

Revue de littérature des indices thermiques

Habiba Ferchichi, André St-Hilaire et Julie Vajou
Centre Eau Terre Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique
et
Canadian Rivers Institute

Novembre 2022

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2023
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-974-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2023

La température de l'eau est une variable cruciale et déterminante de la qualité de l'eau en influençant plusieurs propriétés physico-chimiques, notamment, l'oxygène dissous, la conductivité, la salinité, densité, pH, etc. Par exemple, l'augmentation de la température de l'eau diminue le taux d'oxygène dissous, et par conséquent, réduit le taux métabolique des espèces aquatiques et la photosynthèse des plantes. Cette augmentation peut encore accroître le risque de la toxicité de l'eau en augmentant la solubilité de certains composés chimiques toxiques (ex. plomb, zinc, etc..) et la vitesse des réactions chimiques. Par conséquent, la modification de régime thermique de la rivière peut avoir diverses répercussions sur la qualité de l'eau et l'écosystème riverain, et donc une compréhension de la variabilité de régime thermique sera essentielle pour une gestion efficace des milieux aquatiques et ressources halieutiques (Ouellet et al. 2020).

La variabilité de la température de l'eau est contrôlée par plusieurs facteurs qui peuvent être classifiés en quatre catégories : les conditions atmosphériques (ex. température de l'air, précipitation, etc..), la topographie (altitude, la situation géographique, géomorphologie, etc..), l'hydrologie et hydraulique de surface (ex. débit, vitesse moyenne, etc..) et les échanges au niveau de lit de la rivière (eau/sédiment, eau/eaux souterraines, etc..) (Caissie 2006). Ces facteurs contrôlent la variabilité spatiale et temporelle du régime thermique. À l'échelle spatiale, la température de la rivière peut varier du lit du cours d'eau vers la surface, des rives au thalweg, entre les tributaires et le tronçon principal, de l'amont vers l'aval, des radiers aux fosses, des eaux souterraines aux zones hyporhéiques ainsi que sur l'ensemble de réseau hydrographique (Steel et al. 2017). En plus, les rivières localisées aux latitudes moyennes à élevées sont plus susceptibles à une augmentation importante des températures de l'air associée aux changements climatiques, qui augmentera les températures des rivières et modifiera leurs régimes thermiques (Boyer, St-Hilaire, and Bergeron 2021). À l'échelle temporelle, la variabilité de la température de l'eau suit un cycle journalier et annuel. Les variations journalières (ex. maximum/minimum journalier) varient de l'amont en aval et selon l'ordre du cours d'eau (Caissie 2006). En effet, ces variations sont faibles dans les petits ruisseaux en amont (d'ordre de Strahler 1) puisque leurs températures sont fortement influencées par les eaux souterraines et que la canopée souvent présente au-dessus du cours d'eau fait plus d'ombrage qu'en aval (Caissie 2006). Cependant, plus les affluents s'élargissent et deviennent exposés aux conditions atmosphériques, plus leurs variations journalières des températures augmentent. La variation journalière de température atteint souvent son maximum dans les cours d'eau (à la moyenne d'ordre Strahler 4) larges (>50 m) et peu profonds (<1,5 m) tandis qu'elle diminue plus en aval étant donné que la profondeur et la taille de rivière augmentent (Caissie 2006). En plus de ces variations journalières, le régime thermique varie suivant un cycle annuel. La modélisation de la variation annuelle du régime thermique a été généralement réalisée par des fonctions sinusoïdales, séries de fourrier ou fonction gaussienne durant la saison sans glace (Caissie, El-Jabi, et Satish 2001; Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2019; Maheu, Poff, et St-Hilaire 2016). La variabilité temporelle du régime thermique joue un rôle important dans la gestion des milieux aquatiques, vu son impact direct sur le cycle de vie de biote aquatique. De ce fait, plusieurs outils de caractérisation de la variabilité temporelle ont été bien développés afin d'évaluer la qualité des habitats thermiques et maintenir l'équilibre de l'écosystème fluvial.

Historiquement, la caractérisation du régime thermique a été souvent faite à travers des simples métriques (le maximum, le minimum et la moyenne) en raison du manque de données qui a été reconnu comme la principale limite pour la compréhension des régimes thermiques des rivières (Arismendi, Johnson, et al. 2013). Les bases de données de température de l'eau ont généralement moins de stations et/ou des séries plus courtes que celles des débits. En effet, grâce à la disponibilité des longues séries chronologiques des débits, le régime hydrologique a été décomposé en fonction de certaines composantes : magnitude, fréquence et durée de certains événements (crues, étiages) et taux de variation (Poff et al. 1997). Ces attributs ont été jugés pertinents pour la protection de la biodiversité et la santé de l'écosystème aquatique, et plusieurs (des centaines) métriques ont été développées pour en faire l'évaluation quantitative. Ces dernières années, les progrès des nouvelles technologies de collecte de données ont élargi la disponibilité des données des températures de l'eau. Des thermographes relativement peu coûteux et capables de faire un suivi à des pas de temps relativement courts (horaires ou moins) avec une précision adéquate pour de nombreuses applications (moins de 0,5 °C) sont disponibles et ont été déployés dans plusieurs rivières du Québec et d'ailleurs (Ouellet et al. 2020; Steel et al. 2017). Par conséquent, la caractérisation de régime thermiques, similairement au régime hydrologique, a évolué vers l'application des approches multi-métriques similaires à celles utilisées pour décrire le régime hydrologique, mais pour les attributs du régime thermique : magnitude, fréquence, durée, occurrence d'événements chauds ou froids et taux de variation (Arismendi, Johnson, et al. 2013; Isaak et al. 2020; Maheu, Poff, et St-Hilaire 2016; Willis, Peek, et Rypel 2021). Le tableau ci-dessous présente des exemples des métriques qui ont été utilisées dans la caractérisation des régimes thermiques dans le Nord des États-Unis (Arismendi, Johnson, et al. 2013; Chu, Jones, and Allin 2010; Isaak, Luce, Chandler, et al. 2018; Isaak et al. 2020; Jones and Schmidt 2018; Steel, Sowder, and Peterson 2016).

Tableau 1. Liste de métriques utilisées dans la description des régimes thermiques dans le Nord des États-Unis

Attributs	Définition	Exemples de métriques
Magnitude	Une mesure fixe de température (ex. moyenne, minimum, maximum) pour une période donnée	Température moyenne (estivale, printanière et automnale)
		Température moyenne mensuelle des mois chauds (juillet, août, septembre)
		La moyenne hebdomadaire des températures maximales journalières (juillet, août, septembre)
		Température maximale et minimale annuelle des moyennes journalières
		Température maximale et minimale annuelle des moyennes hebdomadaires
		Degrés-jours annuels
Taux de variation	Le taux du changement de la température de l'eau pour une période donnée	Écart-type annuel des moyennes journalières
		Écart-type des moyennes journalières durant (l'hiver, printemps, l'été, l'automne)
		Écart-type des moyennes journalières du mois d'août
		L'écart annuel températures extrêmes journalières

		L'écart annuel des températures extrêmes hebdomadaires
Fréquence	Le nombre d'occurrences où la température dépasse un seuil de température établi	Fréquence des jours chauds (température moyenne journalière > 20 °C)
		Fréquence des jours froids (température moyenne journalière < 2 °C)
Occurrence	Le moment (ex. date de début ou de fin) associé à des conditions de température spécifiques	Jour de la température maximale journalière (jour julien)
		La date de 5 % de degrés jours
		La date de 25 % de degrés jours
		La date de 50 % de degrés jours
		La date de 75 % de degrés jours
		La date de 95 % de degrés jours
Durée	La période du temps associée à des températures précises	Durée de la saison de croissance (différence entre la date de 5 % et 95 % de degrés jours)
		Durée des jours chauds (température moyenne journalière > 20 °C)
		Durée des jours froids (température moyenne journalière < 2 °C)

