

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

INFLUENCE DES PETITS BARRAGES SUR LA TEMPÉRATURE DES
COURS D'EAU DANS UNE AIRE PROTÉGÉE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE SUR MESURE EN ÉCOHYDROLOGIE DES RIVIÈRES
RÉGULÉES

PAR

MATHIEU AUFFRAY

DECEMBRE 2021

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES..	vi
RÉSUMÉ	vii
CHAPITRE I.....	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1. Le rôle de la température de l'eau dans les écosystèmes aquatiques	1
1.2. Le régime thermique des cours d'eau	3
1.3. Les facteurs influençant le régime thermique des cours d'eau	3
1.4. La variabilité spatiale et temporelle du régime thermique.....	4
1.5. L'impact des barrages sur la température des cours d'eau	5
1.6. L'effet des lacs sur la température des cours d'eau	7
1.7. Objectifs.....	9
CHAPITRE II	10
INFLUENCE DES PETITS BARRAGES SUR LA TEMPÉRATURE DES COURS D'EAU DANS UNE AIRE PROTÉGÉE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL	10
2.1. Résumé.....	11
2.2. Introduction.....	12
2.3. Méthodologie	16
2.3.1. Aire d'étude	16
2.3.2. Suivi de la température de l'eau.....	17
2.3.3. Caractérisation du régime thermique des cours d'eau	20
2.3.4. Analyses statistiques	21
2.4. Résultats.....	24
2.4.1. Les températures des cours d'eau sont plus élevées en aval des barrages qu'en amont du réservoir	25

2.4.2.	L'effet de réchauffement des réservoirs est comparable à l'effet des lacs naturels.	27
2.4.3.	La température moyenne de l'eau au mois d'août varie principalement selon l'aire de drainage et la proximité à un plan d'eau.	29
2.5.	Discussion	32
2.6.	Conclusion	35
CONCLUSION GÉNÉRALE		37
BIBLIOGRAPHIE		39
ANNEXE		51
	Annexe 1 : Localisation des sites de suivi	51

LISTE DES FIGURES

- Figure 1: Carte de localisation des sites de mesure de la température des cours d'eau et des principaux bassins versants recoupant l'aire d'étude dans le Parc de la Gatineau. 17
- Figure 2: Plan d'échantillonnage des sites de suivi de la température de l'eau. 20
- Figure 3: Diagrammes en boîte comparant les conditions en amont et en aval des réservoirs au mois d'août 2019 et 2020 pour a) la magnitude, b) la fréquence d'événements chauds, c) la durée d'événements chauds et d) le taux de variation du régime thermique des cours d'eau. Les limites des boîtes représentent le premier et troisième quartile des valeurs et la ligne centrale la médiane des données. Les points extérieurs sont $>1,5$ fois et <3 fois l'intervalle interquartile au-delà de chaque extrémité de la boîte. L'étoile représente la moyenne des données. 27
- Figure 4: Diagrammes en boîte comparant la différence de a) magnitude, b) fréquence d'événements chauds, c) durée d'événements chauds et d) taux de variation entre l'aval et l'amont de lacs naturels et de réservoirs régulés par de petits barrages au mois d'août 2020. Les limites des boîtes représentent les premiers et derniers percentiles, la barre centrale la valeur médiane. Les points extérieurs sont $>1,5$ fois et <3 fois l'intervalle interquartile au-delà de chaque extrémité de la boîte. L'étoile représente la moyenne des données. L'étoile représente la moyenne. ... 29
- Figure 5: Effet partiel de a) la distance à un plan d'eau en amont, b) l'aire de drainage et c) la surface du bassin versant occupée par des plans d'eau sur la température moyenne de l'eau au mois d'août 2020 selon le modèle additif généralisé. Les points représentent les résidus partiels après avoir pénalisé les autres variables et les lignes pointillées représentent l'intervalle de confiance à 95 %. . 31
- Figure 6: Températures moyennes de l'eau au mois d'août 2020 prédites pour chaque tronçon dans l'ensemble du réseau hydrographique des bassins versants du parc de la Gatineau à l'aide du modèle additif généralisé. 32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des plans d'eau étudiés.....	19
Tableau 2: Métriques décrivant les attributs du régime thermique pour le mois d'août.....	21
Tableau 3: Variables explicatives considérées pour la modélisation de la température moyenne de l'eau au mois d'août 2020.	24
Tableau 4: Modèle linéaire mixte évaluant l'effet de la position (AM - amont, AV - aval du réservoir) sur les métriques décrivant régime thermique de cours d'eau au mois d'août.....	26
Tableau 5: Modèle additif généralisé de la température moyenne de l'eau (°C) au mois d'août 2020.	30

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET
ACRONYMES

ANOVA : Analysis of Variance

CEHQ : Centre d'expertise hydrique du Québec

GAM: Generalized Additive Model

GLMM: Generalized Linear Mixed Models

ICOLD : International Commission on Large Dams

MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements
Climatiques

RÉSUMÉ

Le Québec compte une importante quantité de barrages dont 95% sont de petite taille (< 15m). L'effet de ces barrages sur la température des cours d'eau est encore mal connu alors même que la température de l'eau est une variable importante dans le maintien de l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Cette étude vise à comprendre l'effet de ces petits barrages dans l'aire protégée du parc de la Gatineau dans le sud du Québec.

Le premier objectif de ce projet fut de quantifier l'effet de petits réservoirs régulés par des barrages sur le régime thermique estival des cours d'eau dans un milieu forestier peu perturbé. Le deuxième objectif a cherché à comparer l'effet des réservoirs à celui de lacs naturels ayant des caractéristiques similaires aux réservoirs étudiés. Le troisième objectif était de déterminer les principales variables influençant la température des cours d'eau de nos sites d'étude. Le quatrième objectif était de modéliser la température moyenne de l'eau à travers le réseau hydrographique du parc de la Gatineau.

Pour cela, un suivi de la température de l'eau a été effectué dans 36 cours d'eau à travers le parc de la Gatineau. Pour évaluer l'effet de cinq petits barrages d'intérêt, un suivi de la température de l'eau a été effectué durant les étés 2019 et 2020 dans le principal tributaire en amont du réservoir et dans le cours d'eau en aval du barrage. À partir de l'été 2020, nous avons effectué un suivi de la température en amont et en aval de cinq lacs naturels. Enfin, à l'été 2020, nous avons échantillonné 18 cours d'eau situés à plus d'un km en aval d'un plan d'eau et représentant la gamme d'aires de drainage des cours d'eau de l'aire d'étude. Nous avons caractérisé le régime thermique des cours d'eau à l'aide de quatre attributs soit la magnitude, la fréquence des événements chauds ainsi que leur durée et le taux de variation. L'effet des barrages sur chacune de ces attributs fut analysé à l'aide d'un modèle linéaire mixte généralisé (GLMM) et la comparaison de leur effet à celui des lacs fut effectuée grâce à une analyse de variance (ANOVA). Enfin, la détermination des principales variables d'influence de la température de l'eau dans l'aire d'étude fut effectuée à l'aide d'un modèle additif généralisé (GAM).

Les résultats ont montré un réchauffement moyen de 4,1 °C des cours d'eau en aval des barrages par rapport aux cours d'eau en amont du réservoir, ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de la durée des événements chauds où la température journalière maximale de l'eau dépasse 25 °C au mois d'août 2019 et 2020. Durant le mois d'août 2020, nous avons observé que le réchauffement moyen par les réservoirs (3,7 °C) n'était pas significativement différent de celui que nous avons observé entre l'amont et l'aval de petits lacs naturels (3,4 °C). Le GAM nous a permis d'identifier trois variables d'influence de la température des cours d'eau dans l'aire d'étude, soit la proximité à un plan d'eau en amont, la superficie de l'aire de drainage et la proportion de l'aire de drainage occupée par des plans d'eau. Ce

projet fournit des connaissances sur les effets des petits barrages sur la température de l'eau et sur les principales variables d'influence de la température de l'eau dans des écosystèmes peu perturbés. Dans un contexte de changement climatique, ces plans d'eau pourraient venir exacerber le réchauffement des cours d'eau et fragiliser les écosystèmes aquatiques sensibles aux températures chaudes. Ces connaissances pourront être valorisées par les gestionnaires d'espaces protégés afin d'informer la gestion des écosystèmes aquatiques et prioriser les actions de restauration, notamment celles visant des organismes avec une faible tolérance pour des températures élevées.

