

Portrait écologique de la rivière Kipawa

Rapport d'étape

William Jacques, Habiba Ferchichi, André St-Hilaire, Eva C. Enders

Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement

490 rue de la Couronne, Québec, QC, Canada G1K 9A9

Avril 2024



Institut national
de la recherche
scientifique

Table des matières

1	Introduction	2
2	Méthodologie.....	3
2.1	Échantillonnage de poissons.....	3
2.2	Échantillonnage d'ADN environnemental.....	3
2.3	Caractérisation de l'habitat	4
3	Résultats	5
3.1	Communauté de poissons.....	5
3.2	Habitats aquatiques	6
4	Discussion.....	8
4.1	Communauté de poissons.....	8
4.2	Habitats aquatiques	11
5	Remerciements	12
6	Références.....	13
7	Annexes	15
	Annexe A : Carte de la rivière Kipawa dans le parc national d'Opémican (© Sépaq) .	15
	Annexe B : Modélisation hydrologique et thermique par CEQUEAU	16
	Annexe C : Description des faciès d'écoulement.....	27

1 Introduction

Les poissons sont reconnus comme indicateurs de l'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques (Bunn & Arthington, 2002 ; Poff & Zimmerman, 2010). En effet, ils sont fréquemment utilisés comme indicateurs biologiques en raison de leur sensibilité aux altérations de l'habitat et de leur rôle clé dans les réseaux trophiques. Dans un contexte où l'on observe une dégradation généralisée et accélérée des écosystèmes aquatiques à l'échelle mondiale (Dudgeon *et al.*, 2019), le suivi des communautés de poissons représente un outil essentiel pour guider les actions de conservation, de gestion durable et d'aménagement du territoire (Karr 1991; Schiemer 2000).

C'est dans cette optique qu'un projet de recherche sur la rivière Kipawa a été mis en place. Celui-ci a pour objectif de modéliser les impacts de la modification du débit sur l'habitat du poisson dans la portion de cette rivière qui s'écoule dans le parc national d'Opémican (Annexe A). Ce tronçon de près de 16 km a été ciblé en raison de sa localisation dans un parc national et de son importance pour les usagers du territoire, notamment les adeptes d'activités nautiques, les pêcheurs et les amateurs de plein air (Cloutier *et al.*, 2011).

Ce secteur présente également un intérêt particulier puisqu'un projet hydroélectrique actuellement à l'étude propose de détourner une partie du débit de la rivière (OBVT, 2017). Or, les connaissances actuelles sur la communauté de poissons de ce tronçon demeurent limitées (Cloutier *et al.*, 2011), ce qui renforce la pertinence d'une caractérisation écologique approfondie.

L'étude en cours comporte plusieurs volets, mais le présent rapport se limite à une brève description de résultats concernant la communauté de poissons, les habitats aquatiques et les efforts de modélisation hydrologique et thermique pour la rivière Kipawa. Ces derniers se trouvent à l'Annexe B du présent rapport.

2 Méthodologie

Afin de documenter efficacement la communauté de poissons, deux approches ont été choisies : l'échantillonnage de poissons et l'échantillonnage d'ADN environnemental (ADNe). Puis, pour la caractérisation des habitats aquatiques, plusieurs sources de données ont contribué à l'établissement d'un portrait général (Génivar, 1998; Cloutier *et al.*, 2011; obs. pers., 2024).

2.1 Échantillonnage de poissons

L'échantillonnage de poissons s'est déroulé du 10 juin au 20 août 2024. Trois tronçons représentatifs de différentes morphologies retrouvées dans la rivière ont été échantillonnés via une approche systématique. Deux méthodes de capture ont été utilisées : la pêche électrique et la senne de plage. Au total, 71 parcelles de pêche électrique et 21 parcelles de senne de plage ont été échantillonnées. Cette combinaison de méthode a permis une meilleure couverture d'une plus grande diversité d'habitat. La pêche électrique a été particulièrement efficace pour déloger les poissons abrités dans les interstices des blocs, tandis que la senne de plage s'est avérée mieux adaptée aux zones de substrat fin dépourvues d'abris.

2.2 Échantillonnage d'ADN environnemental

Des sites d'échantillonnage ont été positionnés de manière à couvrir l'ensemble de la portion d'intérêt de la rivière tout en incluant un site dans le réservoir Kipawa en amont et un site dans le lac Témiscamingue en aval. L'inclusion d'un site dans le réservoir visait à identifier les espèces présentes dans ce milieu, qui pourraient être détectées plus en aval dans la rivière en raison du transport de leur ADNe. Des travaux récents de Van Driessche *et al.* (2023) ont en effet démontré qu'en rivière, les concentrations d'ADNe atteignent souvent un pic entre 0,3 km et 2 km en aval de la présence effective d'une espèce.

Ainsi, un total de 18 sites d'échantillonnage a été établi de sorte à avoir un site à peu près à chaque km le long de la rivière (16 sites) ainsi que les deux sites mentionnés précédemment. Sur le terrain, certains de ces sites ont été légèrement décalés pour cibler des zones présentant un intérêt biologique particulier, telles que des confluences de

tributaires, des fosses ou des herbiers. Les manipulations sur le terrain ont été réalisées conformément au protocole d'échantillonnage d'ADNe aqueux établi par le laboratoire de Valérie Langlois. Ces manipulations impliquaient l'échantillonnage d'environ 1 000 mL d'eau par réplicat et la réalisation de trois réplicats par site. L'extraction de l'ADNe a ensuite été réalisée par l'équipe du laboratoire de Valérie Langlois. Enfin, les étapes d'amplification, de séquençage et de bio-informatique ont plutôt été réalisées par l'équipe de l'Institut de biologie intégrative et des systèmes (IBIS).

2.3 Caractérisation de l'habitat

Dans le cadre de l'étude en cours, dont la portée dépasse celle du présent rapport, l'utilisation de l'habitat par plusieurs espèces de poissons dans la rivière a été évaluée grâce à la collecte de données à l'échelle du microhabitat. Toutefois, compte tenu des objectifs plus généraux du présent document, une description sommaire de la diversité des habitats aquatiques à une échelle plus globale a été privilégiée. À cet effet, plusieurs sources de données complémentaires ont été utilisées pour caractériser efficacement ces habitats.

D'abord, une visite de terrain a permis d'effectuer des observations directes des principales caractéristiques physiques et écologiques des habitats aquatiques. Ces observations incluaient la nature des substrats, les largeurs et profondeurs approximatives, les vitesses d'écoulement, les types de végétation aquatique ainsi que les différents faciès rencontrés. Ensuite, une interprétation cartographique a été réalisée à partir d'images aériennes et satellitaires récentes, dans le but de documenter la distribution spatiale des faciès à l'échelle du tronçon étudié. Les faciès d'écoulement (présentés à l'Annexe C) ont ainsi été identifiés par photo-interprétation, en s'appuyant sur la méthodologie développée par Boudreault (1984). Une validation terrain a été effectuée pour confirmer certaines sections.

Enfin, les données issues d'un rapport antérieur produit par Génivar (1998) pour Hydro-Québec ainsi que du document État des connaissances : Projet de parc national d'Opémican (Cloutier *et al.*, 2011), ont été intégrées pour compléter et valider les observations actuelles. L'ensemble de ces approches a permis d'établir un portrait global et cohérent des habitats aquatiques de la rivière Kipawa.

3 Résultats

3.1 Communauté de poissons

Les efforts d'échantillonnage de l'été 2024 ont permis la capture de 1 400 poissons et la détection de 22 espèces de poissons dans la rivière Kipawa. Parmi ces espèces, 20 ont été capturées alors que 2 ont été uniquement détectées via l'ADNe. La liste des espèces détectées ainsi que leur méthode de détection sont affichées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Liste des espèces détectées dans la rivière Kipawa à l'été 2024

Méthode de détection	Nom commun	Nom scientifique
Capturée et détectée à l'ADNe	Achigan à petite bouche	<i>Micropterus dolomieu</i>
	Barbotte brune	<i>Ameiurus nebulosus</i>
	Chabot tacheté	<i>Cottus bairdii</i>
	Crapet de roche	<i>Ambloplites rupestris</i>
	Doré jaune	<i>Sander vitreus</i>
	Fouille roche-zébré	<i>Percina caprodes</i>
	Grand brochet	<i>Esox lucius</i>
	Grand corégone	<i>Coregonus clupeaformis</i>
	Lotte	<i>Lota lota</i>
	Méné ventre rouge du Nord	<i>Phoxinus eos</i>
	Meunier noir	<i>Catostomus commersonii</i>
	Naseux des rapides	<i>Rhinichthys cataractae</i>
	Ouitouche	<i>Semotilus corporalis</i>
	Perchaude	<i>Perca flavescens</i>
Uniquement capturée	Crapet-soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>
	Cyprin sp.*	<i>Cyprinidae</i>
	Dard à ventre jaune	<i>Etheostoma exile</i>
	Épinoche à neuf épines	<i>Pungitius pungitius</i>
	Méné de lac	<i>Couesius plumbeus</i>
	Méné queue à tache noire	<i>Notropis hudsonius</i>
	Raseux-de-terre noir	<i>Etheostoma nigrum</i>
Uniquement détectée à l'ADNe	Cisco de lac	<i>Coregonus artedii</i>
	Meunier rouge	<i>Catostomus catostomus</i>

*Espèce de cyprinidé autre que celles identifiées.