Ces attributs, décrits par une série de métriques, jouent un rôle important dans la qualité des habitats de l'écosystème aquatique en influençant plusieurs processus biologiques et écologiques (Arismendi, Johnson, et al. 2013; Olden and Naiman 2010; Steel et al. 2017). Par exemple, il a été démontré que le nombre de degrés-jours cumulés, décrivant la magnitude, influence la croissance des poissons en favorisant le développement et l'émergence des œufs de poissons. En effet, certaines espèces aquatiques poïkilothermes, ont des limites physiologiques vis-à-vis la température de l'eau et possèdent des intervalles de tolérance thermique bien déterminés (Beitinger, Bennett, and McCauley 2000). Cette relation a même conduit à une classification des poissons selon leur intervalle de tolérance thermique (Wehrly, Wiley, et Seelbach 2003). Par exemple, Coker, Portt, et Minns (2001) ont classifié des catégories de préférences thermiques estivales pour les poissons d'eau douce du Canada comme suit : les espèces d'eau froide (températures inférieures à 19 °C), les espèces d'eau tempérée (température entre 19 et 25 °C) et espèces d'eau chaude (températures supérieures à 25 °C). En conséquence, plusieurs métriques décrivant la fréquence et la durée ont été dérivées de ces seuils et utilisées dans la caractérisation et la classification des régimes thermiques (Maheu et al. 2016), notamment le nombre de jours où la température maximale journalière dépasse les limites supérieures de préférence thermique des poissons d'eau froide et tempérée (19 et 25 °C). Le dépassement de certains seuils des températures tolérées par les stades juvéniles des espèces aquatiques constitue une source de stress majeur sur leur croissance (Elliott et Hurley 1997), influence leur distribution géographique (Ebersole, Liss, et Frissell 2001), leur abondance (Harvey, White, et Nakamoto 2002) ainsi que leur taux de mortalité (Bjornn et Reiser 1991). Ainsi, le tableau ci-dessous présente les seuils des températures létales initiales (les températures pouvant créer une mortalité pour 50 % alors que d'autres poissons peuvent encore les tolérer) de certaines espèces des poissons d'eau froide (salmonidés) présents dans l'Est du Canada (Jonsson et Jonsson 2009).

Tableau 2. Seuils des températures létales initiales pour certaines espèces de salmonidés (Jonsson et Jonsson 2009)

Espèce	Limite supérieure de la température létale initiale (°C)
Omble de fontaine (<i>Salvelinus fontinalis</i>)	25,3
Truite arc-en-ciel (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	26,2
Saumon Atlantique (<i>Salmo salar</i>)	27,8

L'altération des régimes thermiques a pris beaucoup d'importance, en particulier dans le contexte du changement climatique. En effet, le réchauffement des températures de l'eau a été observé dans plusieurs rivières et les projections climatiques anticipent une augmentation continue des températures des rivières qui contribuera à une dégradation des habitats aquatiques, et par conséquent, plusieurs espèces d'eau douce deviendront vulnérables (Isaak, Luce, Horan, et al. 2018; Isaak et al. 2017; Van Vliet et al. 2011; van Vliet et al. 2013). Au Canada, la température annuelle de l'air a augmenté environ deux fois plus (1,7 °C) que le taux d'augmentation mondial (0,8 °C) entre 1984 et 2016 (Zhang et al. 2019). Les projections climatiques ont prévu que ce réchauffement continuera de la même intensité avec une augmentation de température de l'air entre 2 °C et 6 °C d'ici la fin du XXI^e siècle pour des scénarios d'émissions de gaz à effet serre respectivement faible et élevée (Zhang et al. 2019). Le réchauffement sera accompagné d'une croissance des températures extrêmes et la fréquence des journées extrêmement chaudes ($T_{\text{maximale}} > 30$ °C et/ou $T_{\text{minimale}} > 22$ °C) (Zhang et al. 2019). Les événements de chaleur deviendront plus intenses et plus fréquents, alors que les événements froids deviendront moins intenses et moins fréquents (Zhang et al. 2019). En contrepartie, une analyse des températures menée par Van Vliet et al. (2011) a montré une augmentation moyenne annuelle globale de la température de l'eau des rivières de 1,3 °C et 3,8 °C en réponse d'une hausse de 2 °C et 6 °C de la température de l'air.

Dans le contexte du changement climatique et son impact sur les températures de l'eau, certaines métriques des attributs du régime thermique, écologiquement pertinentes pour les écosystèmes d'eau douce, ont été utilisées et projetées dans une étude récente sur les projections futures des débits et températures des rivières à l'échelle mondiale (Bosmans et al. 2022). Le tableau ci-dessous présente ces métriques :

Tableau 3. Liste de métriques écologiquement pertinentes de la température de l'eau (Bosmans et al. 2022)

Attributs	Métriques
Magnitude	Température moyenne annuelle
	Température maximale du mois le plus chaud
	Température minimale du mois le plus froid
	Température moyenne du trimestre le plus humide
	Température moyenne du trimestre le plus sec
	Température moyenne du trimestre le plus chaud
	Température moyenne du trimestre le plus froid
	Température moyenne du mois le plus chaud
	Température moyenne du mois le plus froid
	Température moyenne du mois le plus humide
	Température moyenne du mois le plus sec
Taux de variation	Écart annuel des températures extrêmes

	Index de saisonnalité des températures
Occurrence	La semaine de la température minimale
	La semaine de la température maximale
	Le mois le plus chaud ou froid
	Le trimestre le plus chaud ou froid
Durée	Nombre de semaines avec températures $\leq 0,5$ °C

En plus du changement climatique, le régime thermique fait face à d'autres pressions à cause des activités anthropiques (ex. irrigation, barrages, etc.). Les barrages peuvent avoir un impact majeur sur la température de la rivière en altérant les attributs de régime thermique en aval (Olden et Naiman 2010). Cet impact varie selon le type de barrage, le mode d'opération, la position du barrage dans le bassin versant ainsi que la présence d'un réservoir et son volume (Olden et Naiman 2010). Par exemple, les petits barrages peu profonds provoquent le réchauffement de la température en aval tandis que les grands barrages avec des réservoirs profonds provoquent un refroidissement (Olden et Naiman 2010). Maheu et al. (2016) ont montré que les barrages de taille moyenne dans l'Est du Canada ont modifié la magnitude et le taux de variation de la température estivale, en comparant 15 métriques des attributs des régimes thermiques naturels et modifiés (magnitude, fréquence, durée, occurrence d'événements chauds ou froids et taux de variation).

Cette approche multi-métrique, décrivant les différents attributs du régime thermique (magnitude, fréquence, durée et occurrence d'événements chauds ou froids, taux de variation), présente plusieurs contraintes. D'abord, elle requiert un grand nombre des métriques qui sont parfois redondantes et qui peuvent différer selon le contexte d'étude et l'impact écologique d'intérêt. Par conséquent, cette approche n'est pas parcimonieuse, et pour cette raison, plusieurs études ont utilisé l'analyse multivariée (ex. l'analyse en composantes principales) afin de sélectionner l'ensemble des métriques les plus pertinentes dans la caractérisation du régime thermique (Isaak, Luce, Horan, et al. 2018; Rivers-Moore, Dallas, et Morris 2013). Ensuite, le calcul de ces métriques thermiques avec une précision acceptable requiert une série chronologique relativement longue de l'ordre de 12 ans pour les métriques calculées à partir des données journalières et 3 ans pour celles calculées à partir des données sub-journalières (Jones et Schmidt 2018).

D'autres méthodes de caractérisation des régimes thermique ont été appliquées permettant de faciliter leurs évaluations, comparaisons et classifications. Comme indiqué précédemment, les fonctions sinusoïdales ont été souvent appliquées dans la modélisation des régimes thermiques saisonniers en simulant les températures moyennes journalières interannuelles des rivières en fonction du temps durant la saison sans glace (Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2019). Cependant, cette approche est limitée puisqu'elle est ajustée uniquement sur la saison sans glace et par conséquent les paramètres du modèle sinusoïdal ne coïncident pas avec les métriques du régime thermique (Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2019). Par exemple, la valeur moyenne de la fonction sinusoïdale ne correspond pas à la température moyenne annuelle. Récemment, une étude sur la classification des régimes thermiques des rivières au Québec a montré qu'une fonction gaussienne permet de caractériser et classifier les régimes thermiques des rivières du Québec (Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2019). En effet, une fonction gaussienne est ajustée sur les températures moyennes journalières par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$T_e(d) = a e^{(-\frac{1}{2}(\frac{d-c}{b})^2)} \quad (1)$$

Avec d représente le jour de l'année ([1 365]), T_e la valeur estimée de la température moyenne journalière interannuelle à travers le modèle ajusté au jour d (°C), a facteur d'échelle (la moyenne de la valeur maximale), b l'écart type (durée de saison chaude) et c la valeur moyenne (la date d'occurrence de la valeur maximale).