Mots clés : petits barrages, petits lacs, milieu forestier, température de l'eau, régime thermique des cours d'eau, rivières

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Le rôle de la température de l'eau dans les écosystèmes aquatiques

La température de l'eau est une des variables d'importance pour les écosystèmes aquatiques, exerçant une influence sur les processus physico-chimiques et biologiques tels que la qualité de l'eau (taux d'oxygène dissous ou de polluants) (Caissie, 2006) ainsi que la répartition des espèces aquatiques (Caissie, 2006; Angilletta *et al.*, 2008). Les organismes aquatiques ont en effet des limites physiologiques vis-à-vis de la température des cours d'eau et possèdent des intervalles spécifiques de tolérance thermique (McCullough, 1999; Jonsson *et Jonsson*, 2009; Poesch *et al.*, 2016). Elliott *et Elliott* (2010) définissent les limites de température d'espèces de poissons par rapport à trois processus, soit les conditions thermiques permettant : 1) la survie, 2) la croissance et 3) l'alimentation (seuil de température lié à la dépense d'énergie pour se nourrir, en cas de limite de température de l'eau atteinte, le poisson ne se nourrira plus). La survie correspondra au non-dépassement des limites létales de température d'une espèce et détermine ainsi son aire de répartition. La température de l'eau intervient donc sur la distribution spatiale sur la taille des aires de répartition des populations aquatiques (Comte *et al.*, 2013; Isaak *et al.*, 2014; Myers *et al.*, 2017). Hari *et al.*, (2006), Milner *et al.*, (2008) et Morales-Marín *et al.*, (2019) ont ainsi mis en évidence des phénomènes de contraction et d'expansion de l'aire de répartition de certaines espèces de poissons associés à des modifications de la température de l'eau.

La température des cours d'eau agit également sur le cycle de vie des organismes (McCullough, 1999; Poesch *et al.*, 2016). La température des cours d'eau influence particulièrement les organismes ectothermes tels que les poissons (Ficke *et al.*, 2007; Neuheimer and Taggart, 2007; Poesch *et al.*, 2016) ou d'autres organismes tels que les algues (Mischke, 2003) ou les bactéries (Recknagel *et al.*, 2019) et notamment leur croissance et leur développement. Les études de Elliott *et* Hurley (1997) et Elliott *et* Elliott (2010) montrent que la croissance optimale des poissons est corrélée à des optimums de température de l'eau. Une étude de Lund *et al.* (2003) a montré que l'augmentation des températures de l'eau pouvait induire des réactions de choc thermique sur l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) qui est l'une des espèces les plus sensibles aux températures élevées au Québec avec une limite létale fixée à 25 °C (Hasnain *et al.*, 2010) et dont le fort intérêt économique en fait une espèce d'intérêt. Xu *et al.* (2010), Prokešová *et al.* (2020) ont démontré par des études en laboratoire et dans des cours d'eau que l'augmentation des températures provoquait respectivement une hausse de la mortalité de 1,4 % à 30,5 % pour une augmentation de 9 °C durant la période estivale pour *Salvelinus fontinalis*. Enfin, Elliott *et* Elliott (2010) ont défini des seuils d'alimentation de deux espèces de saumons (*salmo salar*, *salmo trutta*) et d'une espèce d'omble (*Salvelinus alpinus*) liés à la température des cours d'eau où la dépense d'énergie pour s'alimenter serait trop importante par rapport au gain d'énergie apporté par l'alimentation. Au-delà ou en deçà de certaines limites de tolérance, l'apport nutritif peut ne pas être suffisant pour permettre la croissance et l'adaptation des poissons par rapport à la dépense énergétique. La température de l'eau est donc essentielle au maintien de l'intégrité des écosystèmes aquatiques et ceux-ci sont particulièrement sensibles aux fluctuations temporelles ainsi qu'aux perturbations naturelles et anthropiques de celle-ci.

1.2. Le régime thermique des cours d'eau

Le régime thermique des cours d'eau décrit le schéma de variation spatiale et temporelle de la température de l'eau et est fonction de différents flux d'énergie entrants et sortants. Les flux de chaleur entrants et sortants agissent à l'interface eau-atmosphère et à l'interface eau-lit du cours d'eau. Les flux d'énergie à l'interface eau-atmosphère sont : i) le rayonnement net de courtes longueurs d'onde ; ii) le rayonnement net de longues longueurs d'onde ; iii) le flux de chaleur latente associé à l'évaporation ou la condensation, et iv) le flux de chaleur sensible associé aux différences de température entre la rivière et l'atmosphère (Caissie, 2006). Les flux d'énergie à l'interface eau-lit du cours d'eau sont: i) le flux de chaleur par conduction entre le lit et la rivière, ii) le flux de chaleur par advection relié à la circulation entre les eaux de surface et les eaux souterraines et iii) le flux lié aux échanges entre les eaux de surface et celles de la zone hyporhéique c'est-à-dire l'entrée d'une partie de l'eau de la rivière dans les sédiments sous-jacents ou adjacents qui reviennent dans la rivière plus loin en aval (Wawrzyniak, 2012; Caissie *et al.*, 2014; Cranswick *et al.*, 2014). Les échanges de chaleur se produiraient selon Evans *et al.* (1998) essentiellement à l'interface eau-atmosphère (82%) et une faible partie à l'interface eau-lit (15%). Cependant, les échanges eau-atmosphère seraient moins importants pour les petits cours d'eau où l'ombrage de la végétation riparienne est plus important (Caissie, 2006) et protégerait donc le chenal du rayonnement solaire.

1.3. Les facteurs influençant le régime thermique des cours d'eau

De nombreux facteurs influencent le régime thermique des cours d'eau et sont, selon Caissie (2006) classés en quatre groupes différents : i) les conditions atmosphériques telles que le rayonnement solaire ou la température de l'air; ii) le cadre environnemental de la rivière comme la géologie, végétation riparienne ou la sinuosité de la rivière; iii) les échanges entre le lit de la rivière et la zone

hyporhéique et les eaux souterraines ; iv) les conditions liées à l'hydraulique telles que la friction, le débit ou la turbulence de l'eau. Les flux de chaleur des rivières sont en grande partie régis par les conditions atmosphériques, mais sont modifiés par l'hydrogéologie, la géomorphologie et les caractéristiques physiographiques du paysage. Enfin, les conditions liées à l'hydraulique des rivières (débit, apport d'affluent, temps de résidence) influent surtout sur la capacité de réchauffement ou de refroidissement du volume d'eau en mélangeant l'eau provenant des différentes sources (Caissie, 2006).

1.4. La variabilité spatiale et temporelle du régime thermique

Le régime thermique des cours d'eau représente le patron des fluctuations spatiales et temporelles de la température de l'eau qui sont les résultats de l'influence des facteurs énumérés ci-dessus. Au niveau spatial, le régime thermique varie de la tête du bassin versant à son exutoire. La température des cours d'eau est souvent proche de celle des eaux souterraines dans les têtes de bassin (amont) du fait de la prépondérance de celles-ci (Poole and Berman, 2001; Kelleher *et al.*, 2012; Beaufort *et al.*, 2016). L'éloignement de la source du cours d'eau favorise l'équilibrage de la température de l'eau avec les conditions atmosphériques (Mohseni *et al.*, 1999). À des échelles plus fines, nous pouvons observer des variations latérales de température dans le chenal du cours d'eau, observées dans les zones de confluence (Ebersole *et al.*, 2003) ou des zones d'infiltration ou résurgence (Beaufort, 2015), et longitudinales en aval des plans d'eau ou de rejet d'eau.

Les variations de la température de l'eau suivent des variations interannuelles, annuelles, saisonnières et diurnes (Poole *et Berman*, 2001). Au niveau annuel, la température de l'eau suit un schéma sinusoïdal du printemps à l'automne dans les climats tempérés de l'hémisphère nord et pour les régions les plus froides, et atteint le point de congélation en hiver (Caissie, 2006). Dans les climats tempérés de l'hémisphère nord, l'été est la période la plus chaude avec des écarts de température

diurnes relativement importants par rapport à d'autres saisons. La variabilité temporelle de la température de l'eau est décrite, selon une approche similaire qui a été développée pour décrire le régime hydrologique des cours d'eau grâce à des métriques décrivant la magnitude de la température de l'eau ainsi que la fréquence, la durée et l'occurrence d'événements extrêmes dépassant une température donnée et le taux de variation de la température de l'eau (Poff *et al.*, 1997). Ces métriques permettent de caractériser le régime thermique de différents cours d'eau (Olden and Naiman, 2010) mais aussi de comprendre l'influence de certains facteurs de perturbation de la température de l'eau en comparant les attributs du régime thermique de cours d'eau perturbés et de référence (Maheu *et al.*, 2016; Seyedhashemi *et al.*, 2021; Zaidel *et al.*, 2021).