3.2 Habitats aquatiques

La portion d'intérêt de la rivière Kipawa s'écoule vers l'ouest sur une distance de 15,7 km entre le réservoir Kipawa et le lac Témiscamingue. Cette section présente une alternance marquée entre des tronçons étroits à écoulement rapide et des tronçons plus larges à écoulement plus lent. Elle affiche d'ailleurs un dénivelé de 90 m qui comprend une impressionnante chute d'une hauteur de près de 20 m nommée la Grande Chute.

La section située en amont de la Grande Chute possède une pente moyenne modérée de 0,3 %, mais inclut des pentes très variables allant de moins de 0,1% à plus de 2%. Par contraste, la section située entre le sommet de la Grande Chute et l'embouchure de la rivière présente une pente moyenne beaucoup plus accentuée, avoisinant 1,7% (Génivar, 1998). Cette importante variation des valeurs de pente contribue directement à la diversité des morphologies observées tout au long de la rivière. Ainsi, une multitude de faciès d'écoulement se succèdent sur le parcours étudié, ce qui enrichie la diversité écologique et géomorphologique du secteur. La répartition spatiale détaillée des faciès d'écoulement est illustrée dans la Figure 1.

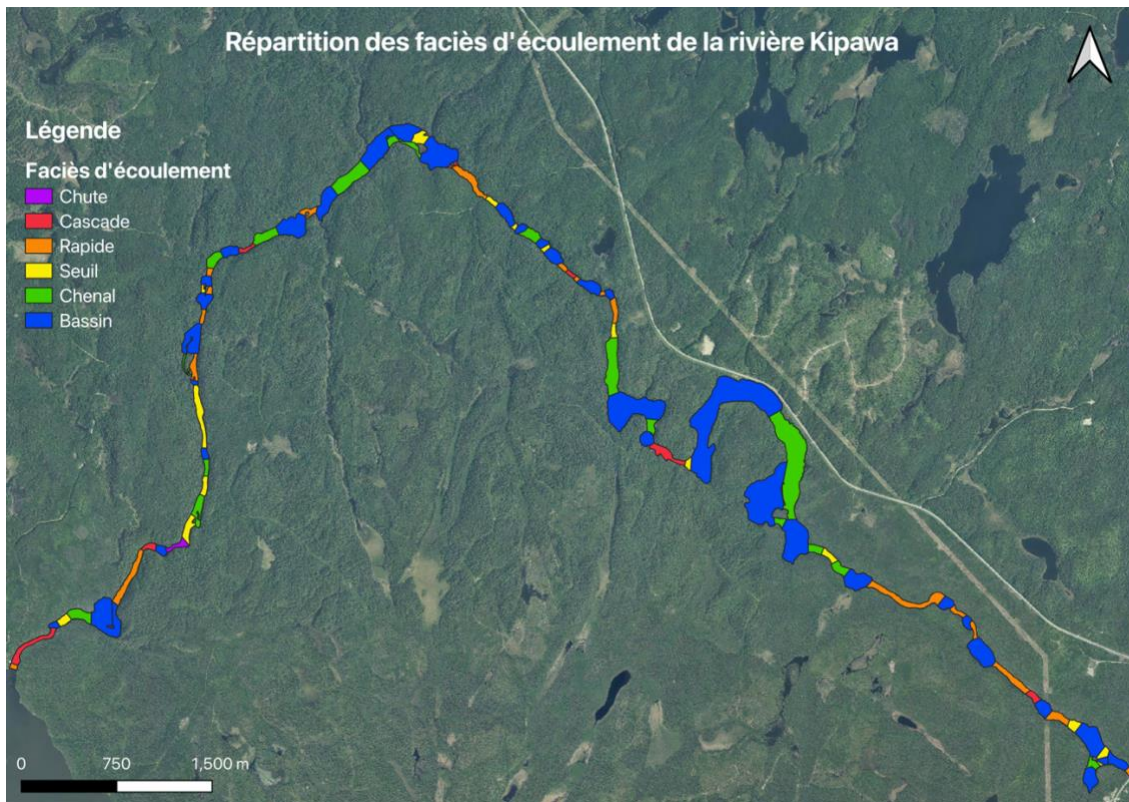


Figure 1 : Carte de la répartition des faciès d'écoulement dans la rivière Kipawa.

Par ailleurs, la portion de la rivière qui s'écoule dans le parc national Opémican présente une largeur variant de 30 à 415 m. On y retrouve une diversité marquée de fosses (bassins), dont certaines atteignent des profondeurs considérables, notamment au pied du barrage de Laniel (>16 m) et à l'aval du rapide Island (>12 m). Sur l'ensemble du tronçon étudié, toutes les granulométries de substrat sont représentées, allant de l'argile fine aux blocs de grandes dimensions. Les bassins et les chenaux sont généralement dominés par des substrats plus fins (argile, limon, sable), tandis que les faciès à écoulement rapide sont majoritairement dominés par des substrats grossiers (cailloux, galets, blocs) selon la classification granulométrique de Wentworth (1922).

Plusieurs herbiers constitués de plantes aquatiques variées sont présents dans les sections à écoulement plus lent de la rivière. Les plus étendus se trouvent notamment dans le large segment longeant la route 101, en amont du rapide *Buttonhook*, dans les deux grands bassins situés à l'aval du rapide *Island*, ainsi que dans le vaste bassin situé à environ 225 m en aval du rapide *Buttonhook*.

Selon Cloutier *et al.* (2011), le segment longeant la route 101 abriterait de beaux herbiers dominés par le scirpe fluviatile (*Bolboschoenus fluviatilis*) et l'éléocharide des marais (*Eleocharis palustris*). Par ailleurs, de vastes herbiers de potamots (*Potamogeton* sp.) ont également été observés dans le deuxième bassin en aval du rapide Island.

Enfin, la rivière Kipawa comprend de nombreux sites potentiels de fraie. Plusieurs habitats présentant des conditions favorables à la reproduction de diverses espèces de poisson y ont été identifiés. Parmi celles-ci figurent notamment le cisco de lac, le doré jaune, le grand corégone, les meuniers noir et rouge, l'achigan à petite bouche, la perchaude ainsi que le grand brochet (Génivar, 1998; CDPNQ, 2024; obs. pers., 2024).

4 Discussion

4.1 Communauté de poissons

La comparaison des données d'échantillonnage de poisson recueillies au fil du temps met en lumière une certaine évolution de la communauté ichthyologique de la rivière Kipawa. Les espèces détectées entre 1998 et 2024 sont regroupées selon leur guildes thermique (Tableau 2). Ces guildes sont définies en fonction des températures d'eau estivales préférées par les espèces (Coker *et al.*, 2001). Trois classes principales sont distinguées : froide ($<19^{\circ}\text{C}$), tempérée ($19\text{--}25^{\circ}\text{C}$) et chaude ($>25^{\circ}\text{C}$). Des classes intermédiaires (froide/tempérée et tempérée/chaude) sont plutôt attribuées aux espèces dont la plage de température préférée chevauche deux classes principales.

Les données de 1998 proviennent d'une étude menée par Génivar pour le compte d'Hydro-Québec. Celles de 2011 et 2022 sont issues d'observations générales fournies par le MELCCFP, tandis que les données de 2024 ont été recueillies dans le cadre de la campagne d'échantillonnage réalisée pour le présent projet.

Bien que l'apparition de certaines espèces en 2024 puisse s'expliquer par leur non-détection lors des années antérieures, d'autres semblent avoir colonisé la rivière après 1998. C'est notamment le cas de l'achigan à petite bouche et du grand brochet, dont la présence actuelle est bien établie et qui auraient très probablement été détectés lors des relevés de 1998 s'ils avaient été présents à l'époque. D'ailleurs, les stations d'échantillonnage ciblées en 1998 incluaient des sites particulièrement favorables à ces deux espèces.

Tableau 2 : Années de détection des espèces groupées par guildes thermiques

Guilde thermique	Espèces	1998	2011	2022	2024
Froide	Chabot tacheté				
	Cisco de lac				
	Épinoche à neuf épines				
	Grand corégone				
	Méné de lac				
	Meunier rouge				
Froide tempérée	Lotte				
	Méné queue à tache noire				
Tempérée	Crapet de roche				
	Dard à ventre jaune				
	Doré jaune				
	Grand brochet				
	Meunier noir				
	Naseux des rapides				
	Ouitouche				
	Perchaude				
	Raseux-de-terre noir				
Tempérée chaude	Fouille-roche zébré				
	Méné ventre rouge du Nord				
Chaude	Achigan à petite bouche				
	Barbotte brune				
	Crapet-soleil				

	= Espèce présente
	= Espèce non-détectée
	= Absence de données

Lorsqu'on examine les préférences thermiques des espèces présentes dans la rivière, on constate qu'en 1998, 45% des espèces détectées (5/11) appartenaient aux guildes thermiques froide ou froide-tempérée. En 2024, cette proportion est passée à 33% (7/21), ce qui suggère une certaine transformation de la communauté au fil du temps.

Les données disponibles suggèrent que ce changement s'est produit de manière graduelle. Par exemple, le grand brochet a été observé pour la première fois en 2011, tandis que l'achigan à petite bouche n'aurait été détecté qu'en 2022.