L'équation (1) est relativement facile à ajuster et permet d'obtenir des estimations non biaisées. Au contraire des paramètres des fonctions sinusoïdales, les paramètres du modèle gaussien sont faciles à interpréter étant donné qu'ils sont liés aux propriétés du régime thermique de la rivière (Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2019). En outre, Daigle, Boyer, et St-Hilaire (2019) ont corrélé les paramètres de la fonction gaussienne avec les caractéristiques physio-climatiques des rivières.

Une étude récente a développé une analyse thermique régionale permettant de prédire des métriques thermiques qui sont jugées pertinentes dans la gestion et protection de saumon atlantique dans l'Est du Canada (Abidi et al. 2022). Ces métriques incluent les paramètres de la fonction gaussienne établis par Daigle, Boyer, et St-Hilaire (2019), la moyenne interannuelle de la température maximale de l'eau et la moyenne interannuelle de nombre maximum des jours consécutifs avec des températures au-dessus des seuils potentiellement stressants pour le saumon atlantique ($T_{\text{minimale}} > 20$ °C et $T_{\text{maximale}} > 25$ °C). Ces métriques caractérisent les attributs de la température de l'eau en termes de magnitude, taux de variation, occurrence, fréquence et durée. Une autre étude établie sur l'analyse régionale de la température des rivières en France a proposé le pic thermique comme une métrique thermique simple, mais pertinente d'un point de vue écologique et indicatrice de la magnitude des températures estivales extrêmes (Beaufort et al. 2022). Cette métrique (T_p) représente la moyenne interannuelle des températures moyennes des plus chauds 30 jours consécutifs de chaque année (Équation 2). Beaufort et al. (2022) a modélisé le pic thermique en fonction de la surface de drainage, la moyenne de la température estivale, la moyenne mensuelle de débit spécifique minimale et le couvert végétal riverain. En plus, ils ont montré que cette métrique est rigoureuse dans la caractérisation de régime thermique à l'échelle régionale.

Le pic thermique est défini comme suit :

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{(T_{w,30})_i}}{n} \quad (2)$$

Avec : T_p représente le pic thermique, $\overline{(T_{w,30})}$ est la température moyenne des plus chauds 30 jours consécutifs de chaque année, i est l'index de l'année et n est le nombre des années des données des températures de l'eau.

La température de l'eau élevée présente une source de stress et de mortalité pour certaines espèces aquatiques, qui peut être amplifiée lorsqu'elle est couplée avec les débits d'étiage (Arismendi, Safeeq, et al. 2013). En fait, les événements simultanés des périodes d'étiage et des températures de l'eau extrêmes, potentiellement stressants pour plusieurs espèces aquatiques, deviennent de plus en plus importants, en particulier dans le contexte du changement climatique, qui peut augmenter la température de l'eau, diminuer les débits d'étiage et augmenter la fréquence et la durée des événements extrêmes synchrones (Arismendi, Safeeq, et al. 2013; Van Vliet et al. 2011; van Vliet et al. 2013). En effet, les projections climatiques anticipent une augmentation des événements

simultanés des températures maximales et débits d'étiages dans nombreuses régions (Arismendi, Safeeq, et al. 2013), qui augmentera probablement le stress sur les populations de saumon et réduira leur reproduction (Mantua, Tohver, et Hamlet 2010). Dans ce contexte, une récente étude sur la classification de sensibilités des rivières du Québec aux prélèvements de l'eau a combiné la caractérisation de leurs régimes thermiques, leurs débits de base et la relation entre ces deux variables dans la classification des rivières (Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2021). Cette classification a combiné les indicateurs thermiques (ex. la température annuelle maximale moyenne) et le débit d'étiage (l'indice du débit de base). Le régime thermique a été caractérisé par l'intermédiaire de l'approche de (Daigle, Boyer, et St-Hilaire 2019) en ajustant une fonction gaussienne sur les températures moyennes journalières. Seulement, le paramètre a , qui correspond à la valeur maximale annuelle moyenne, a été sélectionné comme indicateur de la caractérisation du régime thermique décrivant la sévérité des épisodes chauds et stressants pour les espèces aquatiques. En plus, Daigle, Boyer, et St-Hilaire (2021) ont montré que ce paramètre est le mieux estimé en ajustant le modèle gaussien sur des courtes séries des températures (de 5 ans ou plus). Daigle, Boyer, et St-Hilaire (2021) ont corrélé les caractéristiques physiques des bassins versants des rivières étudiées au paramètre a et l'indice de débit de base, permettant de spatialiser chacune de variables en fonction de ces caractéristiques associées. Cette approche a permis de classer les rivières du Québec en classes du paramètre « a » (froid, tiède et chaud), et classes de débit de base (faible, moyen et élevé). Puis, un indice combiné a été développé en fonction de classes de deux paramètres variant de 1 (élevé et froid) à 9 (faible et chaud) permettant de classer les rivières du Québec en fonction du caractéristique thermique et débit de base.

Contrairement aux approches précédentes qui se concentrent sur les caractéristiques thermiques de la variabilité temporelle de la température l'eau, d'autres études ont caractérisé le régime thermique des rivières en fonction de la relation entre la température de l'air et l'eau (Chu et al. 2009; Garner et al. 2014; Kelleher et al. 2012; Luce et al. 2014). Ces études ont caractérisé le régime thermique des rivières en fonction de leur sensibilité thermique, qui représente la valeur de la pente de régression linéaire (Équation. 3) entre les mesures de la température de l'eau (T_w) et celles de l'air (T_a) (Chang et Psaris 2013; Culler et al. 2018). Une valeur de pente élevée reflète une sensibilité élevée de la rivière, i.e., changement élevé des températures de l'eau pour un changement de température de l'air donné (Kelleher et al. 2012). Par conséquent, la pente de la relation $T_{air} - T_{eau}$ (lorsque supposée linéaire) peut indiquer la variation du régime thermique des rivières dans un contexte de changement climatique (Chang et Psaris 2013; Culler et al. 2018; Kelleher et al. 2012). Malgré que la température de l'air explique une partie importante de la variabilité de la température de l'eau, la relation air-eau n'est pas toujours linéaire surtout pour des températures de l'air extrêmes (maximum et minimum) et elle dépend aussi du pas de temps choisi et des conditions locales (Benyahya et al. 2007). Par exemple, la température de l'air est moins fortement corrélée à la température de l'eau dans les petits affluents situés en amont dans les bassins versants, où la température de l'eau est souvent influencée par les apports des eaux souterraines relativement plus importants que pour les cours d'eau plus gros situés en aval (Caissie 2006). L'équation (3) décrit la relation linéaire entre la température de l'air et celle de l'eau :

$$T_w = \alpha T_a + \beta \quad (3)$$

Avec T_w : la température de l'eau de rivière (°C), T_a : la température de l'air (°C), α est la pente (°C/°C) entre les températures de l'eau et de l'air (sensibilité thermique) et β est l'ordonnée à l'origine (°C).

Récemment, Boyer, St-Hilaire, et Bergeron (2021) ont comparé les sensibilités thermiques des rivières aux saumons réparties dans des régions climatiques différentes au Québec. En effet, l'un des défis qui pourraient se poser dans l'étude des sensibilités thermiques des rivières est l'impact de la variation spatiale et interannuelle des conditions climatiques dans lesquelles les données ont été collectées, qui peuvent influencer les sensibilités thermiques observées (Boyer, St-Hilaire, et Bergeron 2021). Dans le cas où les sensibilités thermiques sont calculées pour des rivières réparties dans des régions climatiques différentes, les plages des températures (air et eau) et précipitations (et par conséquent les débits) ne sont pas comparables même si les données sont collectées durant la même période. Boyer, St-Hilaire, et Bergeron (2021) ont défini neuf classes climatiques sur la base de la température de l'air et les précipitations, vu que la température de l'eau varie en fonction de ces deux variables, et analysé la variation des sensibilités thermiques des rivières durant la période estivale en fonction de ces classes. Les auteurs ont montré que les sensibilités thermiques varient selon les classes climatiques et suggèrent de calculer et comparer les sensibilités thermiques pour des conditions climatiques similaires et donc d'utiliser la même classe des conditions climatiques, en particulier celui jugé (normal-normal) parmi les 9 classes étudiées. Cette classe des conditions climatiques (normal-normal), i.e., les années au cours desquelles les valeurs moyennes des températures de l'air et des précipitations sont similaires aux normales climatiques, permet une comparaison plus adéquate entre les rivières. Ils ont aussi montré que la contextualisation climatique dans l'étude de sensibilité, en utilisant une seule classe de climatologie de référence, permet de comparer les sensibilités thermiques des rivières ayant des séries temporelles relativement courtes.