1.5. L'impact des barrages sur la température des cours d'eau

Diverses activités humaines modifient la température des cours d'eau en altérant la quantité d'énergie transmise à la rivière ou la quantité d'eau présente. Plus le volume d'eau sera important, plus la quantité d'énergie devra être importante pour réchauffer le cours d'eau. Parmi les différents types d'activités anthropiques ayant un impact sur la température des rivières on peut citer i) la perte d'ombrage occasionnée par l'élimination de la végétation riparienne (Moore *et al.*, 2005), ii) les rejets d'effluents industriels et domestiques chauffés (Prats *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2014; Raptis *et al.*, 2016) iii) les prélèvements (Sinokrot *et al.*, 1995; Sinokrot and Gulliver, 2000; Olden and Naiman, 2010) et iv), l'urbanisation (Somers *et al.*, 2013).

Parmi ces différentes activités, les barrages ont des effets importants sur les conditions thermiques des rivières (Preece and Jones, 2002; Lessard and Hayes, 2003; Olden and Naiman, 2010; Kędra and Wiejaczka, 2018). Tout d'abord, un barrage représente, selon la Loi sur la sécurité des barrages, « tout ouvrage destiné à dériver ou retenir les eaux d'un cours d'eau, ou celles d'un lac ou réservoir ». Au Québec, un recensement a compté plus de 6500 barrages sur le territoire (Centre

d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2014). L'influence des barrages sur les régimes thermiques des cours d'eau dépend de la position du barrage dans le paysage, le cadre environnemental et morphologique, mais surtout des caractéristiques physiques du réservoir telles que la capacité de stockage, la stratification du réservoir, sa superficie et le mode de fonctionnement du mécanisme de libération de l'eau (hypolimnique ou épilimnique) (Olden and Naiman, 2010; Kędra and Wiejaczka, 2018).

Selon Olden *et* Naiman (2010), durant l'été, les barrages de grande taille affectent la température de l'eau en libérant de l'eau froide lorsque la prise d'eau est située au niveau de la couche hypolimnique du réservoir. Les barrages de grande taille sont considérés dans ce mémoire comme des ouvrages dont la hauteur est supérieure à 15 m selon la définition de la Commission internationale des grands barrages (International Commission on Large Dams, 2011). Ces réservoirs présentent une stratification thermique semblable à celle des lacs profonds. Ils refroidiront le cours d'eau en aval durant l'été. Selon Zhong *et* Power (1996), la construction du barrage de Xinanjiang en Chine a occasionné une baisse de la température moyenne en aval de 5.5 °C. Les réservoirs régulés par des barrages agissent comme un tampon qui réduit l'amplitude annuelle et les fluctuations quotidiennes de la température de l'eau en aval, car la masse d'eau présente dans le réservoir se réchauffe et se refroidit plus lentement que la rivière (Olden and Naiman, 2010). Cela retarde le réchauffement de la température des cours d'eau au printemps et un retard dans le refroidissement des eaux en automne. Ce type de barrage peut également amener à un réchauffement de l'eau en hiver (Olden and Naiman, 2010). Ainsi Angilletta *et al.* (2008), ont montré un réchauffement de température de l'eau en aval du barrage de Lost Creek aux États-Unis durant l'automne et l'hiver. Ce type de barrage a également des effets longitudinaux importants (tels que la diminution du couvert de glace en aval) et leurs effets sur la température de l'eau se répercutent sur de longues distances en aval (Jensen, 2003).

De nombreuses études ont été réalisées sur l'impact des grands barrages sur la température de l'eau (Astrade, 1998; Preece and Jones, 2002; Magilligan and

Nislow, 2005; Angilletta *et al.*, 2008). En comparaison, celles réalisées sur les impacts thermiques des petits barrages sont peu nombreuses alors que les petits barrages représentent 99 % des barrages dans le monde (Lehner *et al.*, 2011). Ces barrages ont potentiellement des impacts cumulatifs importants (Chandesris *et al.*, 2019). En effet, les petits barrages entraînent un ralentissement des écoulements de surface du fait de l'augmentation du temps de résidence dans le réservoir, entraînant ainsi une augmentation de l'apport thermique des radiations solaires et donc de la température des cours d'eau en aval (Lessard and Hayes, 2003; Singer and Gangloff, 2011; Maheu *et al.*, 2016). Certaines études ont montré que les petits barrages provoquent des hausses de température de l'eau (Maxted *et al.*, 2005; Singer and Gangloff, 2011; Zaidel *et al.*, 2021). D'autres, au contraire, ont montré un refroidissement de la température de l'eau en aval de ce type de barrages (Lessard *et Hayes*, 2003). Mbaka *et Wanjiru Mwaniki*, (2015) avec une recension des études sur l'effet des petits barrages sur la température de l'eau, ont montré que 72 % des études n'ont relevé aucun impact significatif sur la température de l'eau mais illustre bien la variabilité des effets des petits barrages sur la température de l'eau. Les barrages au Québec constituent une source potentielle d'impact non négligeable d'autant que près de 95 % des barrages au Québec sont de petite taille (< 15 m). Ainsi, le manque de connaissances sur les impacts des barrages de petite taille est un enjeu important sur le territoire.

1.6. L'effet des lacs sur la température des cours d'eau

Il existe une très importante quantité de petits lacs (< 1 km²) dans le monde que Lehner *et al.*, (2011) a estimé à environ 16 millions pour une superficie totale de 68 400 km². Au Québec, le nombre de petits lacs est également très important. Uniquement dans le bassin versant de la rivière des Outaouais (5187 km²), nous avons recensé plus de 133 000 petits lacs, soit 25 petits lacs par km² selon les données du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2014).

Tout comme les petits réservoirs (c.-à-d., plans d'eau régulés par un petit barrage), l'influence des petits lacs sur le régime thermique des cours d'eau dépend de la position du lac dans le paysage, le cadre environnemental et morphologique (Chu *et al.*, 2010; Isaak *et al.*, 2014) mais également de la stratification du lac et des caractéristiques morphométriques du plan d'eau. L'effet des lacs sur la température de l'eau est encore peu connu mais on constate selon la littérature que les petits lacs provoquent un réchauffement des cours d'eau en aval aussi bien par rapport à des cours d'eau ne possédant pas de lacs dans le réseau hydrographique en amont (Mellina *et al.*, 2002; Pedersen and Sand-Jensen, 2007) que par rapport à l'amont des lacs (Chu *et al.*, 2010; Seyedhashemi *et al.*, 2021). En effet, Maxted *et al.*, (2005) ont montré un réchauffement moyen de 3,9 °C de la température moyenne durant l'été par des petits lacs par rapport à des cours d'eau sans lac. Il en est de même pour Seyedhashemi *et al.*, (2021) qui ont montré une augmentation moyenne de la température moyenne de 0,3 °C durant la période estivale mais pouvant dépasser 2,5 °C pour certains sites entre l'amont et l'aval des petits lacs.

Malgré le nombre important de petits lacs dans le monde, peu d'études se sont intéressées à leur impact sur l'ensemble du régime thermique. Les études, qu'elles soient réalisées au niveau du paysage (Chu *et al.*, 2010; Isaak *et al.*, 2014) ou au niveau d'un site spécifique (Mellina *et al.*, 2002; Pedersen and Sand-Jensen, 2007; Leach *et al.*, 2021) se sont essentiellement concentrées sur la magnitude du régime thermique et plus précisément sur les températures moyennes, minimales et maximales. Pourtant, l'étude de Seyedhashemi *et al.*, (2021), à l'instar de celle de Maheu *et al.*, (2016) pour les petits réservoirs, a montré que les petits lacs augmentaient, non seulement la magnitude, mais impacteraient aussi les autres attributs du régime thermique.