Il demeure plausible que certaines petites espèces comme le chabot tacheté, l'épinoche à neuf épines, le méné queue à tache noire, le dard à ventre jaune, le naseux des rapides ou le raseux-de-terre noir aient simplement échappé à la détection lors de la campagne de 1998. Toutefois, la détection récente de trois espèces d'eau chaude de plus grande taille, donc plus facilement capturables (l'achigan à petite bouche en 2022, la barbotte brune et le crapet-soleil en 2024), appuie l'hypothèse d'une modification réelle de la composition de la communauté.

Parallèlement à l'apparition de ces espèces thermophiles, la disparition apparente du grand corégone, une espèce fortement associée aux eaux froides (Jacobson *et al.*, 2010), de cette portion de la rivière renforce l'idée d'une transition vers une communauté plus adaptée aux eaux plus chaudes.

Or, le cisco de lac et la lotte sont également des espèces associées aux eaux froides (Jacobson *et al.*, 2008, 2010). Leur présence actuelle pourrait dépendre de la disponibilité de refuges thermiques, auxquels elles resteraient confinées durant les périodes estivales les plus chaudes. Ces espèces pourraient ainsi se révéler particulièrement vulnérables à d'éventuelles modifications du régime hydrologique susceptibles d'altérer la dynamique thermique de la rivière (Clarke *et al.*, 2008).

Outre les impacts potentiels sur la composition de la communauté de poisson de la rivière Kipawa, une altération du régime thermique de la rivière pourrait aussi avoir des impacts sur la morphologie des poissons. En effet, selon Warne et ses collaborateurs (2024), sous l'effet du réchauffement, les espèces adaptées aux eaux froides, comme le grand corégone, ont tendance à présenter une diminution de la taille corporelle à l'âge adulte, tandis que celles adaptées aux eaux tempérées ou chaudes, comme le doré jaune et l'achigan à petite bouche, présentent plutôt une augmentation de la taille des adultes.

À cet égard, le projet hydroélectrique actuellement à l'étude pourrait entraîner des répercussions considérables sur le régime hydrologique de la Kipawa. Bien qu'un barrage soit déjà en place entre le réservoir Kipawa et la rivière, son rôle se limite actuellement à maintenir le niveau du réservoir, avec des ajustements à l'automne visant à favoriser la

reproduction du touladi (Bélanger, 2022). Si le projet devait se concrétiser, on peut s'attendre à des variations de débit beaucoup plus marquées liées aux opérations des centrales hydroélectriques projetées.

4.2 Habitats aquatiques

L'analyse des proportions du tracé linéaire et de la superficie occupées par les différents faciès d'écoulement met en évidence une nette dominance des bassins (Figure 2). Peu importe la métrique considérée (linéaire ou surfacique), l'ordre de prépondérance des faciès reste le même : bassin > chenal > rapide > seuil > cascade > chute.

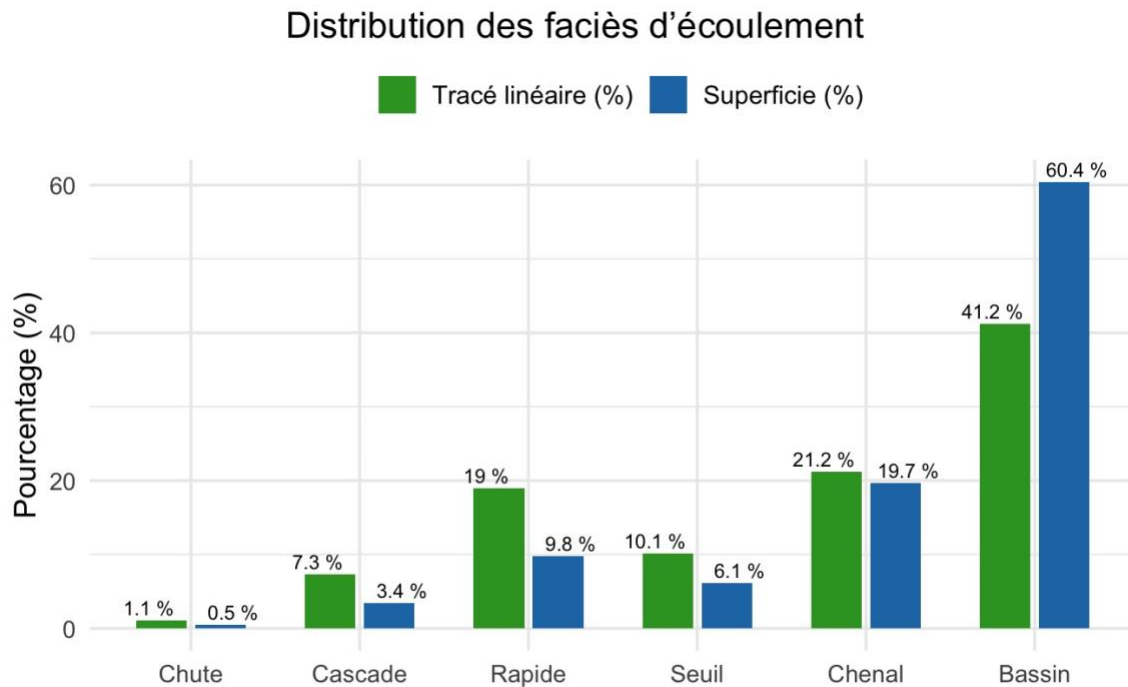


Figure 2 : Proportions du tracé linéaire et de la superficie occupées par les faciès

Cependant, les proportions associées à un même faciès varient considérablement selon la métrique utilisée. Par exemple, les faciès à écoulement rapide (chutes, cascades, rapides et seuils) représentent 37,5% du tracé linéaire de la rivière, mais ne couvrent que 19,8% de sa superficie. Cette disparité s'explique par la largeur généralement plus réduite de ces habitats.

Or, ces milieux à écoulement rapide sont particulièrement sensibles à une diminution du débit (Gippel et Stewardson, 1998 ; Książek *et al.*, 2019), ce qui soulève des préoccupations dans un contexte de modification hydrologique potentielle. Par ailleurs, ces milieux sont particulièrement importants pour les espèces de poissons rhéophiles qu'on retrouve dans la rivière telles que le naseux des rapides, le fouille-roche zébré et le chabot tacheté (Persinger, 2003; Aadland et Kuitunen, 2006). Ils constituent également des habitats essentiels pour la reproduction de nombreuses espèces telles que le doré jaune et le meunier noir (Aadland et Kuitunen, 2006; Twomey *et al.*, 1984).

Par ailleurs, bien que ce ne fût pas l'objet principal de l'étude, des cas d'échouement ont été observés de manière anecdotique à la suite de variations marquées du débit lors des campagnes d'échantillonnage menées en 2024. Dans un cas, un meunier noir juvénile a été retrouvé piégé dans une petite flaque d'eau sur une berge. Lors d'une autre occasion, un banc de méné de lac s'est retrouvé isolé dans une flaque sur une île temporairement émergée à plus faibles débits. Des échouements ont également été constatés chez les moules d'eau douce, alors que le substrat dans lequel elles étaient enfouies s'est rapidement asséché à la suite d'une diminution du débit. Cette exposition prolongée à l'air libre a entraîné le dessèchement et la mortalité de plusieurs individus. Une gestion des débits plus graduelle pourrait contribuer à limiter ces événements d'échouement, tant pour les poissons que pour les moules.

5 Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier chaleureusement l'équipe du parc national d'Opémican pour son soutien lors des campagnes de terrain. Ils tiennent également à exprimer leur gratitude envers plusieurs collaborateurs pour leur précieuse contribution sur le terrain : Rafael Forteza, Jules Bartial, Aglaé Lambert, Joël Tremblay, Jérémie Montlevier, Lily Veyres et Nicolas Vachon. Un remerciement particulier est adressé à l'équipe du laboratoire de Valérie Langlois pour son expertise et son appui sur le volet ADNe. Enfin, les auteurs remercient Mitacs et la Sépaq pour leur soutien financier.

6 Références

- Aadland, L. P., & Kuitunen, A. (2006). Habitat suitability criteria for stream fishes and mussels of Minnesota. Minnesota Department of Natural Resources, Division of Fish and Wildlife, Fisheries Management Section [and] Division of Ecological Services. https://files.dnr.state.mn.us/publications/fisheries/special_reports/162.pdf
- Bélanger, Martin. (2022). État de situation du touladi au réservoir Kipawa – Bilan des inventaires de 1989 à 2020. https://mffp.gouv.qc.ca/documents/faune/RA_touladi_reservoir_Kipawa.pdf
- Boudreault, A. (1984). Méthodologie utilisée pour la photo-interprétation des rivières à saumon de la Côte-Nord. Rapport de Gilles Shooner et associés inc. présenté au ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche. 26 p.
- Bunn, S. E. et Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30, 492507.
- Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec (CDPNQ). (2024). Extractions du système de données pour des occurrences fauniques sensibles à la diffusion pour le projet d'établissement d'un portrait écologique de la rivière Kipawa. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), Québec.
- Coker, G. A., Portt, C. B., & Minns, C. K. (2001). Morphological and ecological characteristics of Canadian freshwater fishes. Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 2554, iv + 89 p.
- Clarke, K. D., Pratt, T. C., Randall, R. G., Scruton, D. A., & Smokorowski, K. E. (2008). Validation of the flow management pathway: Effects of altered flow on fish habitat and fishes downstream from a hydropower dam. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 2784, vi + 111 p.
- Cloutier, M., J. Boisclair, N. Dignard, R. Pomerleau, I. Tessier et A. Thibault. (2011). État des connaissances : Projet de parc national d'Opémican. Consulté 27 janvier 2024, https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/parcs/documents/RA_Etat-connaissances_Opemican.pdf
- Dudgeon, D. (2019). Multiple threats imperil freshwater biodiversity in the Anthropocene. *Current Biology*, 29(19), R960-R967.
- Génivar (1998). Projet de centrale Tabaret – Étude d'impact sur l'environnement. Tome 1 : Description des éléments d'inventaire. Rapport préparé pour Hydro-Québec.
- Hydro-Québec (2007). Complexe de la Romaine – Étude d'impact sur l'environnement. Volume 9 : Méthodes. Hydro-Québec Production. Rapport soumis au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec et à l'Agence canadienne d'évaluation environnementale.