Une autre étude récente a réalisé une analyse comparative de suivi des températures de l'eau aux stations hydrométriques des rivières du Québec et les autres stations dans le même bassin versant (Ferchichi et St-Hilaire 2021). Étant donné que les capteurs de température sont souvent colocalisés avec des stations hydrométriques, cette étude a essayé d'évaluer si les températures de l'eau prises à la station hydrométrique sont représentatives de la variation thermique de la rivière en comparant les séries temporelles des températures de l'eau prise à la station hydrométrique avec celles mesurées par des thermographes déployés ailleurs dans le même bassin versant. Plusieurs indicateurs thermiques et statistiques ont été calculés et comparés à partir de diverses analyses statistiques : i) l'analyse des statistiques descriptives : le minimum et le maximum des températures journalières (maximale, minimale, moyenne) ainsi que le maximum de différence entre les séries temporelles des températures (minimum et maximum) ii) les paramètres du modèle gaussien ajusté sur des moyennes journalières interannuelles iii) l'analyse de l'entropie en calculant l'information mutuelle qui est une mesure de la quantité d'information qu'une série chronologique de températures contient sur une autre et iv) l'analyse de la sensibilité thermique. Parmi les indices calculés et comparés, seulement l'information mutuelle a montré une variation spatiale des températures mesurées au niveau de station hydrométrique et le reste des thermographes (Ferchichi et St-Hilaire 2021). En fait, les thermographes situés sur le même tronçon de rivière que les stations hydrométriques présentaient des variations plus faibles d'information mutuelle que celles situées sur des tronçons différents (i.e., dans un autre bras de rivière ou affluent). Ainsi, les distributions de températures de ces dernières stations étaient moins similaires que celles situées sur le tronçon principal de rivière que la station hydrométrique. Alors que l'information mutuelle permet la comparaison de paires de stations, l'entropie peut être calculée pour chaque station individuellement.

La caractérisation de la température en rivière est un problème multivarié complexe étant donné qu'il inclut plusieurs facteurs liés aux propriétés thermiques (ex. les températures extrêmes...), conditions hydrologiques (ex. débit d'étiage...) et d'autres écologiques (ex. dépassement des seuils de tolérance thermique des espèces aquatiques...). Des problèmes similaires ont été rencontrés dans d'autres contextes et traités par une approche consistant à concevoir un indice composite. L'indice composite est un indicateur composé d'un ensemble d'indicateurs individuels ou univariés en fournissant une mesure simplifiée qui synthétise leur qualité ou performance. Par exemple, l'Indice de Qualité d'Eau (IQE) du CCME (le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement) permet de synthétiser l'information de la qualité de l'eau et facilite son explication et présentation aux gestionnaires et grand public. En effet, l'IQE du CCME combine mathématiquement plusieurs variables décrivant la qualité de l'eau (ex. oxygène dissous, pH, phosphore total, température, etc..) et simplifie l'évaluation de la qualité de l'eau (tronçon de rivière, lac, etc..) et son évolution par rapport aux normes et aux recommandations contrôlant son altération par les activités humaines (Conseil canadien des ministres de l'environnement 2016). Cet indice a été adopté depuis 2001 et appliqué dans la surveillance de la qualité de l'eau à l'échelle canadienne et ailleurs dans le monde, notamment comme indice de qualité d'eau potable et de qualité des eaux de surface (ex. lacs, rivières, etc.) (Conseil canadien des ministres de l'environnement 2016).

Après avoir sélectionné et mesuré les variables de qualité de l'eau, le calcul de l'IQE du CCME est basé sur la combinaison de trois facteurs décrivant la qualité de l'eau : i) l'étendue, qui représente le nombre de variables ou indices ayant des valeurs qui n'ont pas respecté les critères recommandés de la qualité des eaux ; ii) la fréquence, qui est le nombre de fois où ces paramètres n'ont pas été conformes aux valeurs recommandées, et iii) l'amplitude, qui est l'écart des paramètres non conformes par rapport aux valeurs recommandées. À partir de ces facteurs, l'indice produit une valeur simple située entre 0 (qualité de l'eau la plus mauvaise) et 100 (qualité de l'eau la meilleure). Suivant le Conseil canadien des ministres de l'environnement (2016), l'indice se calcule de la manière suivante :

1. Préciser la masse d'eau à étudier (lac, tronçon de rivière, etc..) qui peut être définie par une ou plusieurs stations. Le nombre de stations à inclure dépend du type de masse d'eau. Par exemple, il est recommandé d'inclure un plus grand nombre de stations dans une rivière que dans un lac afin de bien capturer la variabilité naturelle.
 2. Définir la période de l'étude qui peut varier selon la disponibilité des données et l'exigence de l'étude.
 3. Choisir un minimum de 8 et un maximum de 20 variables de qualité de l'eau appropriés à la région d'étude puisque ces variables diffèrent d'une région à l'autre.
 4. Préciser les valeurs recommandées correspondantes aux paramètres sélectionnés.
 5. Calculer les trois facteurs qui composent l'IQE : l'étendue (F_1), la fréquence (F_2) et l'amplitude (F_3) :
- F_1 (**étendue**) représente le pourcentage de paramètres mesurés non conformes aux valeurs recommandées par rapport au nombre total des paramètres mesurés :

$$F_1(\%) = \left(\frac{\text{nombre de paramètres non conformes}}{\text{nombre total de paramètres}} \right) \times 100 \quad (4)$$

- F_2 (**fréquence**) représente le pourcentage de mesures qui n'ont pas respecté les valeurs recommandées (« résultats non conformes ») par rapport au nombre total des mesures :

$$F_2(\%) = \left(\frac{\text{nombre de mesures non conformes}}{\text{nombre total de mesures}} \right) \times 100 \quad (5)$$

- F_3 (**amplitude**) représente l'écart entre les mesures non conformes et les valeurs recommandées correspondantes. F_3 se calcule en trois étapes :
 - Calcul du coefficient d'écart (CE) : il représente l'amplitude pour laquelle une mesure individuelle (i) d'un paramètre est supérieure à sa valeur recommandée (ou inférieure, lorsque la valeur recommandée est un minimum) :

- Lorsque la mesure individuelle est supérieure à la valeur recommandée :

$$CE_i = \left(\frac{\text{la valeur de la mesure non conforme}_i}{\text{la valeur recommandée}} \right) - 1 \quad (6)$$

- Lorsque la mesure individuelle est inférieure à la valeur recommandée :

$$CE_i = \left(\frac{\text{la valeur recommandée}}{\text{la valeur de la mesure non conforme}_i} \right) - 1 \quad (7)$$

- Calcul de la somme normalisée des coefficients d'écart (*sncé*) : elle représente le degré global de non-conformité, calculé en divisant la somme des coefficients d'écart de toutes les mesures non conformes de tous les paramètres (n) par le nombre total des mesures effectuées (conformes et non conformes) :

$$sncé = \left(\frac{\sum_{i=1}^n CE_i}{\text{nombre total des mesures}} \right) \quad (8)$$

- Calcul du facteur F_3 (amplitude) : il est calculé en fonction de *sncé* en utilisant une fonction asymptotique qui tend vers une valeur fixe dans le même intervalle des autres facteurs qui se situe entre 0 à 100 :

$$F_3 = \left(\frac{sncé}{0.01 \times sncé + sncé} \right) \quad (9)$$

6. Calculer l'IQE du CCME : il se calcule comme étant une somme des trois vecteurs des facteurs (étendue, fréquence et amplitude) dans un espace tridimensionnel. La division par (1,732) normalise les valeurs de l'indice dans un intervalle de 0 à 100.