1.7. Objectifs

L'objectif général de cette étude est de comprendre l'effet des petits barrages sur le régime thermique des cours d'eau durant la période estivale dans le parc de la Gatineau. Afin de répondre à cet objectif général, les objectifs spécifiques sont de:

- 1) Décrire l'effet des petits barrages sur les attributs du régime thermique durant la période estivale.
- 2) Comparer l'impact thermique des réservoirs à celui des lacs naturels de taille similaire.
- 3) Étudier l'influence des principales caractéristiques des réservoirs et des lacs naturels sur la température estivale des cours d'eau.
- 4) Modéliser la température moyenne de l'eau travers le réseau hydrographique du parc de la Gatineau

CHAPITRE II

INFLUENCE DES PETITS BARRAGES SUR LA TEMPÉRATURE DES
COURS D'EAU DANS UNE AIRE PROTÉGÉE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL

Auteurs

Mathieu Auffray*¹, Jean-François Senécal¹, Katrine Turgeon¹, André St-Hilaire²,
Audrey Maheu¹

¹ Institut des sciences de la forêt tempérée (ISFORT), Université du Québec en
Outaouais (UQO), 58 rue Principale, Ripon, QC, Canada, J0V 1V0

² Institut National de la Recherche Scientifique, 490, rue de la Couronne, Québec,
QC, Canada, G1K 9A9

* Adresse de correspondance : aufm01@uqo.ca

Autres courriels (par ordre d'apparition) :

jeanfrancois.senecal@gmail.com

katrine.turgeon@uqo.ca

Andre.St-Hilaire@ete.inrs.ca

audrey.maheu@uqo.ca

2.1. Résumé

Les petits barrages représentent 99% des ouvrages de retenue d'eau dans le monde, mais leur effet sur la température des cours d'eau est encore assez peu connu. La température des cours d'eau étant une variable importante dans le maintien de l'intégrité des écosystèmes aquatiques, l'étude de l'effet des petits barrages s'avère nécessaire. Cette étude vise à comprendre l'effet des petits barrages sur la température des cours d'eau pendant l'été dans une aire protégée peu perturbée du sud du Québec (Canada). Nous avons comparé quatre attributs du régime thermique (magnitude, fréquence et durée d'événements chauds et taux de variation) dans les cours d'eau i) en amont et en aval d'un réservoir régulé par un petit barrage et ii) en aval de réservoirs et de lacs naturels. À l'aide d'un modèle additif généralisé, nous avons également identifié les principaux déterminants de la température des cours d'eau au mois d'août. Par rapport aux conditions en amont du réservoir, nous avons observé un réchauffement de 3,7 °C dans les cours d'eau en aval des réservoirs régulés par de petits barrages durant le mois d'août 2020. Ce réchauffement n'était pas significativement différent de celui observé entre l'amont et l'aval de lacs naturels (3,4 °C). La proximité à un plan d'eau en amont, l'aire de drainage et la proportion du bassin versant occupée par des plans d'eau étaient les principaux déterminants de la température de l'eau au mois d'août, démontrant ainsi toute l'importance des plans d'eau avoisinants sur le régime thermique des cours d'eau. Dans un contexte de changement climatique, les petits plans d'eau pourraient venir exacerber le réchauffement et exercer une forte pression sur les écosystèmes aquatiques où l'on retrouve des organismes sensibles aux températures élevées. Cette étude apporte des connaissances importantes sur l'effet des petits barrages et des petits lacs afin de prioriser des actions de restauration et de conservation de ces écosystèmes.

2.2. Introduction

La température de l'eau est une variable environnementale importante pour les écosystèmes aquatiques, exerçant une influence sur de nombreux processus physico-chimiques et biologiques (Caissie, 2006; Angilletta *et al.*, 2008). Par exemple, la température influence le taux d'oxygène dissous dans l'eau et la concentration en azote agissant ainsi sur la qualité de l'eau et pouvant ainsi nuire aux organismes aquatiques (Zhao *et al.*, 2022). Au niveau biologique, des changements dans la température des cours d'eau affectent le cycle de vie des organismes aquatiques (Lund *et al.*, 2002; Elliott *et Elliott*, 2010) notamment lorsque la température de l'eau dépasse les limites de tolérance thermique des espèces aquatiques (McCullough, 1999; Jonsson and Jonsson, 2009; Poesch *et al.*, 2016). Les changements de température de l'eau affectent aussi la distribution spatiale des espèces aquatiques (Ruiz-Navarro *et al.*, 2016; Morales-Marín *et al.*, 2019) menant à une contraction ou une expansion des habitats thermiques selon les espèces (Hari *et al.*, 2006; Milner *et al.*, 2008; Morales-Marín *et al.*, 2019). La température des cours d'eau est donc essentielle au maintien de l'intégrité des écosystèmes aquatiques et des modifications du régime thermique peuvent mettre celle-ci en péril.

Le régime thermique décrit les variations temporelles et spatiales de température de l'eau. Celles-ci suivent des variations interannuelles, annuelles, saisonnières et diurnes (Poole and Berman, 2001; Beaufort, 2015). Le cycle de vie des organismes aquatiques étant arrimé à certaines températures de l'eau, cette variabilité temporelle joue un rôle important pour les écosystèmes aquatiques. Cette variabilité temporelle vient également influencer la répartition des espèces aquatiques. Par exemple, les fluctuations journalières de température de l'eau peuvent occasionner le dépassement des limites létales de certaines espèces aquatiques et ainsi influencer la disponibilité en habitat. Cela est particulièrement vrai pour des espèces comme l'omble de fontaine (*salvelinus fontinalis*) qui ont une faible tolérance pour des températures chaudes (Hasnain *et al.*, 2010). Une compréhension adéquate du

régime thermique estival des cours d'eau est d'autant plus importante que les températures maximales et donc les dépassements des limites létales surviennent généralement durant cette période. Similaire à l'approche de Poff *et al.* (1997) pour décrire le régime hydrologique des cours d'eau, la caractérisation du régime thermique passe généralement par la description de cinq attributs, soit la magnitude des températures, la fréquence et la durée des événements chauds, l'occurrence des températures minimales ou maximales et le taux de variation des températures à différentes échelles temporelles.

Différentes activités anthropiques peuvent venir perturber le régime thermique des cours d'eau à travers le rejet d'eau aux températures inférieures ou supérieures au milieu, une augmentation du rayonnement solaire atteignant le cours d'eau ou par une modification du débit (Caissie, 2006). En modifiant les conditions d'écoulement, les barrages constituent également une perturbation importante du régime thermique des cours d'eau (Olden and Naiman, 2010). L'impact des barrages sur le régime thermique des cours d'eau dépend de la position du barrage dans le paysage, des caractéristiques environnementales (e.g. précipitations, température de l'air, occupation du sol) mais surtout des caractéristiques du plan d'eau (réservoir) qui lui est associé telles que la stratification du réservoir, sa profondeur de libération des eaux et le temps de résidence de l'eau dans le réservoir (Olden and Naiman, 2010; Kędra and Wiejaczka, 2018; Seyedhashemi *et al.*, 2021). De nombreux travaux ont décrit l'impact des barrages de grande taille sur le régime thermique des cours d'eau (Magilligan and Nislow, 2005; Angilletta *et al.*, 2008; Olden and Naiman, 2010) mais peu d'études se sont intéressées à l'impact des petits barrages. Les petits barrages sont définis comme des structures d'une hauteur inférieure à 15 m ou dont le volume de retenue ne dépasse pas les 3 millions de m³ d'eau (ICOLD, 2011). Il n'existe pas de compte exact du nombre de petits barrages dans le monde, mais une étude par Lehner *et al.* (2011) grâce à une cartographie à haute résolution, estime le nombre de petits réservoirs à plus de 16 millions pour une superficie totale de 507 102 km² et un volume d'eau retenue de 8069 km³. Dans le bassin versant de la rivière des Outaouais qui occupe 146 300 km² du Québec méridional, on dénombre 7742 petits barrages (< 15 m), soit plus de 5 barrages par

100 km² (CEHQ, 2014). Au Québec, la plupart des petits barrages servent de réservoir d'eau pour diverses activités anthropiques (agriculture, industrie, récréatif et villégiature, protection des incendies et la production d'hydroélectricité), (CEHQ, 2014). Certains d'entre eux ont également une fonction de régularisation des débits pour le contrôle des inondations (CEHQ, 2014).