Jacobson, P. C., Jones, T. S., Rivers, P., & Pereira, D. L. (2008). Field estimation of a lethal oxythermal niche boundary for adult ciscoes in Minnesota lakes. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(5), 1464-1474.

Jacobson, P. C., Stefan, H. G., & Pereira, D. L. (2010). Coldwater fish oxythermal habitat in Minnesota lakes: influence of total phosphorus, July air temperature, and relative depth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67(12), 2002-2013.

Karr, J.R., 1991. Biological integrity: a long neglected aspect of water resource management. *Ecol. Appl.* 1, 66- 84.

Organisme de bassin versant du Témiscamingue (OBVT). (2017). Évaluation préliminaire des impacts environnementaux et sociaux – Projet hydroélectrique Onimiki Rapport Final Version révisée août 2018, 87 pages.

Persinger, J. W. (2003). Developing habitat suitability criteria for individual species and habitat guilds in the Shenandoah River basin. Doctoral dissertation, Virginia Tech. <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/d60a966f-828c-44c2-8693-797c49f91955/content>

Poff, N. L., et Zimmerman, J. K. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55(1), 194-205.

Schiemer, F., 2000. Fish as indicators for the assessment of the ecological integrity of large rivers. *Hydrobiologia* 422/423, 271- 278.

Twomey, K., Williamson, K. L., & Nelson, P. C. (1984). Habitat suitability index models and instream flow suitability curves: white sucker. Western Energy and Land Use Team, Division of Biological Services, Research and Development, Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior. <https://mrwa.org/wp-content/uploads/repository/white-sucker.pdf>

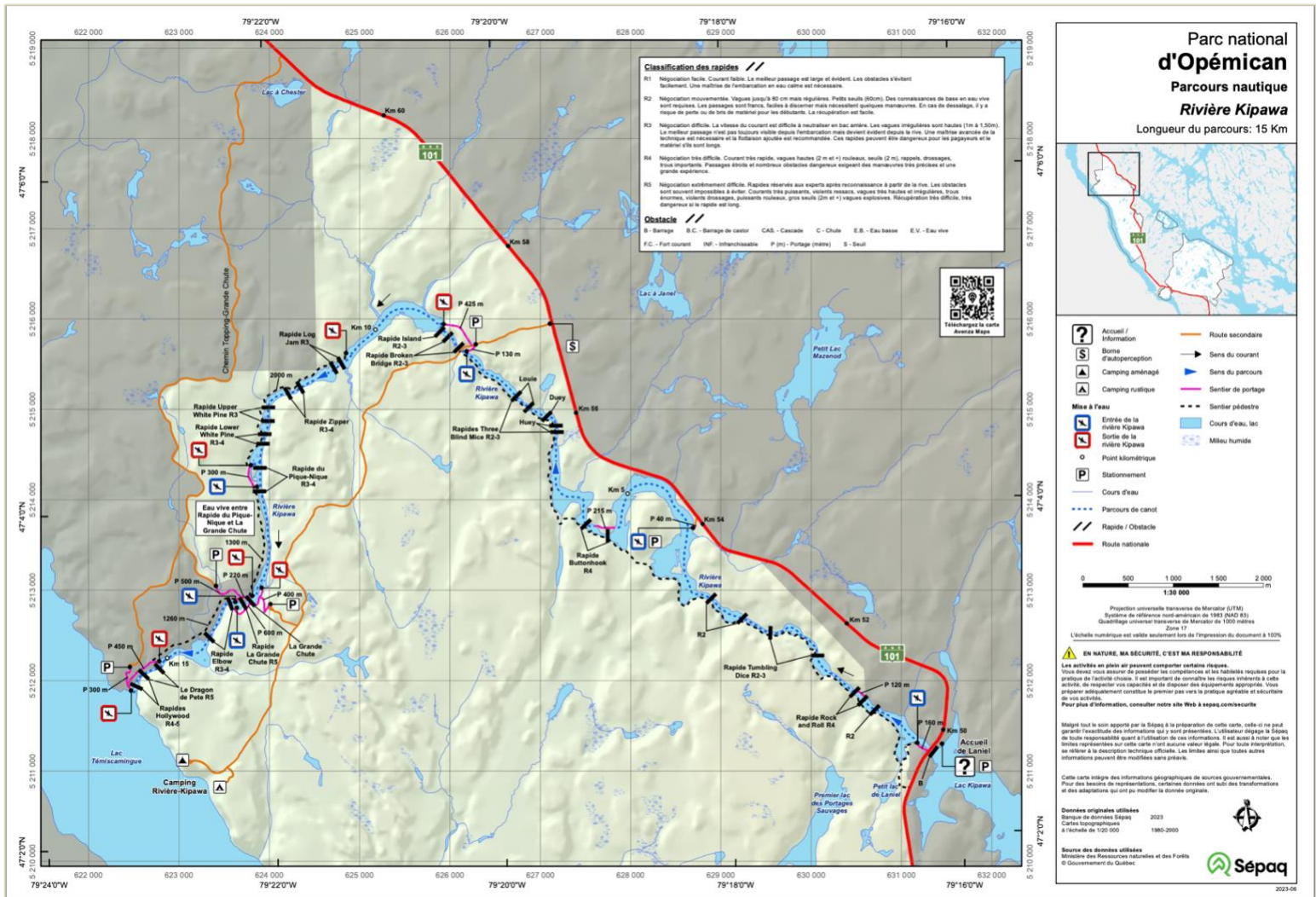
Van Driessche, C., Everts, T., Neyrinck, S., & Brys, R. (2023). Experimental assessment of downstream environmental DNA patterns under variable fish biomass and river discharge rates. *Environmental DNA*, 5(1), 102-116. <https://doi.org/10.1002/edn3.361>

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.

Warne, C. P., Guzzo, M. M., Cazelles, K., Chu, C., Rooney, N., & McCann, K. S. (2024). Thermal tolerance and habitat preferences mediate how freshwater fish body sizes respond to warming. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 81(4), 488-496.

7 Annexes

Annexe A : Carte de la rivière Kipawa dans le parc national d'Opémican (© Sépaq)



Annexe B : Modélisation hydrologique et thermique par CEQUEAU

B1. Principe

Le régime hydrologique naturel et la température de l'eau jouent un rôle important dans la maintenance du fonctionnement des écosystèmes et du biote aquatique (Ouellet *et al.*, 2020). L'altération des attributs des régimes hydrologique et thermique peut provoquer la dégradation des réponses écologiques particulières. Par exemple, l'altération de la magnitude du régime hydrologique (e.g. modification des débits extrêmes élevés et/ou faibles) peut entraîner la perturbation du cycle de vie aquatique et une diminution de la richesse des poissons (Sofi *et al.*, 2020). La modélisation hydrologique et thermique est une approche essentielle dans la compréhension des processus menant à des modifications des régimes thermiques et hydrologiques, l'évaluation de l'altération de ces régimes par rapport à l'état naturel des rivières, ainsi que l'évaluation de l'impact des différents scénarios de gestion de barrages.

Plusieurs modèles déterministes ont été développés pour la modélisation des débits (e.g. CEQUEAU, Hydrotel, RAVEN, HEC HMS, etc.), cependant, peu de modèles peuvent modéliser à la fois les débits et les températures de l'eau, qui est le cas du modèle CEQUEAU. Étant donné l'importance du débit et la température de l'eau dans l'évaluation de la quantité et la qualité de l'eau des rivières, CEQUEAU a été largement appliqué dans diverses études (Charron *et al.*, 2021; Dugdale *et al.*, 2017; Hani *et al.*, 2024; Khorsandi *et al.*, 2022; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017; Rahmati *et al.*, 2024; Rincón *et al.*, 2023; St-Hilaire *et al.*, 2015).

CEQUEAU est un modèle hydrologique et de température de l'eau semi-distribué permettant la simulation des débits et des températures de l'eau journalières à partir des entrées météorologiques et physiographiques (Tableau B1).

Dans CEQUEAU, un bassin versant est divisé en unités de surface égale appelées carreaux entiers (CE), dont la taille de CE est déterminée selon la superficie et la physiographie du bassin versant. Pour chaque CE, un ensemble de variables d'entrée physiographiques et météorologiques sont nécessaires (Tableau B1). Ensuite, chaque CE est divisé en un maximum de quatre carreaux partiels (CP) pour déterminer la direction de l'écoulement selon les lignes de partage des eaux. Ce double découpage permet de simuler la variation spatiale des débits dans le bassin versant et d'intégrer les modifications de débit tels que les barrages et le pompage d'eau.