$$IQE \text{ du CCME} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right) \quad (10)$$

L'indice produit une valeur qui se situe entre 0 et 100. Selon le Conseil canadien des ministres de l'environnement (2016), les valeurs de l'indice sont classées en cinq catégories de la qualité de l'eau :

- **Excellente** : (95 < IQE du CCME < 100) : « *La qualité de l'eau est préservée, pratiquement aucune menace ni détérioration n'étant décelée ; les conditions sont très proches des niveaux naturels.* »
- **Bonne** : (80 < IQE du CCME < 94) : « *La qualité de l'eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineure étant observée ; les conditions s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables.* »
- **Moyenne** : (65 < IQE du CCME < 79) : « *La qualité de l'eau est ordinairement préservée, mais elle est occasionnellement menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent parfois des niveaux naturels ou souhaitables.* »
- **Médiocre** : (45 < IQE du CCME < 64) : « *La qualité de l'eau est fréquemment menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent souvent des niveaux naturels ou souhaitables.* »
- **Mauvaise** : (0 < IQE du CCME < 44) : « *La qualité de l'eau est presque toujours menacée ou détériorée ; les conditions s'écartent généralement des niveaux naturels ou souhaitables.* »

El-Jabi, Caissie, et Turkkan (2014) ont étudié la qualité de l'eau de surface de 15 rivières au Nouveau-Brunswick dans un contexte du changement climatique en estimant l'IQE du CCME sous différents scénarios climatiques. Dans cette étude, seulement la température de l'eau et l'oxygène dissous, étant donnée sa corrélation forte avec la température de l'eau, changeront en réponse au réchauffement climatique.

Au Québec, la qualité de l'eau des rivières et fleuves est évaluée par l'intermédiaire de l'Indice de la Qualité Bactériologique et Physicochimique de l'eau (IQBP). Cet indice a été développé par MELCC en 1977 en considérant les quatre types d'usages : « *l'approvisionnement en eau brute à des fins de consommation, la baignade et les activités nautiques, la protection de la vie aquatique et la protection du plan d'eau contre l'eutrophisation* » (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 2022).

La formulation originale de l'IQBP (IQBP₁₀) incluait dix variables, dont neuf sont physicochimiques et une bactériologique, qui constituent les sous-indices de l'IQBP : les coliformes fécaux, le phosphore total, l'azote ammoniacal (dissous), les nitrites-nitrates, la chlorophylle "a" totale, les matières en suspension (MES), la turbidité, le pH, la demande biochimique en oxygène sur cinq jours et le pourcentage de saturation en oxygène dissous (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 2022). Ces variables permettent de prendre en compte les quatre types d'usages pour lesquels l'IQBP est développé.

Il existe deux déclinaisons de l'IQBP dont leur application dépend de type de masse de l'eau étudié :

- L'IQBP₅ est appliqué pour les masses d'eau du fleuve et inclut seulement cinq variables : le phosphore total, les coliformes fécaux, l'azote ammoniacal, les nitrites-nitrates et la chlorophylle "a" active.
- L'IQBP₆ est appliqué pour les masses d'eau des rivières et inclut six variables : le phosphore total, les coliformes fécaux, les MES, l'azote ammoniacal, les nitrites-nitrates et la chlorophylle "a" active.

Pour chaque variable de l'IQBP, la mesure prise est transformée en un sous-indice (SI) variant de 0 (très mauvaise qualité) à 100 (bonne qualité). Cette transformation se fait par l'intermédiaire des courbes d'appréciation de la qualité de l'eau, qui ont été développées par Hébert (1997), permettant de délimiter les classes de qualité de chaque variable. Les valeurs transformées des sous-indices (SI) sont classées en 5 catégories de qualité :

- Bonne (80 < SI < 100)
- Satisfaisante (60 < SI < 79)
- Douteuse (40 < SI < 59)
- Mauvaise (20 < SI < 39)
- Très mauvaise (0 < SI < 19)

Puis, l'IQBP correspond à la valeur de son sous-indice le plus faible, c'est-à-dire le sous-indice qui s'avère le plus problématique. Donc, l'IQBP est de type déclassant. Il est déterminé comme suit :

$$IQBP_6 = \min(SI_1, SI_2, \dots, SI_6) \quad (11)$$

Avec :

SI₁ : sous-indice pour les coliformes fécaux

SI₂ : sous-indice pour le phosphore

SI₃ : sous-indice pour les MES

SI₄ : sous-indice pour la chlorophylle "a" active

SI₅ : sous-indice pour l'azote ammoniacal

SI₆ : sous-indice pour les nitrites-nitrates

La valeur de l'IQBP₆ varie de 0 à 100 permettant de définir 5 classes de la qualité de l'eau (Hébert 2005) :

- **Bonne** (80 < IQBP₆ < 100) : « eau de bonne qualité permettant généralement tous les usages, y compris la baignade. » (Hébert 2005)
- **Satisfaisante** (60 < IQBP₆ < 79) : « eau de qualité satisfaisante permettant généralement la plupart des usages. » (Hébert 2005)
- **Douteuse** (40 < IQBP₆ < 59) : « eau de qualité douteuse, certains usages risquent d'être compromis. » (Hébert 2005)
- **Mauvaise** (20 < IQBP₆ < 39) : « eau de très mauvaise qualité, tous les usages risquent d'être compromis. » (Hébert 2005)

Le calcul de l'IQBP doit respecter certaines conditions importantes selon la Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2022) :

- **La plage temporelle** : l'évaluation de la qualité de l'eau par l'IQBP doit se faire par des échantillons prélevés entre les mois de mai et octobre inclusivement sur une période restreinte de trois années consécutives afin de diminuer la variabilité interannuelle associée aux conditions climatiques, en particulier les précipitations. Par conséquent, l'utilisation de courte plage temporelle (1 année) n'est pas recommandée. D'autre part, l'utilisation de longue plage temporelle (10 ans) n'est pas recommandée aussi puisqu'elle peut masquer l'évolution de la qualité de l'eau.
- **Le nombre et la répartition des échantillons** : La prise des échantillons sur 3 années consécutives, avec une fréquence d'un échantillon par mois entre mai et octobre, permet d'avoir au total 18 échantillons répartis sur des périodes sèches et humides. Ce nombre d'échantillons est considéré suffisant pour le calcul de l'IQBP.
- **La constance dans les paramètres** : le calcul de l'IQBP exige l'utilisation de même nombre de paramètres pour tous les échantillons.

Une comparaison des indices l'IQE du CCME et IQBP a été effectuée sur 120 sites répartis sur le fleuve Saint-Laurent et des principaux tributaires (Hébert 2005). L'analyse comparative a montré que l'IQBP a produit une évaluation de la qualité de l'eau similaire à l'IQE pour 52 % des sites et une évaluation plus sévère que l'IQE dans le reste des sites (48 %). Cette différence est expliquée par le fait que l'IQBP est de type déclassant, associée au sous-indice le plus problématique, donc plus sévère dans l'évaluation de la qualité de l'eau que l'IQE qui est basé sur la fréquence des dépassements des paramètres et leurs amplitudes (Hébert 2005).

L'indice IQE du CCME a été adapté dans d'autres études de qualité de l'eau. En effet, Betis et al. (2020) ont évalué la qualité de l'eau drainée des tourbières impactées par la récolte de tourbe. L'eau de drainage est rejetée dans les cours d'eau à proximité du site d'exploitation, ce qui peut avoir un impact sur la qualité de l'eau et altérer la qualité de vie des espèces aquatiques. Dans la cadre de cette étude, l'indice a été adapté en sélectionnant l'ensemble des paramètres physico-chimiques appropriés au milieu d'étude (tourbière). Puis, il a été calculé pour évaluer la qualité des eaux des tourbières, et comparé par rapport l'indice de qualité des rivières.