Le nombre d'études analysant l'impact des petits barrages sur la température de l'eau reste limité et ne permet pas de faire ressortir une tendance commune. Dans une méta-analyse, Mbaka *et* Wanjiru Mwaniki (2015) ont recensé 94 publications sur les effets des petits barrages sur la température de l'eau. Parmi celles-ci, 72 % des études examinées n'ont observé aucun impact significatif des petits barrages sur la température des cours d'eau alors que 25 % des études ont observé un réchauffement. Zaidel *et al.* (2021) ont mesuré un réchauffement moyen de 1,6 °C (intervalle : 0,2–5,7 °C) entre l'amont et l'aval de réservoirs régulés par de petits barrages que ce soit en milieu forestier, agricole et urbain à travers tout le Massachusetts (États-Unis). D'autres études à travers des milieux différents ont pu observer des réchauffements similaires (Maxted *et al.*, 2005; Singer and Gangloff, 2011; Maheu *et al.*, 2016). À l'inverse, certaines publications ont noté un refroidissement de 1 à 2 °C d'eau entre l'amont et l'aval de réservoirs régulés par de petits barrages en milieu forestier (Mendoza-Lera *et al.*, 2012) ou en milieu urbanisé et agricole (Kil and Bae, 2012). La plupart des études sur les petits barrages ont seulement étudié leurs impacts sur la magnitude du régime thermique et l'impact sur les autres attributs du régime thermique demeure peu documenté. Pourtant, les petits barrages modifieraient non seulement la température moyenne du cours d'eau en aval, mais aussi l'écart journalier ainsi que la fréquence et la durée des événements chauds (Sinokrot *et al.*, 1995; Maheu *et al.*, 2016; Chandesris *et al.*, 2019).

On compte une multitude de petits plans d'eau (<1 km²) dans le monde, soit environ 16 millions pour une superficie totale de 68 400 km² (Lehner *et al.*, 2011). Au Québec, les petits lacs sont une constituante importante des bassins versants. Par

exemple, on compte plus de 133 000 petits lacs dans le bassin versant de la rivière des Outaouais, soit presque 1 petit lac par km² (RNCAN, 2016). Toutefois, le rôle de ces petits plans d'eau vis-à-vis de la qualité de l'eau et des écosystèmes aquatiques demeure peu étudié, une majorité d'études s'étant intéressées aux plans d'eau de grande taille (Preece and Jones, 2002; Angilletta *et al.*, 2008; Olden and Naiman, 2010; Risley *et al.*, 2010). Comme les petits réservoirs, les lacs peuvent occasionner un réchauffement des cours d'eau à leur exutoire par rapport à leur principal tributaire à l'amont (Seyedhashemi *et al.*, 2021) et par rapport à des cours d'eau sans lac en amont (Maxted *et al.*, 2005). L'augmentation de température occasionnée par les lacs dépend en grande partie de la taille du bassin versant, de la superficie du lac de la stratification du plan d'eau et du temps de résidence (Chandesris *et al.*, 2019; Zaidel *et al.*, 2021). Différentes études montrent que les lacs entraînent généralement une augmentation de la magnitude du régime thermique en été, mais Seyedhashemi *et al.* (2021) ont également montré que, comme pour les réservoirs, les petits lacs augmentent également la fréquence et la durée des événements chauds et diminuent l'écart de température journalier. On peut donc supposer que les petits barrages à libération de surface et les petits lacs ont un effet similaire sur la température de l'eau, mais aucune étude comparative n'a jusqu'à maintenant été effectuée à cet effet.

L'objectif de cette étude est de comprendre l'effet des petits barrages sur la température des cours d'eau durant la période estivale dans le sud du Québec, Canada. Les objectifs spécifiques sont de i) décrire l'effet des petits barrages sur les métriques du régime thermique durant la période estivale, ii) comparer l'impact thermique des réservoirs à celui des lacs naturels de taille similaire, iii) étudier l'influence des caractéristiques des réservoirs et des lacs naturels sur la température estivale des cours d'eau et, iv) modéliser la température moyenne de l'eau à travers le réseau hydrographique du parc de la Gatineau.

Nous faisons ainsi les hypothèses que i) les petits réservoirs provoquent un réchauffement de la température des cours d'eau en aval par rapport au principal tributaire en amont du réservoir et ii) que ce réchauffement est de magnitude

similaire à ce que nous pouvons observer entre l'amont et l'aval de lacs naturels. Nous émettons également l'hypothèse que les caractéristiques des plans d'eau tel que leur temps de résidence sont des déterminants importants de la température des cours d'eau dans un bassin versant forestier peu perturbé.

2.3. Méthodologie

2.3.1. Aire d'étude

Cette étude a été effectuée dans le parc de la Gatineau situé dans le sud de la province du Québec, Canada (Figure 1). Cette aire protégée de 361 km² se situe dans l'écorégion Sud des Laurentides et est principalement recouverte par la forêt feuillue. L'aire d'étude se situe dans le Bouclier canadien, où l'on retrouve des roches intrusives et métamorphiques précambriennes recouvertes de dépôts fluvio-glaciaires (St-Onge, 2009). Le climat continental froid et humide est caractérisé par des précipitations annuelles de 985 mm et une température moyenne annuelle de 5,9 °C selon les normales climatiques 1981-2010 (station 7031360, MELCC, 2020). La période estivale (juillet à septembre) est caractérisée par des précipitations totales de 275 mm et une température moyenne de 18,3 °C selon les normales climatiques 1981-2010. Du point de vue hydrologique, l'aire d'étude est constituée de cinq bassins versants tributaires de la rivière Gatineau, elle-même tributaire de la rivière des Outaouais. Le bassin versant le plus au sud du parc se draine directement dans la rivière des Outaouais (Figure 1).

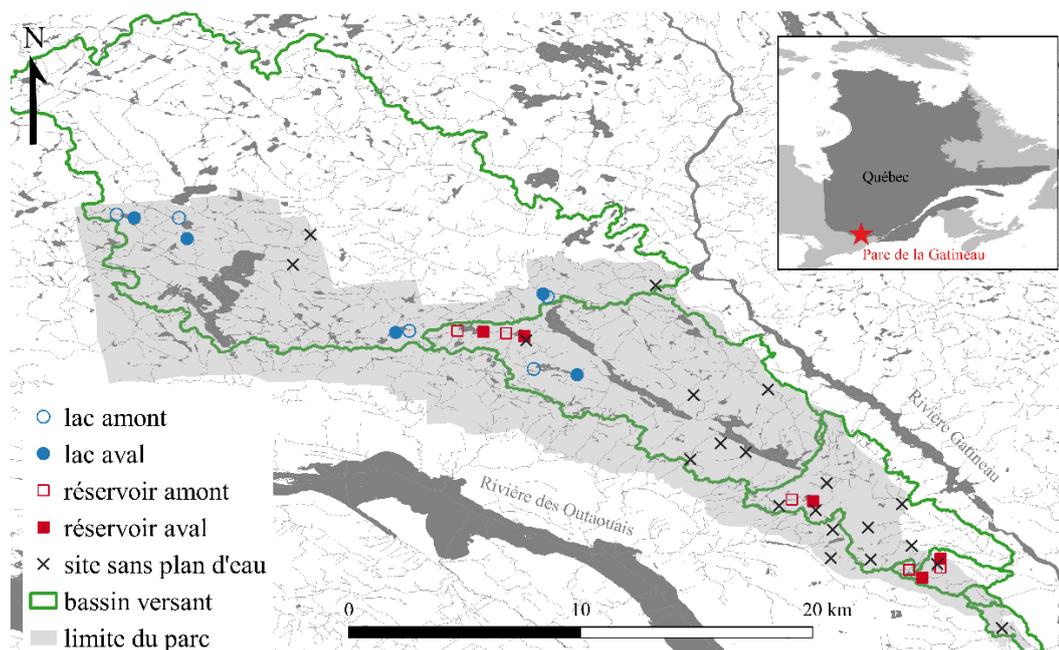


Figure 1: Carte de localisation des sites de mesure de la température des cours d'eau et des principaux bassins versants recoupant l'aire d'étude dans le Parc de la Gatineau. L'annexe 1 fournit les coordonnées exactes des sites de suivi.

