f0f58ea082db1abc58c0fc1e3805cd799cd37fc0143bdb.pdf.
- Speed, R., D. Thickner, R. Naiman, L. Gang, P. Sayers, W. Yu, L. Yuanyuan, H. Houjian, C. Jianting, Y. Lili, Z. Zhongnan. 2016. River Restauration. A strategic approach to planning and management. United nation Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 202 p. Disponible en ligne à: https://www.researchgate.net/publication/350966763_River_restoration_A_strategic_approach_to_planning_and_management.
- Sylte, T.L., et J.C. Fischenich. 2000. Rootwad composites for streambank stabilization and habitat enhancement, *EMRRP Technical Notes Collection* (ERDC TN-EMRRP-SR-21), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 10 p. Disponible en ligne à: <https://erdc-library.erdcdren.mil/jspui/handle/11681/3954>.
- Szalkiewicz, E., J. Sucholas et M. Grygoruk. 2020. Feeding the Future with the Past: Incorporation Local Ecological Knowledge in River Restoration. *Resources*, 9 (47), 15p. <https://doi.org/10.3390/resources9040047>.
- Tan, J. et K.A. Cherkauer. 2013. Assessing stream temperature variation in the Pacific Northwest using airborne thermal infrared remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 115: 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.012>.
- The River Restoration Centre. 2021. Manual of River restoration techniques. Disponible en ligne à: <https://www.therrc.co.uk/manual-river-restoration-techniques>. Consulté le 21 mars 2024.
- Tonolla, D., C. Walter, T. Ruhtz et K. Tockner. 2012. Linking fish assemblages and spatiotemporal heterogeneity in a river-floodplain landscape using high resolution airborne thermal infrared remote sensing and in-situ measurements. *Remote Sensing Environment*, 125: 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.014>.
- Torgersen, C.E., C. Le Pichon, A.H., Fullerton, S.J. Dugdale, J.J. Duda, F. Giovannini, É. Tales, J. Belliard, P. Branco, N.E. Bergeron, M.L. Roy, D. Tonolla, N. Lamoureux, H. Capra et C.V. Baxter. 2022. Riverscape approaches in practice: perspectives and applications. *Biological Reviews*, 97 (2): 481-504. <https://doi.org/10.1111/brv.12810>.
- Torgersen, C.E., J.E. Ebersole et D.M. Keenan. 2012. Primer for identifying cold-water refuges to protect and restore thermal diversity in riverine landscapes. Seattle, Washington: United States Environmental Protection Agency (report EPA 910-C-1 2-001), 78 p. Disponible en ligne à <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100E45N.PDF?Dockey=P100E45N.PDF>.
- Torgerson, C.E., R.N. Faux, B.A. McIntosh, N.J. Poage, D.J. Norton. 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76: 386-398. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00186-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00186-9).

- United States Department of Agriculture. 2021. Chapter 16 Soil Bioengineering for Streambank and Shoreline Protection. Dans: National Engineering Handbook, Part 650 Hydrology, Natural Resources Conservation Service, 34 p. Disponible en ligne à : <https://directives.sc.egov.usda.gov/46288.wba>.
- Wawrzyniak, V., H. Piégay, P. Allemand, L. Vaudor, R. Goma et P. Grandjean. 2013. Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high-resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote sensing*, 34 (13): 4812-4831 <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.782113>.
- Wawrzyniak, V., H. Piégay, P. Allemand, L. Vaudor, R. Goma et P. Grandjean. 2016. Effects of geomorphology and groundwater level on the spatio-temporal variability of riverine cold-water patches assessed using thermal infrared (TIR) remote sensing. *Remote sensing Environment*, 175: 337-348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.050>.
- Wilbur, N.M., A. O'Sullivan, K.T.B. MacQuarrie, T. Linnansaari et R.A. Curry. 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*, 36 (5): 769-783. <https://doi.org/10.1002/rra.3570>.
- Whitehead P.G., R.L. Wilby, R.W. Battarbee, M. Kernan et A.J. Wade. 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality, *Hydrological Sciences Journal*, 54 (1): 101-123. Disponible en ligne à <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1623/hysj.54.1.101>.
- Wohl E., S.N. Lane et A.C. Wilcox. 2015. The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, 51 (8): 5974-5997. <https://doi.org/10.1002/2014WR016874>.
- Yochum, S., et L. Reynolds. 2020. Guidance for Stream Restoration. U. S. Department of Agriculture, Forest Service; U.S. Department of Interior, Bureau of Land Management; Forest Services National Stream & Aquatic Ecology Center Technical Note TN-102.5. Fort Collins, Colorado. 118p. Disponible en ligne à : https://www.researchgate.net/profile/Steven-Yochum-2/publication/317413747_Guidance_for_Stream_Restoration_Version_5/links/5f57928592851c250b9d5d09/Guidance-for-Stream-Restoration-Version-5.pdf.