Une autre application inspirée de cet indice a été récemment réalisée à l'INRS par Julie Vajou et André St-Hilaire. Elle consiste à adapter l'IQE du CCME dans l'évaluation de l'habitat thermique de la rivière Ouelle afin de protéger le saumon Atlantique dans la rivière. En effet, le saumon Atlantique possède un intervalle de tolérance thermique pour les différents stades de son cycle de vie. Le dépassement de certains seuils thermiques (Tableau 4) constitue une source de stress majeur sur sa croissance, taille, taux de survie, abondance et distribution géographique. Par exemple, l'éclosion des œufs de saumon en rivière est directement liée à la température de l'eau et nécessite typiquement des températures inférieures à 16 °C. Afin de calculer l'IQE adapté, les étapes suivantes ont été suivies : i) La masse d'eau (rivière Ouelle) est définie par plusieurs sites, ii) Les périodes d'étude du calcul de l'indice sont précisées (2020 et 2021), iii) Les mesures des températures moyennes journalières sont déterminées pour chaque site et chaque période d'étude, iv) Les paramètres de la qualité d'habitat thermique sélectionnés sont huit seuils des températures qui sont potentiellement stressantes pour le saumon Atlantique et associés aux différents stades de son cycle de vie (Tableau 4), v) Les valeurs critiques des températures correspondantes à chaque stade de cycle de vie du saumon Atlantique ont été fixées (Tableau 4) et vi) L'indice est déterminé pour chaque site et période fixée en calculant les trois facteurs de l'indice (l'étendue, la fréquence et l'amplitude).

Tableau 4. Limites des températures pour les saumons atlantiques

Limites thermiques	Température (°C)
Stress thermique pour les saumons adultes	23
Limite supérieure de la température létale initiale pour les saumons adultes	27,8
Stress thermique pour les saumons juvéniles	25
Limite supérieure de la température létale initiale pour les saumons juvéniles	25,5
Stress thermique pour les tacons	25
Limite supérieure de la température létale initiale (°C) pour les tacons	26,5
Limite supérieure de la température létale initiale (°C) pour les alevins	27,6
Limite supérieure de la température létale initiale pour les œufs	16

Pour chaque site et période sélectionnés, l'IQE du CCME adapté est basé sur la combinaison de trois facteurs décrivant la qualité de l'habitat thermique : i) l'étendue, qui représente le nombre de métriques qui n'ont pas respecté les valeurs des seuils thermiques fixés ; ii) la fréquence, qui est le nombre de fois où ces métriques ont dépassé les valeurs critiques fixées, et iii) l'amplitude est l'écart des métriques non conformes par rapport aux valeurs critiques fixées. À partir de ces facteurs, l'indice produit une valeur simple située entre 0 (qualité d'habitat thermique la plus mauvaise) et 100 (la meilleure qualité d'habitat thermique). Par suite, les valeurs de l'indice pour chaque site peuvent être comparées entre les périodes différentes pour évaluer l'évolution de la qualité d'habitat thermique pour le saumon atlantique et son degré d'altération.

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de l'IQE adapté dans les différents sites de la rivière d'Ouelle durant 2020 :

Tableau 5. Résultats du calcul d'indice IQE pour les sites de la rivière Ouelle en 2020 et 2021 (les stations dont le nom se termine par la lettre P sont dans le cours d'eau principal, alors que celles qui se terminent par un T sont dans un affluent).

Nom de station	Longitude	Latitude	IQE-2020 (%)	IQE-2021 (%)
Pont du Chemin du Sud	-69,97080	47,43328	63,77	80,67
Drain agricole P	-69,94895	47,41984	85,52	-
Drain agricole T	-69,94856	47,41998	92,78	-
Pont Bégin	-69,95279	47,40638	63,80	80,68
2 lacs P	-69,95940	47,38894	63,82	93,58
2 lacs T	-69,95911	47,38910	92,78	-
Escalier bois	-69,94384	47,36376	41,71	42,16
Confluence Ouelle La Grande P	-69,92764	47,35026	56,60	80,68
Pont Drapeau P	-69,93688	47,33261	63,81	80,68
Tributaire à castor	-69,94722	47,31517	63,79	80,68
Pont du Collège	-69,95206	47,29151	56,59	80,68
Confluence Ouelle La Grande LG	-69,92683	47,35071	56,59	-
Chalet route Drapeau LG P	-69,91515	47,32615	63,81	80,71

Chalet route Drapeau LG T	-69,92105	47,32349	92,76	-
Pont route de Chapais LG P	-69,90040	47,29720	63,81	86,54
La Chaude LG T	-69,89344	47,30021	85,46	86,61
Ste-Anne LG P	-69,88920	47,25821	85,46	86,82
Ste-Anne LG T	-69,88869	47,25843	85,45	80,25

La variation des indices IQE calculés le long de différents sites de la rivière Ouelle durant 2020 et 2021, est montrée dans les figures ci-dessous.

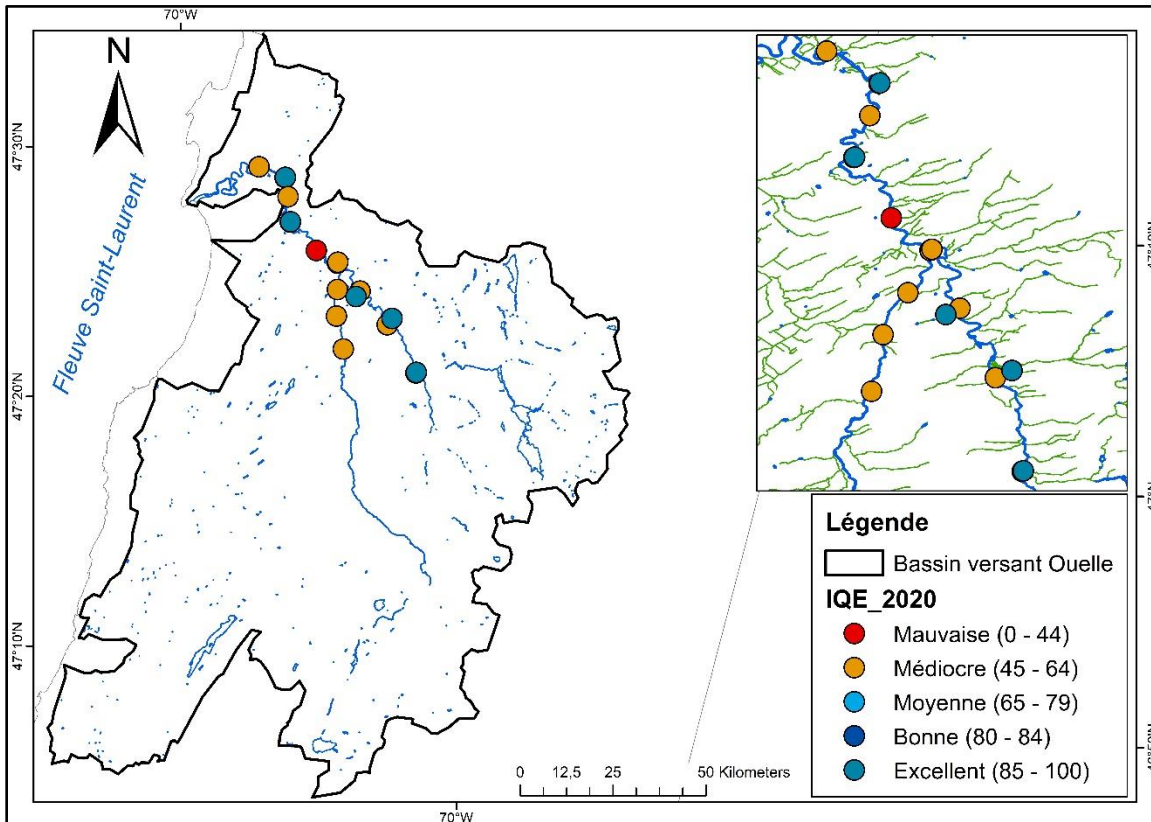


Figure 1. Variation de l'IQE calculé en 2020 à travers les sites de la rivière Ouelle