2.3.2. Suivi de la température de l'eau.

Nous avons mis en place un réseau de 36 sites de suivi de la température des cours d'eau durant les étés 2019 et 2020 (Figure 1). Nous avons utilisé trois types de senseurs pour mesurer la température de l'eau toutes les 15 minutes : le modèle Onset Pro-v2 (précision $\pm 0,2$ °C), le modèle Onset MX-2203 (précision $\pm 0,2$ °C) et le modèle Onset UA-002 (précision $\pm 0,5$ °C). Chaque senseur a été inséré dans un tube en PVC blanc afin de le protéger des débris et du rayonnement solaire direct. Le tube a ensuite été attaché à une tige de métal enfoncée dans le lit du cours d'eau. Le tube a été placé au niveau du lit du cours, dans une zone avec peu de courant et où le tube avait peu de risque d'exondation au cours de l'été. En aval des barrages et des lacs, le senseur a été installé le plus proche possible de l'exutoire. Les données de température ont été vérifiées visuellement pour retirer les données erronées dues à des erreurs de lecture du senseur ou causées par des périodes d'exondation du senseur.

En lien avec l'objectif 1 (décrire l'effet des petits barrages sur les métriques du régime thermique durant la période estivale), nous avons sélectionné cinq réservoirs régulés par des petits barrages à déversoir de surface d'une hauteur inférieure à 4 m (Tableau 1). Les aires de drainage aux différents barrages étaient comprises entre 109,5 et 992,6 ha. La superficie du réservoir en amont du barrage variait entre 0,8 et 30,4 ha. Le pourcentage de la surface du bassin versant occupée par le plan d'eau d'intérêt (cest-à-dire le plan d'eau étudié tel qu'identifié au Tableau 1) était compris entre 0,3 et 10,5 %. À chaque site, nous avons déployé un capteur de température durant les étés 2019 et 2020 dans le principal tributaire en amont du plan d'eau et un autre dans le cours d'eau en aval du barrage (Figure 2). Les données d'août 2019 du site en aval des réservoirs Renaud et Dennison ne furent pas prises en compte à cause de l'exondation des capteurs de température. De plus, le site en amont de Dennison ayant été déplacé dans un autre cours d'eau correspondant au tributaire principal, les données de 2019 ne furent pas prises en compte. Les sites de suivi ne sont pas tous complètement indépendants les uns des autres et les réservoirs Renaud et Dennison étaient respectivement situés à 1,4 km et 2 km en aval des réservoirs Taylor et Pink.

En lien avec l'objectif 2 (comparer l'impact thermique des réservoirs à celui des lacs naturels de taille similaire), nous avons sélectionné cinq lacs naturels pour lesquels le pourcentage de la surface du bassin versant occupée par le plan d'eau d'intérêt est similaire à celui des réservoirs (Tableau 1). Nous avons installé des capteurs de température dans le principal tributaire en amont du lac et dans le cours d'eau à l'exutoire du lac durant l'été 2020 (Figure 2). Le dysfonctionnement de certains capteurs a réduit l'échantillonnage à quatre lacs, n'ayant ainsi pas d'équivalent pour le réservoir avec le pourcentage de plan d'eau dans le bassin versant minimal (Dennison, Tableau 1).

En lien avec les objectifs 3 (étudier l'influence des caractéristiques des réservoirs et des lacs naturels sur la température estivale des cours d'eau) et 4 (modéliser la température moyenne de l'eau à travers le réseau hydrographique du parc de la Gatineau), nous avons échantillonné 18 cours d'eau avec des aires de drainage

variant entre 179,2 et 992,6 ha durant l'été 2020. La sélection des sites a été faite afin de représenter la gamme d'aires de drainage des cours d'eau de l'aire d'étude. Puisque nous avons échantillonné les conditions à proximité des plans d'eau aux objectifs 1 et 2, nous avons situé les 18 sites à plus de 1 km en aval d'un plan d'eau. Cela nous permet ainsi de contraster le régime thermique avec et sans influence par un plan d'eau (objectif 3) et de bien modéliser les conditions thermiques retrouvées dans l'ensemble du réseau hydrographique (objectif 4).

Tableau 1: Caractéristiques des plans d'eau étudiés.

Nom du plan d'eau	Type	Aire de drainage (ha)	Aire du plan d'eau (ha)	Proportion du bassin versant occupée par le plan d'eau d'intérêt (%)	Hauteur du barrage (m)
Pink	Réservoir	109,5	11,5	10,5	1,5
Taylor	Réservoir	403,3	30,4	7,5	0,8
Fortune	Réservoir	354,2	10,5	3,0	1,5
Renaud	Réservoir	992,6	12,9	1,3	0,8
Dennison	Réservoir	248,5	0,8	0,3	3,4
Kelly	Lac	271,4	27,4	10,1	-
Lusk	Lac	474,7	33,4	7,0	-
Kidder	Lac	179,2	5,8	3,2	-
Meunier	Lac	248,5	1,9	0,8	-

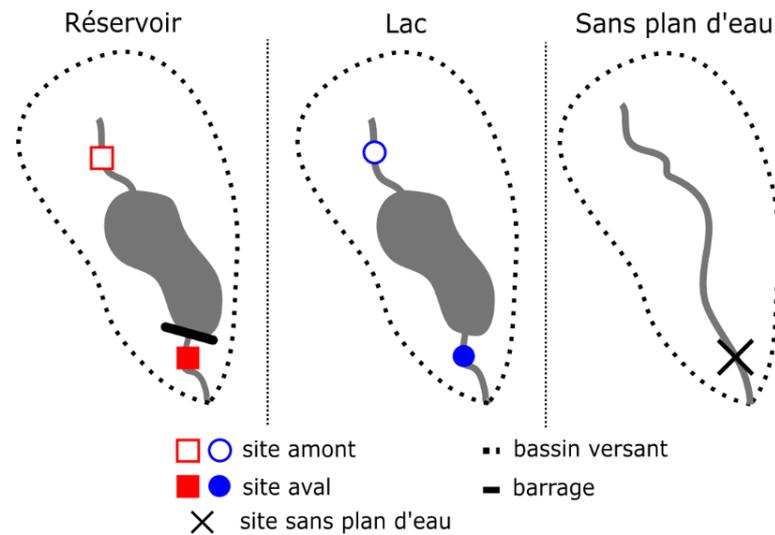


Figure 2: Plan d'échantillonnage des sites de suivi de la température de l'eau.

2.3.3. Caractérisation du régime thermique des cours d'eau

À partir des données de température récoltées aux 15 minutes, nous avons calculé les températures moyennes quotidiennes que nous avons ensuite utilisées pour calculer les températures moyennes mensuelles. Les journées et les mois n'ayant, respectivement, pas au moins 22 heures et 22 jours de données valides ont été supprimées des analyses. Nous avons concentré les analyses sur le mois d'août, car il s'agit du mois avec le plus de données valides pour l'ensemble des sites de suivi ainsi que la période avec le plus de sites disponibles pour la paire amont-aval d'un même réservoir disponible.

Nous avons calculé quatre métriques pour décrire les attributs du régime thermique des cours d'eau au mois d'août (Tableau 2). Une caractérisation de l'attribut d'occurrence n'a pas été faite dans cette étude car celle-ci présente peu d'intérêt pour une étude s'intéressant à une courte période (mois d'août). Afin de décrire la magnitude, nous avons calculé la température moyenne pour le mois d'août ($Mmo8$). Afin de décrire la fréquence des événements chauds, nous avons calculé le nombre de jours où la température quotidienne maximale de l'eau dépasse 25 °C ($Fmax25$). Le seuil de 25 °C correspond à la température maximale critique de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*, Hasnain *et al.*, 2010), soit l'espèce de

poisson avec la plus faible tolérance thermique présente dans l'aire d'étude. Afin de décrire la durée des événements chauds, nous avons calculé le nombre maximal de jours consécutifs où la température quotidienne maximale de l'eau dépasse 25 °C (D_{max25}). Afin de décrire le taux de variation, nous avons calculé l'écart journalier moyen de la température de l'eau (R_{rng}), soit la différence entre le maximum et le minimum journalier. La plupart des études décrivent également l'attribut d'occurrence du régime thermique (Olden *et Naiman*, 2010; Maheu *et al.*, 2016). Nous n'avons toutefois pas décrit cet attribut, car il s'agit d'un attribut plus pertinent à étudier à l'échelle d'une saison voire d'une année et non pour un seul mois.