Tableau B1. Liste des variables d'entrée aux modèles hydrologique et thermique CEQUEAU.

Modèle	Type	Description	Unité
Hydrologique	Physiographique	Altitude (modèle numérique de terrain)	m
		Occupation de sol (foret, rivières, marais, lacs)	-
		Hauteur de la canopée	m
		Barrage (pour les rivières régulées) : localisation, type de barrage, règle de gestion ou débit relâché et température de l'eau	-
	Climatique (ERA5)	Précipitations Totales	mm
		Températures d'air maximales et minimales	°C
	Données <i>in-situ</i> (calibration et validation)	Données hydrométriques	m ³ /s
Thermique	Climatique (ERA5)	Radiation solaire de surface	MJ/m ²
		Pression de vapeur	mmHg
		Vitesse du vent	km/h
		Couverture nuageuse (nébulosité)	0-1
	Données <i>in-situ</i> (calibration et validation)	Températures de l'eau	°C

Pour chaque CP, l'écoulement de l'eau est déterminé par la fonction de production qui explique le bilan hydrologique calculé à chaque pas de temps: formation et fonte du stock de neige, perte par évapotranspiration, écoulement dans la zone saturée (sol) et non saturée (nappe d'eau), stockage d'eau dans les lacs et marécages (Figure B1). Par la suite, l'écoulement horizontal de l'amont vers l'aval est déterminé par une fonction de transfert. Suite à la modélisation hydrologique, un bilan thermique est établi pour le volume d'eau associé sur chaque CP, déterminé à partir des débits simulés. Le bilan thermique tient compte de la radiation solaire incidente, du flux de radiation infrarouge, de

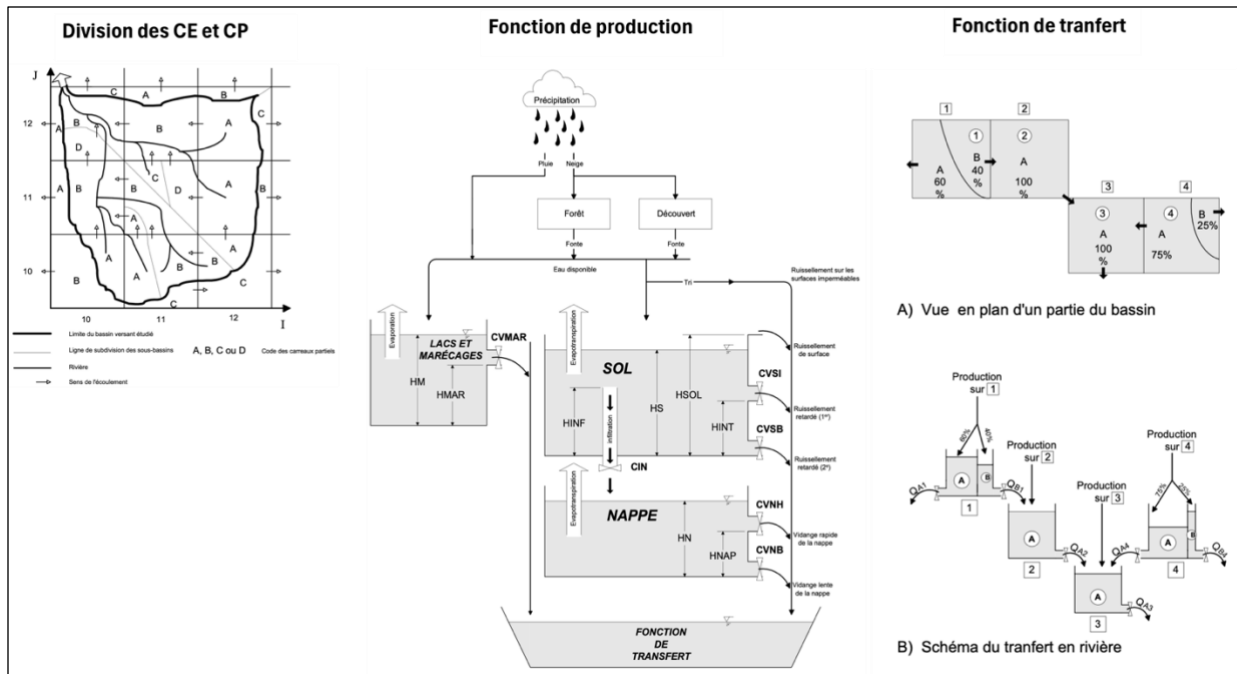


Figure B1. Principe de la modélisation hydrologique dans CEQUEAU (André St-Hilaire et al. 2011; Morin et Paquet 1995).

la convection et de l'évapotranspiration (Figure B2). Les fonctions de production, du transfert et le bilan d'énergie sont détaillés dans (St-Hilaire et al., 2015).

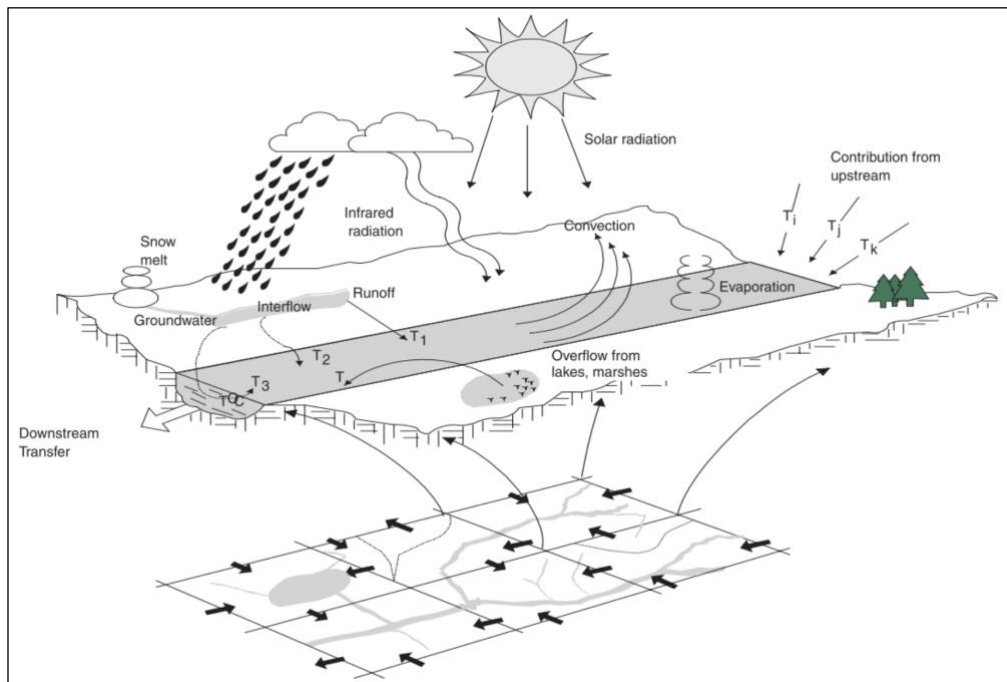


Figure 2. Représentation des composantes du bilan thermique inclus dans le modèle de température d'eau du CEQUEAU (Morin and Couillard, 1990; St-Hilaire et al., 2011).

B2. Variables d'entrée de la rivière Kipawa

Le bassin versant Kipawa (68.79 km²) est divisé en 1876 carreaux entiers de taille de 200 x 200m, avec un total de 2 234 carreaux partiels sur l'ensemble du bassin versant.

B2.1 Physiographiques

Dans le cas la rivière Kipawa :

- Les données d'altitude (Figure B3) sont extraites de modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR), disponibles sur ce lien (<https://open.canada.ca/data/en/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995>). D'autres variables d'entrée incluant la carte des sous bassins versant, l'accumulation et la direction des débits sont déterminées à partir le modèle numérique d'élévation du bassin versant.
- Les données de la couverture terrestre (30 m) (Figure B4) sont disponibles en ligne (<https://open.canada.ca/data/en/dataset/ee1580ab-a23d-4f86-a09b-79763677eb47>)
- Les données de la hauteur de la canopée (1 m) (Figure B5) sont extraites des données de forêt ouverte du Québec (<https://www.foretouverte.gouv.qc.ca>).