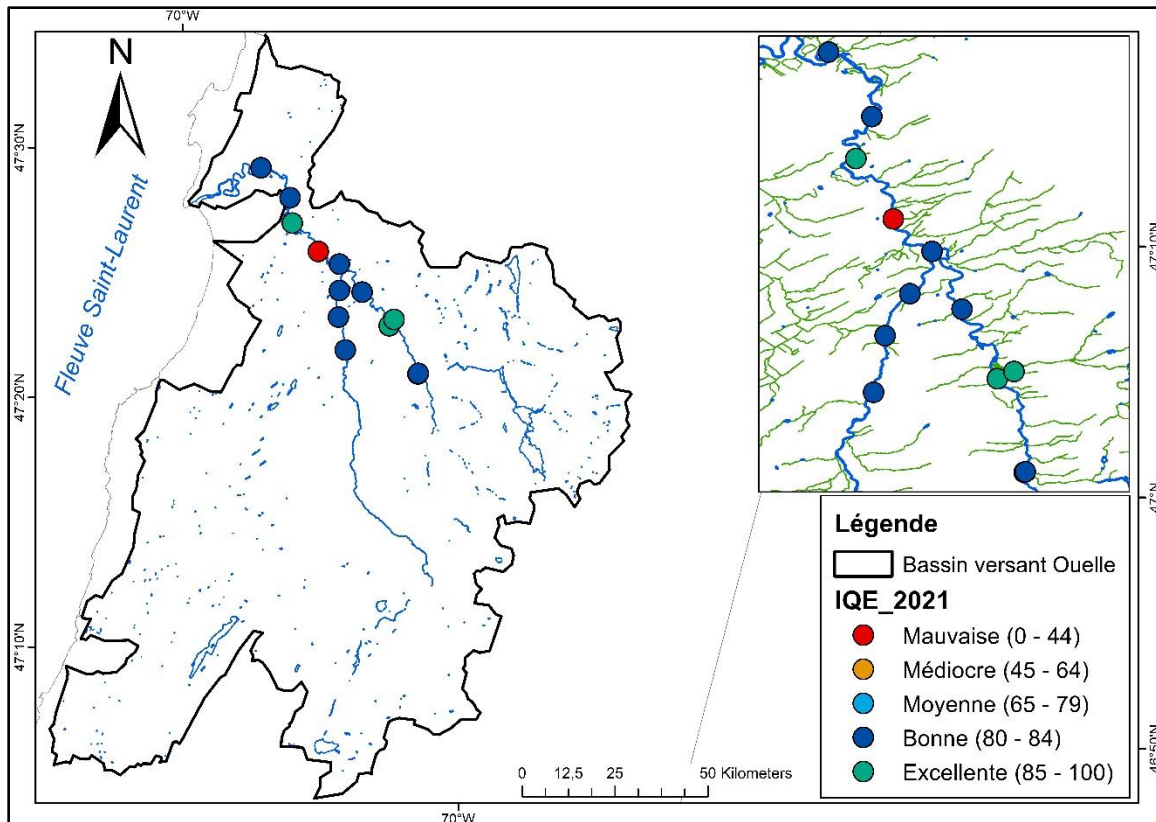


Figure 2. Variation de l’IQE calculé en 2021 à travers les sites de la rivière Ouelle

On remarque que la qualité excellente de l’habitat thermique aux saumons est souvent associée aux stations localisées sur les tributaires de la rivière qui sont généralement plus froids que le cours d’eau principal. En fait, plus les affluents s’élargissent et deviennent exposés aux conditions météorologiques, plus leurs variations thermiques augmentent. La station, la plus éloignée de l’exutoire en extrême amont de la rivière, présente une qualité d’habitat thermique variant de bonne à excellente. Cette bonne qualité peut être expliquée par le fait que leurs températures sont fortement influencées par les eaux souterraines froides et la présence de la canopée au-dessus du cours d’eau produisant plus d’ombrage en amont qu’en aval de la rivière. En comparant l’IQE calculé pour les périodes 2020 et 2021, on constate que la qualité de l’eau est bonne dans la majorité des stations de la rivière Ouelle en 2021. Par contre, plusieurs stations montrent une qualité d’habitat thermique médiocre en 2020. Cela peut être expliqué par le fait que l’IQE varie d’une année chaude (2020) à une année froide (2021).

Finalement, l’indice composite de l’IQE du CCME peut présenter un outil puissant et simple pour l’évaluation de la qualité de l’eau qui peut être appliqué dans différents contextes et objectifs d’études. Cet indice composite peut être appliqué comme indicateur thermique des rivières grâce à sa simplicité dans la synthèse de l’information des plusieurs indices thermiques ainsi que son explication et présentation aux gestionnaires et grand public. Son implémentation peut être faite en sélectionnant les paramètres les plus pertinents décrivant les régimes thermiques des rivières et écologiquement importants pour les espèces aquatiques.

Références

- Abidi, Olfa, André St-Hilaire, Taha B. M. J. Ouarda, Christian Charron, Claudine Boyer, and Anik Daigle. 2022. "Regional thermal analysis approach: A management tool for predicting water temperature metrics relevant for thermal fish habitat." *Ecological Informatics* 70:101692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101692>.
- Arismendi, Ivan, Sherri L Johnson, Jason B Dunham, et ROY Haggerty. 2013. "Descriptors of natural thermal regimes in streams and their responsiveness to change in the Pacific Northwest of North America." *Freshwater biology* 58 (5):880-94.
- Arismendi, Ivan, Mohammad Safeeq, Sherri L Johnson, Jason B Dunham, et Roy Haggerty. 2013. "Increasing synchrony of high temperature and low flow in western North American streams: double trouble for coldwater biota?". *Hydrobiologia* 712 (1):61-70.
- Beaufort, Aurelien, Jacob S Diamond, Eric Sauquet, et Florentina Moatar. 2022. "Spatial extrapolation of stream thermal peaks using heterogeneous time series at a national scale." *Hydrology and Earth System Sciences* 26 (13):3477-95.
- Beitinger, Thomas L., Wayne A. Bennett, et Robert W. McCauley. 2000. "Temperature Tolerances of North American Freshwater Fishes Exposed to Dynamic Changes in Temperature." *Environmental Biology of Fishes* 58 (3):237-75. doi: 10.1023/A:1007676325825.
- Benyahya, Loubna, Daniel Caissie, André St-Hilaire, Taha BMJ Ouarda, et Bernard Bobée. 2007. "A review of statistical water temperature models." *Canadian Water Resources Journal* 32 (3):179-92.
- Betis, Hermine, André St-Hilaire, Claude Fortin, et Sophie Duchesne. 2020. "Development of a water quality index for watercourses downstream of harvested peatlands." *Water Quality Research Journal* 55 (2):119-31. doi: 10.2166/wqrj.2020.007.
- Bjornn, Theodore C, et Dudley W Reiser. 1991. "Habitat requirements of salmonids in streams." *American Fisheries Society Special Publication* 19 (837):138.
- Bosmans, Joyce, Niko Wanders, Marc F. P. Bierkens, Mark A. J. Huijbregts, Aafke M. Schipper, et Valerio Barbarossa. 2022. "FutureStreams, a global dataset of future streamflow and water temperature." *Scientific Data* 9 (1):307. doi: 10.1038/s41597-022-01410-6.
- Boyer, Claudine, André St-Hilaire, et Normand E Bergeron. 2021. "Defining river thermal sensitivity as a function of climate." *River Research and Applications*.
- Caissie, Daniel, Nassir El-Jabi, et Mysore G. Satish. 2001. "Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures." *Journal of Hydrology* 251 (1):14-28. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00427-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00427-9).
- Caissie, Daniel. 2006. "The thermal regime of rivers: a review." *Freshwater biology* 51 (8):1389-406.
- Chang, Heejun, et Mike Psaris. 2013. "Local landscape predictors of maximum stream temperature and thermal sensitivity in the Columbia River Basin, USA." *Science of The Total Environment* 461-462:587-600. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.033>.
- Chu, Cindy, Nicholas E Jones, Andrew R Piggott, et James M Buttle. 2009. "Evaluation of a simple method to classify the thermal characteristics of streams using a nomogram of daily maximum air and water temperatures." *North American Journal of Fisheries Management* 29 (6):1605-19.