Tableau 2: Métriques retenues dans notre étude décrivant les attributs du régime thermique pour le mois d'août.

Métrique	Acronyme	Description	Unité
Magnitude	M_{mo8}	Température moyenne	°C
Fréquence	F_{max25}	Nombre de jours où la température quotidienne maximale de l'eau dépasse 25°C	Jour
Durée	D_{max25}	Nombre maximal de jours consécutifs où la température quotidienne maximale dépasse 25°C	Jour
Taux de variation	R_{rng}	Écart journalier moyen	°C

2.3.4. Analyses statistiques

Afin de comparer le régime thermique en amont et en aval de réservoirs régulés par de petits barrages (objectif 1), nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes généralisés (GLMM) ajustés avec le package `glmmTMB` (Brooks *et al.*, 2017) dans le logiciel R (version 4.0.2). Nous avons utilisé une distribution gaussienne pour les modèles dont les variables à expliquer étaient M_{mo8} et R_{rng} et une distribution de

Poisson pour les modèles dont les variables à expliquer étaient F_{max25} et D_{max25} qui constituent des données de dénombrement. Le modèle prend la forme suivante :

$$y = X\beta + Z\gamma + \varepsilon \quad (1)$$

où y correspond à une métrique décrivant un attribut du régime thermique, X est la matrice des variables explicatives représentant la position par rapport au réservoir (*i.e.* amont, aval), β est le vecteur des effets fixes, Z est la matrice des variables explicatives pour la partie aléatoire du modèle, γ est le vecteur des effets aléatoires et ε est le vecteur des résidus du modèle. Nous avons défini l'identifiant du réservoir, (Pink, Taylor, Fortune, Renaud, Dennison) et l'année, (2019, 2020) comme des variables explicatives (Z) à effets aléatoires emboîtés afin de considérer la dépendance des données entre les sites amont et aval d'un même réservoir ainsi que les variations météorologiques associées aux deux différentes années de suivi. La normalité des résidus du modèle pour chaque métrique fut évaluée avec un test de Shapiro et l'homogénéité de la variance avec un test de Levene.

Afin de comparer le régime thermique des cours d'eau en aval de petits barrages à celui de lacs naturels (objectif 2), nous avons évalué si la différence entre l'aval et l'amont pour chacune des métriques ($\Delta_{métrique}$) au mois d'août 2020 était significativement différente entre les réservoirs et les lacs naturels à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA). Seule l'année 2020 fut intégrée dans l'analyse de variance, car les mesures associées aux lacs furent effectuées uniquement cette année-ci. Comme précédemment, la normalité des résidus a été validée grâce à un test de Shapiro et l'homogénéité de la variance avec un test de Levene.

Afin d'étudier l'influence des caractéristiques des plans d'eau sur la température des cours d'eau (objectif 3), nous avons, dans un premier temps, sélectionné et extrait sept variables explicatives (Tableau 3) et les avons intégrées comme variables prédictives au GAM. Nous n'avons pas les données nécessaires pour calculer temps de résidence de l'eau dans les plans d'eau. Nous avons donc choisi de considérer le pourcentage de surface occupée par des plans d'eau dans le bassin versant comme un proxy du temps de résidence. En effet, les bassins versants ayant une plus grande proportion de plans d'eau sont généralement associés à un temps

de résidence de l'eau plus long (Zaidel *et al.*, 2021). Nous avons obtenu la température moyenne de l'air au mois d'août à chaque site de suivi en interpolant les données à six stations météorologiques à proximité de l'aire d'étude. Puis, nous avons ajusté un modèle additif généralisé (GAM) avec le package *mgcv* (1.8-33) avec comme variable à expliquer la température moyenne au mois d'août 2020 à l'ensemble des sites de suivi ($n = 36$). Le modèle prend la forme suivante :

$$g(E(y)) = f(X_1, \dots, X_n) + \varepsilon \quad (2)$$

où g est la fonction identité ($g = 1$) et $E(y)$ est l'espérance mathématique correspond à Mmo8 (*i.e.* température moyenne mensuelle au mois d'août), soit la variable à expliquer, f correspond à une fonction de spline de forme non linéaire pour chacune des variables explicatives (Tableau 3). Une double pénalité a été implémentée pour chacune des variables non linéaires selon la méthodologie de Marra and Wood (2011). La double pénalité permet au modèle d'attribuer un effet marginal aux variables non significatives. Étant donné l'échantillon de petite taille ($n=36$), nous avons limité le nombre de degrés de liberté des variables non linéaires à trois par variable. Nous avons ajusté le modèle avec 70 % des données ($n = 25$ sites) et sa performance de prédiction validée avec les 30 % restants ($n = 11$). Les sites utilisés pour l'ajustement du modèle et ceux qui ont servi à valider sa performance étaient situés dans des bassins versants du parc différents (Figure 1). La dispersion et la normalité des résidus du modèle ont été vérifiées avec le package DHARMA (0.3.3.0, (Hartig, 2021)).

Afin de modéliser la température moyenne de l'eau au mois d'août dans l'ensemble du réseau hydrographique (objectif 4), nous avons utilisé le modèle GAM précédemment ajusté. Nous avons extrait les variables explicatives pour chaque tronçon de 100 m du réseau hydrographique. Les tronçons avec une aire de drainage inférieure à 1 ha furent exclus afin d'éviter l'extrapolation, car le jeu de données pour l'ajustement ne comportait aucun site avec de si petites aires de drainage. Le pouvoir prédictif du modèle a été mesuré avec l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le pourcentage de biais (PBIAS) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{sim,i} - T_{obs,i})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{obs,i} - T_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n (T_{obs,i})} \quad (4)$$

où T_{obs} et T_{sim} (°C) représentent respectivement les températures de l'eau observées et prédites pour le site i et n représente le nombre de sites de suivi.

Tableau 3: Variables explicatives considérées pour la modélisation de la température moyenne de l'eau au mois d'août 2020.

Métriques	Source des données	Unité
Aire de drainage	MFFP (2016)	ha
Distance minimale à un lac en amont du site	RNCAN (2016)	m
Élévation	MFFP (2016)	m
Pente du cours d'eau	MFFP (2016)	m m ⁻¹
Pourcentage de la surface du bassin versant occupée par des plans d'eau	RNCAN (2016)	%
Température de l'air	MELCC (2020)	°C

2.4. Résultats

Le mois d'août 2019 fut chaud et sec, avec une température moyenne de l'air de 20,3 °C, presque 1 °C au-dessus de la normale climatique (19,4 °C pour la période 1981-2010), et des précipitations de 33 mm, soit environ le tiers des précipitations généralement reçues pour ce mois (normale 1981-2010 = 97,1 mm). Au mois d'août 2020, les conditions météorologiques furent proches de la normale, avec une température moyenne de l'air de 19,6 °C et des précipitations de 90 mm.

2.4.1. Les températures des cours d'eau sont plus élevées en aval des barrages qu'en amont du réservoir

On observe un régime thermique significativement différent entre les cours d'eau en amont et en aval d'un réservoir (Tableau 4) durant les mois d'août 2019 et 2020. En effet, les GLMMs, calculés sur les deux années, indiquent que la position du site (amont du réservoir et aval du barrage) a un effet significatif sur trois attributs du régime thermique, soit la magnitude (M_{m08}), la fréquence (F_{max25}) et la durée (D_{max25}) d'événements chauds. Au mois d'août, la température moyenne de l'eau variait entre 16,1 et 20,7 °C dans les principaux tributaires en amont des réservoirs d'étude alors qu'elle variait entre 20,1 et 23,5 °C dans les cours d'eau en aval des petits barrages (Figure 3). Pour M_{m08} , nous avons calculé une différence moyenne de 4,1°C ($\pm 0,6$ °C) entre l'amont et l'aval du réservoir (Tableau 4). L'effet de réchauffement des réservoirs varie selon le site, avec une augmentation de 7 °C entre l'aval et l'amont du réservoir Taylor en août 2020 alors que l'augmentation n'était que de 1 °C pour le réservoir Renaud pour la même période. Cette différence est due au fait que le réservoir Renaud se trouve en aval de Taylor donc le site amont de Renaud subit déjà un effet de réchauffement par un plan d'eau

Le réservoir a également un effet sur la fréquence et la durée des événements chauds. Les événements chauds étaient significativement plus fréquents en aval qu'en amont des réservoirs, avec en moyenne trois jours de plus au mois d'août où la température quotidienne maximale dépassait 25 °C (Tableau 4). En effet, la température en amont des réservoirs ne dépasse qu'une fois 25 °C sur un seul d'entre eux alors que ce seuil est dépassé jusqu'à 19 jours au mois d'août 2020 en aval du réservoir Taylor. (Figure 3b). Seul le site en aval du réservoir Renaud ne dépasse pas ce seuil durant l'année 2020. Outre une plus grande fréquence, les événements chauds étaient également de plus longue durée en aval qu'en amont des réservoirs. En effet, la durée maximale des événements où la température de l'eau a dépassé 25 °C (D_{max25}) était significativement supérieure avec des événements chauds 2,8 jours plus longs en aval qu'en amont. Le taux de variation du régime thermique, soit l'écart journalier moyen (R_{rng}), n'était pas significativement

différent entre l'amont et l'aval du réservoir (Tableau 4). L'écart journalier variait entre 1,4 et 5,3 °C en amont et entre 1,9 et 4,2 °C en aval des réservoirs.