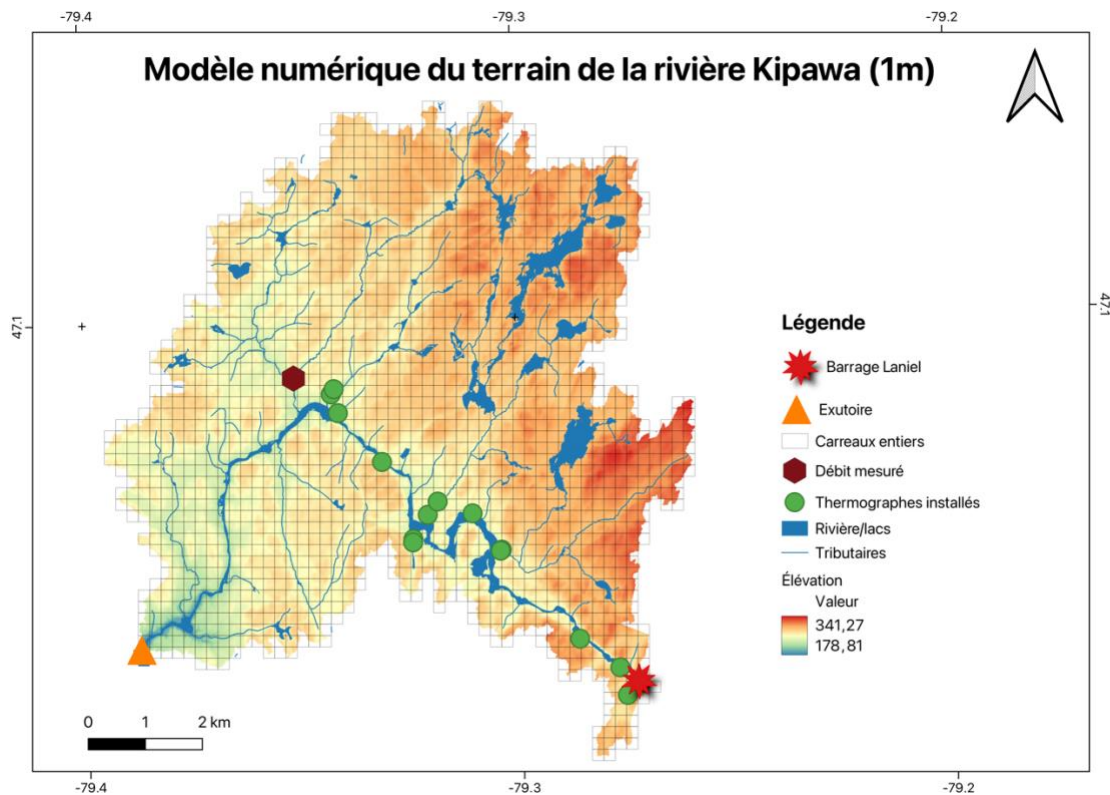


Figure B3. Modèle numérique de terrain du bassin versant Kipawa, divisé en carreaux entiers.

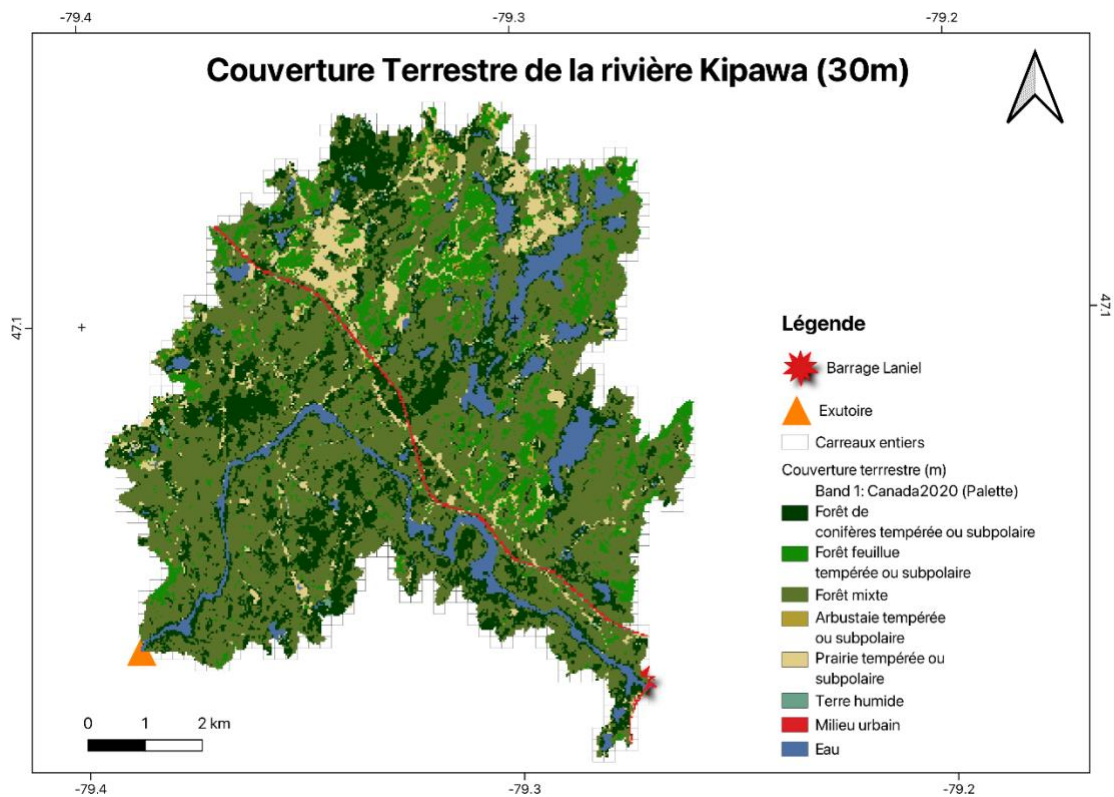


Figure B4. Couverture terrestre du bassin versant Kipawa, divisé en carreaux entiers.

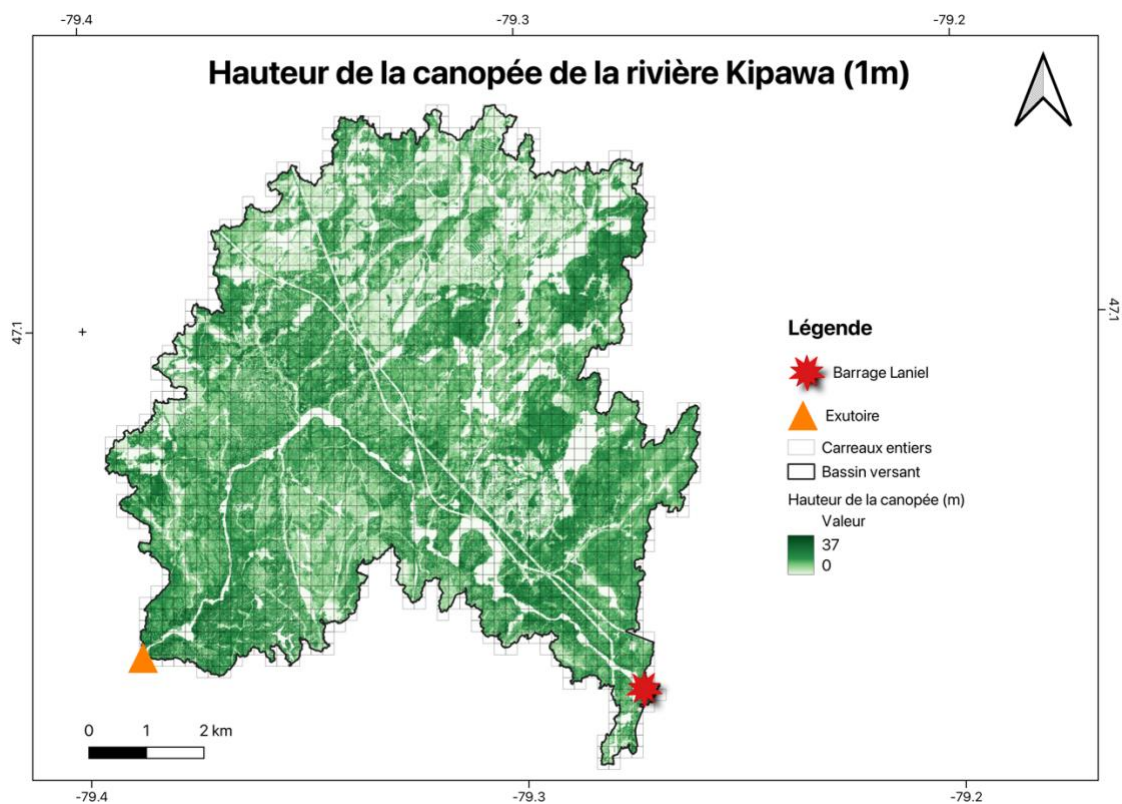


Figure B5. Hauteur de la canopée du bassin versant de la rivière Kipawa, divisé en carreaux entiers.

B2.2 Météorologiques

Les données météorologiques (Tableau B1) sont extraites des données climatiques de réanalyses de ERA5, disponibles de 1940-présent (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>).

B2.3 Données *in-situ*

Les données *in-situ* incluent :

- i- Les débits et températures de l'eau de la rivière : sont utilisées dans la calibration et la validation du modèle. Étant donnée l'absence des données hydrologiques et thermiques dans la rivière, un tributaire a été jaugé durant l'été 2024 et 16 thermographes ont été installés (Figure B3).
- ii- Dans le cas des rivières régulées, le modèle requiert les débits relâchés par le barrage/réservoir et la température de l'eau. Ces données représentent les conditions limites en amont du bassin versant. Dans le cas de la rivière Kipawa, la prise d'eau est en surface alors l'eau libéré provient principalement de la couche supérieure du réservoir. Dans ce cas, on s'intéresse aux températures de surface du réservoir Kipawa.

2.3.1 Les débits et températures de l'eau

Le débit de la rivière de Kipawa est mesuré à 200 m du barrage Laniel. En plus, un tributaire de la rivière Kipawa a été jaugé durant l'été 2024 (Figure B3), et les débits ont été déterminés à partir une courbe du tarage en utilisant l'outil hydRA (<https://hydra.nrs.gov.bc.ca/rctool/>), établissant la relation mathématique entre les niveaux de l'eau et les débits. La courbe de tarage a montré une erreur moyenne absolue faible (13.8%). Par suite, en se basant sur l'équation de cette courbe, les débits journaliers ont été estimés en utilisant les mesures de niveau d'eau (Figure B6). Ces données seront utilisées dans la calibration du modèle.