- Chu, Cindy, Nicholas E Jones, et Laurie Allin. 2010. "Linking the thermal regimes of streams in the Great Lakes Basin, Ontario, to landscape and climate variables." *River Research and Applications* 26 (3):221-41.
- Coker, GA, Cameron Bruce Portt, et Charles Kenneth Minns. 2001. *Morphological and ecological characteristics of Canadian freshwater fishes*: Fisheries and Oceans Canada Burlington, Ontario.
- Conseil canadien des ministres de l'environnement. 2016. "Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux en vue de la protection de la vie aquatique : Indice de qualité des eaux du CCME, Manuel de l'utilisateur – Mise à jour de 2016." In *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, Conseil canadien des ministres de l'Environnement, Winnipeg, 1999*.
- Culler, Lauren E, Zachary T Wood, Jimena Diaz, Samuel B Fey, Dianne Timmins, et Matthew P Ayres. 2018. "Streams in an uninhabited watershed have predictably different thermal sensitivities to variable summer air temperatures." *Freshwater biology* 63 (7):676-86.
- Daigle, Anik, Claudine Boyer, et André St-Hilaire. 2019. "A standardized characterization of river thermal regimes in Québec (Canada)." *Journal of Hydrology* 577:123963. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123963>.
- Daigle, Anik, Claudine Boyer, et André St-Hilaire. 2021. "Caractérisation du régime thermique des rivières du Québec pour l'évaluation de la sensibilité des cours d'eau aux débits d'étiage: Rapport final."
- Ebersole, JL, WJ Liss, et CA Frissell. 2001. "Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States." *Ecology of freshwater fish* 10 (1):1-10.
- El-Jabi, Nassir, Daniel Caissie, et Noyan Turkkan. 2014. "Water quality index assessment under climate change."
- Elliott, JM, et MA Hurley. 1997. "A functional model for maximum growth of Atlantic salmon parr, *Salmo salar*, from two populations in northwest England." *Functional Ecology* 11 (5):592-603.
- Ferchichi, Habiba, et André St-Hilaire. 2021. "Analyse comparative du suivi des températures de l'eau aux stations hydrométriques ou à proximité avec d'autres stations dans le même bassin versant. Un premier cas d'étude au Québec. Rapport Final."
- Garner, Grace, David M Hannah, Jonathan P Sadler, et Harriet G Orr. 2014. "River temperature regimes of England and Wales: spatial patterns, inter-annual variability and climatic sensitivity." *Hydrological Processes* 28 (22):5583-98.
- Harvey, Bret C, Jason L White, et Rodney J Nakamoto. 2002. "Habitat relationships and larval drift of native and nonindigenous fishes in neighboring tributaries of a coastal California river." *Transactions of the American Fisheries Society* 131 (1):159-70.
- Hébert, Serge. 1997. *Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières du Québec*: Ministère de l'environnement et de la faune.
- Hébert, Serge. 2005. *Comparaison entre l'indice de la qualité générale de l'eau du Québec (IQBP) et l'indice de qualité des eaux du CCME (IQE) pour la protection de la vie aquatique [auteur [...]]. Québec*.
- Isaak, D. J., C. H. Luce, G. L. Chandler, D. L. Horan, et S. P. Wollrab. 2018. "Principal components of thermal regimes in mountain river networks." *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22 (12):6225-40. doi: 10.5194/hess-22-6225-2018.
- Isaak, Daniel J, Seth J Wenger, Erin E Peterson, Jay M Ver Hoef, David E Nagel, Charles H Luce, Steven W Hostetler, Jason B Dunham, Brett B Roper, et Sherry P Wollrab. 2017. "The

- NorWeST summer stream temperature model and scenarios for the western US: A crowd-sourced database and new geospatial tools foster a user community and predict broad climate warming of rivers and streams." *Water Resources Research* 53 (11):9181-205.
- Isaak, Daniel J, Charles H Luce, Dona L Horan, Gwynne L Chandler, Sherry P Wollrab, et David E Nagel. 2018. "Global warming of salmon and trout rivers in the Northwestern US: road to ruin or path through purgatory?". *Transactions of the American Fisheries Society* 147 (3):566-87.
- Isaak, Daniel J, Charles H Luce, Dona L Horan, Gwynne L Chandler, Sherry P Wollrab, William B Dubois, et David E Nagel. 2020. "Thermal regimes of perennial rivers and streams in the Western United States." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 56 (5):842-67.
- Jones, NE, et BJ Schmidt. 2018. "Thermal regime metrics and quantifying their uncertainty for North American streams." *River Research and Applications* 34 (4):382-93.
- 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 (10):2381-447. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02380.x>.
- Kelleher, C, T Wagener, M Gooseff, B McGlynn, K McGuire, et L Marshall. 2012. "Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams." *Hydrological Processes* 26 (5):771-85.
- Luce, Charles, Brian Staab, Marc Kramer, Seth Wenger, Dan Isaak, et Callie McConnell. 2014. "Sensitivity of summer stream temperatures to climate variability in the Pacific Northwest." *Water Resources Research* 50 (4):3428-43.
- Maheu, Audrey, NL Poff, et André St-Hilaire. 2016. "A classification of stream water temperature regimes in the conterminous USA." *River Research and Applications* 32 (5):896-906.
- Maheu, Audrey, André St-Hilaire, Daniel Caissie, Nassir El-Jabi, Guillaume Bourque, et Daniel Boisclair. 2016. "A regional analysis of the impact of dams on water temperature in medium-size rivers in eastern Canada." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 73 (12):1885-97.
- Mantua, Nathan, Ingrid Tohver, et Alan Hamlet. 2010. "Climate change impacts on streamflow extremes and summertime stream temperature and their possible consequences for freshwater salmon habitat in Washington State." *Climatic Change* 102 (1):187-223.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 2022. "Guide d'interprétation de l'indice de la qualité bactériologique et physicochimique de l'eau (IQBP5 et IQBP6)." In, 21 p. [En ligne], www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/suivi_mil-aqua/guide-interpretation-indice-qualite-bacteriologique-physicochimique-eau.pdf.
- Olden, Julian D, et Robert J Naiman. 2010. "Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity." *Freshwater biology* 55 (1):86-107.
- Ouellet, Valerie, André St-Hilaire, Stephen J. Dugdale, David M. Hannah, Stefan Krause, et Sebastien Proulx-Ouellet. 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>.

- Poff, N LeRoy, J David Allan, Mark B Bain, James R Karr, Karen L Prestegard, Brian D Richter, Richard E Sparks, et Julie C Stromberg. 1997. "The natural flow regime." *BioScience* 47 (11):769-84.
- Rivers-Moore, Nicholas A, Helen F Dallas, et Craig Morris. 2013. "Towards setting environmental water temperature guidelines: A South African example." *Journal of environmental management* 128:380-92.
- Steel, E Ashley, Colin Sowder, et Erin E Peterson. 2016. "SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION OF WATER TEMPERATURE REGIMES ON THE SNOQUALMIE RIVER NETWORK." *Journal of the American Water Resources Association* 52 (3).
- Steel, E Ashley, Timothy J Beechie, Christian E Torgersen, et Aimee H Fullerton. 2017. "Envisioning, quantifying, and managing thermal regimes on river networks." *BioScience* 67 (6):506-22.
- van Vliet, Michelle TH, Wietse HP Franssen, John R Yearsley, Fulco Ludwig, Ingjerd Haddelot, Dennis P Lettenmaier, and Pavel Kabat. 2013. "Global river discharge and water temperature under climate change." *Global Environmental Change* 23 (2):450-64.
- Van Vliet, MTH, F Ludwig, JG Zwolsman, GP Weedon, et P Kabat. 2011. "Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow." *Water Resources Research* 47 (2).
- Wehrly, Kevin E., Michael J. Wiley, et Paul W. Seelbach. 2003. "Classifying Regional Variation in Thermal Regime Based on Stream Fish Community Patterns." *Transactions of the American Fisheries Society* 132 (1):18-38. doi: 10.1577/1548-8659(2003)132<0018:CRVITR>2.0.CO;2.
- Willis, Ann D, Ryan A Peek, et Andrew L Rypel. 2021. "Classifying California's stream thermal regimes for cold-water conservation." *PloS one* 16 (8):e0256286.
- Zhang, X, G Flato, M Kirchmeier-Young, L Vincent, H Wan, X Wang, R Rong, J Fyfe, G Li, et VV Kharin. 2019. "Les changements de température et de précipitations pour le Canada." *chapitre 4 dans Rapport sur le climat changeant du Canada. Ottawa: Gouvernement du Canada*:113-93.