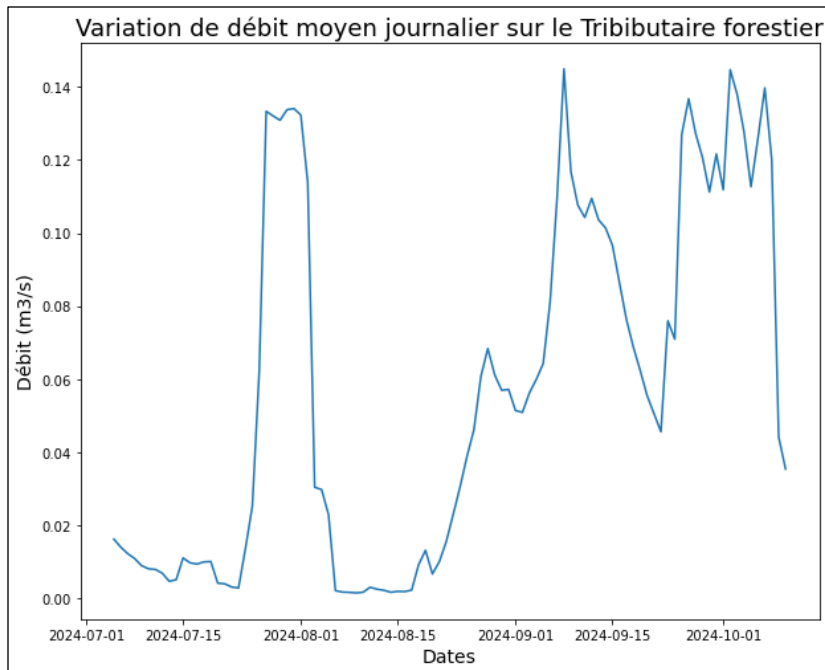


Figure B6. Variation du débit moyen journalier sur le tributaire forestier, jaugé en été 2024.

Plusieurs thermographes ont été installés sur la rivière Kipawa (Figure B3). La figure B7 présente un exemple de la variation thermique sur l'un des thermographes installés sur le tributaire jaugé en été 2024.

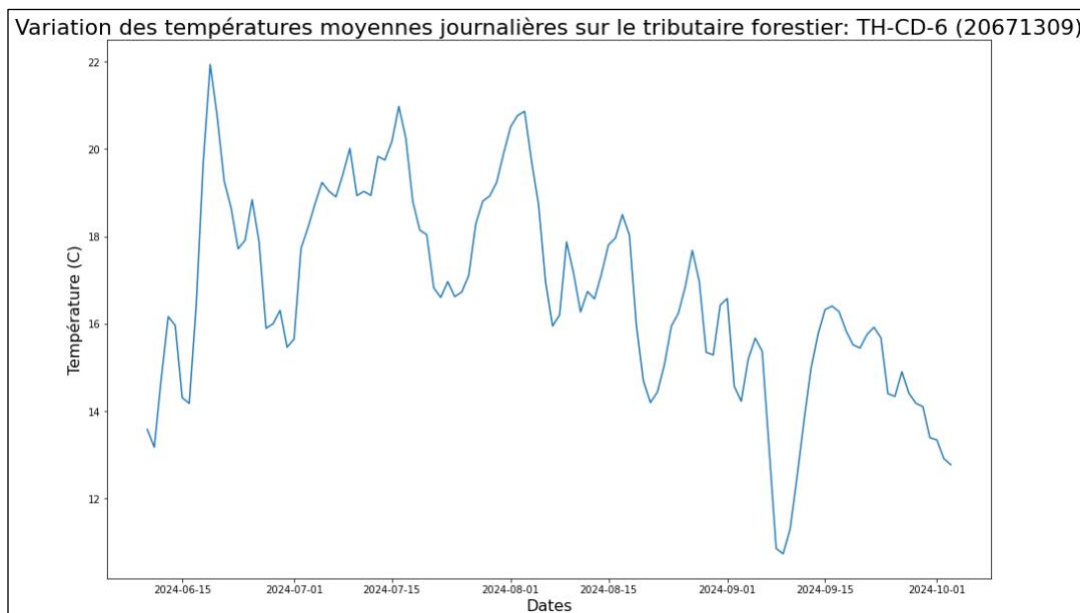


Figure B7. Variation des températures moyennes journalières sur la tributaire forestier, jauge en été 2024.

B2.3.2 Débits et températures de l'eau du réservoir Kipawa

Les débits relâchés par le réservoir Kipawa sont fournis par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (station-042609). La station est située à 200 m en aval du réservoir et les données sont disponibles de 1962-présent. Les moyennes des débits moyens et minimums annuels sont d'environ 77.6 et 10.1 m³/s.

En l'absence des données *in-situ* des températures de surface du réservoir ou des données des températures en aval du barrage, les températures du réservoir ont été extraites des images de télédétection infrarouge thermique (TIR) capturées par plusieurs satellites. Nous avons utilisé les données du Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) de la NASA, acquises par les satellites Terra et Aqua et fournissant des images TIR journalières à une large résolution spatiale (1 km). MODIS offre la plus longue série temporelle des températures de surface avec quatre acquisitions journalières provenant de deux satellites :

- Terra : 10:30 am et 10:30 pm (heure solaire locale)
- Aqua : 1:30 am et 1:30 pm (heure solaire locale)

Les températures ont été extraites en sélectionnant les pixels de l'eau du réservoir durant la période disponible 2002-2024, puis une moyenne journalière a été calculée. La figure B8 montre la variation temporelle des températures de surface de lac Kipawa.

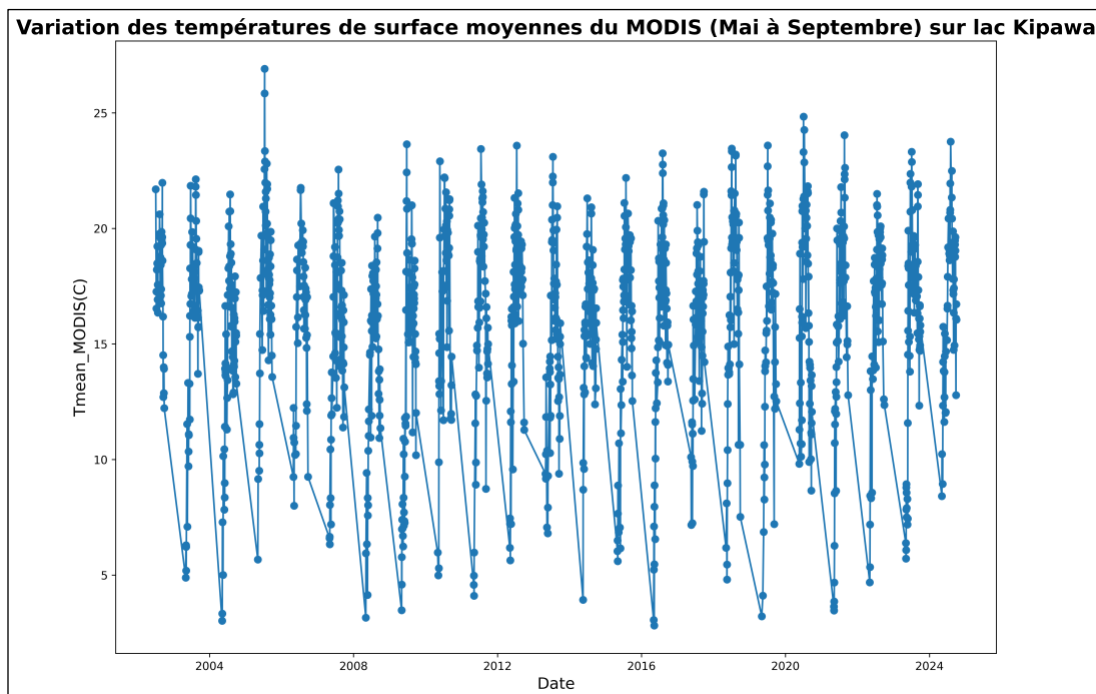


Figure B8. Variation des températures de surface moyennes du Réservoir Kipawa, extraites du satellite MODIS.

En plus de MODIS, les images LANDSAT fournissent des températures de surface tous les 16 jours, mais à une résolution spatiale plus fine (30m x 30m). Étant donnée la résolution spatiale large des températures de MODIS, ces données ont été validées en deux étapes :

- Validation avec les données des températures du LANDSAT (16 jours, 30 m) (Figure B9a)
- Validation avec les mesures *in-situ*, prises en été 2024 (Figure B9b).

Les résultats (Figure B9) montrent une forte corrélation entre les températures MODIS et les températures de LANDSAT et *in-situ* (coefficient de détermination $R^2 > 0.75$, une erreur quadratique moyenne (RMSE) comprise entre 1 et 1.9 °C, et un coefficient de Pearson $R > 0.85$). Un biais constant a été observé en comparant les données de MODIS avec les mesures *in-situ*. Étant donnée la bonne correspondance des données de MODIS avec les mesures de LANDSAT et *in-situ*, ainsi que la longue série temporelle des températures, ces données seront utilisées comme entrées dans le modèle après une correction du biais.

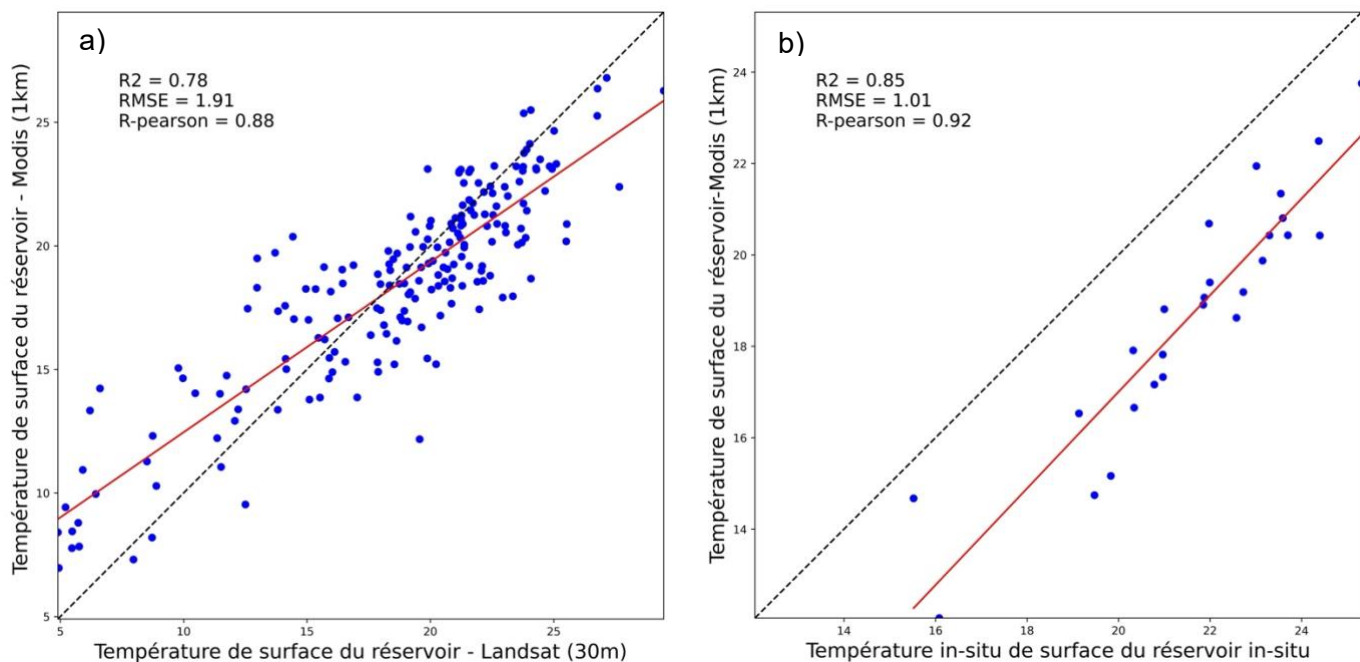


Figure 9. Validation des températures de surface de MODIS par rapport (a) aux températures de surface du LANDSAT (30 m) et (b) aux mesures *in-situ* prises en été 2024.

B3. Prochaines étapes

Les prochaines étapes pour la modélisation hydrologique consistent à :

1. Calibrer et valider le modèle hydrologique.
2. Calibrer et valider le modèle thermique.
3. Évaluer le degré d'impact de la canopée sur l'atténuation des événements chauds en comparant deux versions du CEQUEAU : une version standard (sans prise en compte de l'impact de la canopée) et une version améliorée (intégrant l'impact de la canopée).
4. Améliorer la modélisation thermique en intégrant un modèle des températures des lacs dans CEQUEAU (e.g., myLake, air2water).
5. Produire des simulations futures des débits et températures en utilisant les scénarios du changement climatique issus de différents modèles climatiques.
6. Évaluer le degré de l'altération du régime hydro-thermique dans différents scénarios climatiques en calculant plusieurs indices d'altération hydrologique, éco-hydrologique et thermique.
7. Évaluer le degré de l'altération du régime hydro-thermique dans différents scénarios du changement climatique et de gestion potentielle du barrage.

B4. Références

- Charron, C., St-Hilaire, A., Ouarda, T., van den Heuvel, M., 2021. Water temperature and hydrological modelling in the context of environmental flows and future climate change: Case study of the Wilmot River (Canada). *Water* 13(15), 2101. <https://doi.org/10.3390/w13152101>
- Dugdale, S.J., St-Hilaire, A., Allen Curry, R., 2017. Automating drainage direction and physiographic inputs to the CEQUEAU hydrological model: sensitivity testing on the lower Saint John River watershed, Canada. *Journal of Hydroinformatics* 19, 469-492. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.051>
- Hani, I., St-Hilaire, A., Ouarda, T.B.M.J., 2024. Regional stream temperature modeling in pristine Atlantic Salmon rivers: Integrating deterministic and AI-based approaches. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4886789>
- Khorsandi, M., St-Hilaire, A., Arsenault, R., 2022. Multisite calibration of a semi-distributed hydrologic and thermal model in a large Canadian watershed. *Hydrological Sciences Journal* 67, 2147-2174. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2132161>
- Morin, G., Couillard, D., 1990. Predicting river temperatures with a hydrological model. *Encyclopedia of fluid mechanic, surface and groundwater flow phenomena* 10, 171–209.
- Morin, G., Paquet, P., 1995. Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU: Guide de l'utilisateur version 2.0 pour Windows. Rapport de recherche (R435) INRS-Eau, Québec. <https://espace.inrs.ca/id/eprint/1099/1/R000435.pdf>
- Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S.J., Hannah, D.M., Krause, S., Proulx-Ouellet, S., 2020. River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Science of the Total Environment* 736, 139679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>
- Ouellet-Proulx, S., St-Hilaire, A., Boucher, M.-A., 2017. Water temperature ensemble forecasts: Implementation using the CEQUEAU model on two contrasted river systems. *Water* 9, 457. <https://doi.org/10.3390/w9070457>
- Rahmati, N., St-Hilaire, A., Curry, A., Rincón, E., 2024. Hydro-thermal modelling of the potential impacts of reservoirs on water temperature and incubation time of Atlantic salmon and brook trout in the Tobique River, Canada. *River Research and Applications* 40(8), 1484-1496. <https://doi.org/10.1002/rra.4310>
- Rincón, E., St-Hilaire, A., Bergeron, N.E., Dugdale, S.J., 2023. Combining Landsat TIR-imagery data and ERA5 reanalysis information with different calibration strategies to improve simulations of streamflow and river temperature in the Canadian Subarctic. *Hydrological Processes* 37, e15008. <https://doi.org/10.1002/hyp.15008>
- Sofi, M.S., Bhat, S.U., Rashid, I., Kuniyal, J.C., 2020. The natural flow regime: A master variable for maintaining river ecosystem health. *Ecohydrology* 13, e2247. <https://doi.org/10.1002/eco.2247>
- St-Hilaire, A., Boucher, M.-A., Chebana, F., Ouellet-Proulx, S., Zhou, Q., Larabi, S., Dugdale, S., Latraverse, M., 2015. Breathing a new life to an older model: the CEQUEAU tool for flow and water temperature simulations and forecasting. In: *Proceedings of the 22nd Canadian Hydrotechnical Conference*, Montreal, QC, Canada, 29 April–2 May 2015; p. 7.
- St-Hilaire, A., Morin, G., El-Jabi, N., Caissie, D., 2011. Water temperature modelling in a small forested stream: Implication of forest canopy and soil temperature. *Canadian Journal of Civil Engineering* 27, 1095-1108. <https://doi.org/10.1139/l00-021>

Annexe C : Description des faciès d'écoulement

Faciès d'écoulement	Description
Chute (Ct)	Segment d'un cours d'eau où le lit présente une dénivellation brusque. Le lit est alors constitué de roches en place avec, quelquefois, de très gros blocs. Il s'agit d'un obstacle souvent infranchissable pour les poissons qui se déplacent pour s'alimenter ou migrent pour se reproduire.
Cascade (Ca)	Rupture de pente en forme d'escalier, où dominant les blocs et le roc comme composantes du lit. Ce type d'obstacle est habituellement franchissable, quoiqu'il puisse être, à certains endroits, insurmontable par les poissons.
Rapide (Ra)	Légère rupture de pente où le courant est fort et où la surface de l'eau est brisée par la présence de matériaux grossiers qui affleurent. La granulométrie du lit s'échelonne généralement des galets aux gros blocs.
Seuil (Se)	Secteur peu profond constituant un haut-fond ou une légère rupture de pente du lit du cours d'eau. L'écoulement y est assez rapide et la granulométrie se situe habituellement dans la gamme des graviers, cailloux et galets.
Chenal (Ch)	Segment où la profondeur d'eau, d'environ 1 m et plus, est constante. Le courant varie de modéré à lent et la surface de l'eau demeure lisse. La granulométrie des matériaux varie du sable au galet.
Bassin (Ba)	Zone d'eau profonde située souvent au pied d'un obstacle et correspondant, la plupart du temps, à un élargissement du cours d'eau. Le courant y est lent, favorisant ainsi la sédimentation. Les bassins intercalés dans des sections de chutes et de cascades font cependant exception à cette définition : de dimensions plus restreintes, ils sont constitués principalement de roc et de matériaux grossiers.

Source : Adapté de Hydro-Québec Production (2007) provenant originellement de Boudreault (1984).