Tableau 4: Modèle linéaire mixte évaluant l'effet de la position (AM - amont, AV - aval du réservoir) sur les métriques décrivant régime thermique de cours d'eau au mois d'août.

Métrique	Variable	Estimé (± erreur - type)	Valeur de z	Valeur de p
Mmo8	Ordonnée à l'origine	17,4 (± 0,5)	33,5	< 0,05
	Position AV	4,1 (± 0,6)	7,4	< 0,05
Fmax25	Ordonnée à l'origine	-1,8 (± 0,8)	-2,3	< 0,05
	Position AV	3,2 (0,7)	4,4	< 0,05
Dmax25	Ordonnée à l'origine	-1,7 (0,8)	-2,2	< 0,05
	Position AV	2,8 (0,7)	3,8	< 0,05
Rrng	Ordonnée à l'origine	3,0 (0,4)	7,9	< 0,05
	Position AV	-0,3(0,5)	-0,7	0,46

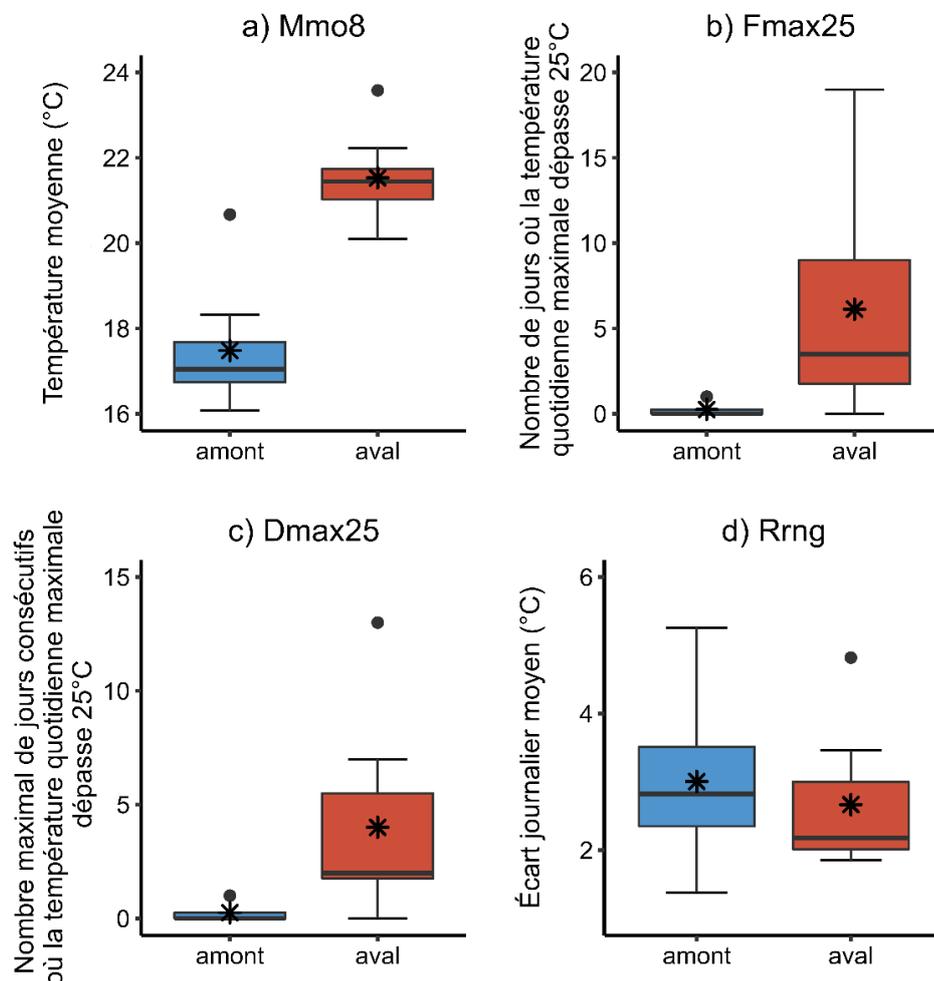


Figure 3: Diagrammes en boîte comparant les conditions en amont et en aval des réservoirs au mois d'août 2019 et 2020 pour a) la magnitude, b) la fréquence d'événements chauds, c) la durée d'événements chauds et d) le taux de variation du régime thermique des cours d'eau. Les limites des boîtes représentent le premier et troisième quartile des valeurs et la ligne centrale la médiane des données. Les points extérieurs sont $>1,5$ fois et <3 fois l'intervalle interquartile au-delà de chaque extrémité de la boîte. L'étoile représente la moyenne des données.

2.4.2. L'effet de réchauffement des réservoirs est comparable à l'effet des lacs naturels.

L'ANOVA n'a montré aucune différence significative dans l'écart de température entre l'amont et l'aval ($\Delta Mmo8$) lorsque les réservoirs étaient comparés aux lacs naturels durant le mois d'août 2020 ($F = 0,01$; $df = 7$; $p\text{-value} = 0,9$). On observe un réchauffement moyen de $3,4$ °C (écart-type = $2,9$ °C) entre l'amont et l'aval des

lacs naturels contre 3,7 °C (écart-type = 2,2 °C) pour les réservoirs durant le mois d'août 2020 (Figure 4a). Le $\Delta Mmo8$ maximal observé est de 6,6 °C pour le réservoir Taylor et de 6,7 °C pour le lac Kelly. Le $\Delta Mmo8$ minimal fut quant à lui observé au réservoir Renaud et au lac Lusk, avec un réchauffement respectif de 0,6 °C et 0,4 °C entre l'amont et l'aval du plan d'eau.

Les résultats de $Fmax25$ montrent une augmentation moyenne de 0,75 jour où la température de l'eau maximale a dépassé 25 °C (écart-type = 6,2 jours) entre l'amont et l'aval des lacs naturels (Figure 4). Pour les réservoirs, l'augmentation moyenne est de 7,4 jours (écart-type = 7,6 jours) entre l'amont et l'aval du plan d'eau. En termes de durée, les événements chauds étaient de 0 à 17 jours plus longs entre l'amont et l'aval des lacs naturels. Pour le lac Lusk, on observe même une réduction de la durée de quatre jours entre l'amont et l'aval, d'où la valeur négative à la Figure 4c. Pour les réservoirs, on observe plutôt des événements en moyenne 4,6 jours plus longs en aval qu'en amont. Malgré ces différences notées entre les lacs et les réservoirs, la fréquence ($F = 1,98$; $df = 7$; $p\text{-value} = 0,2$) et la durée ($F = 2,8$; $df = 7$; $p\text{-value} = 0,14$) des événements chauds n'étaient pas significativement différentes entre ces deux types de plans d'eau.

L'ANOVA n'a montré aucune différence significative ($F = 4,75$; $df = 7$; $p\text{-value} = 0,07$) entre l'écart journalier moyen de la température de l'eau des lacs et des réservoirs. Dans les deux cas, on observe une réduction de l'écart journalier moyen entre l'amont et l'aval du plan d'eau. En moyenne, l'écart journalier diminue de 2,2 °C (écart-type = 1,79 ; Figure 4) entre l'amont et l'aval des lacs naturels et de 0,2 °C pour les réservoirs.

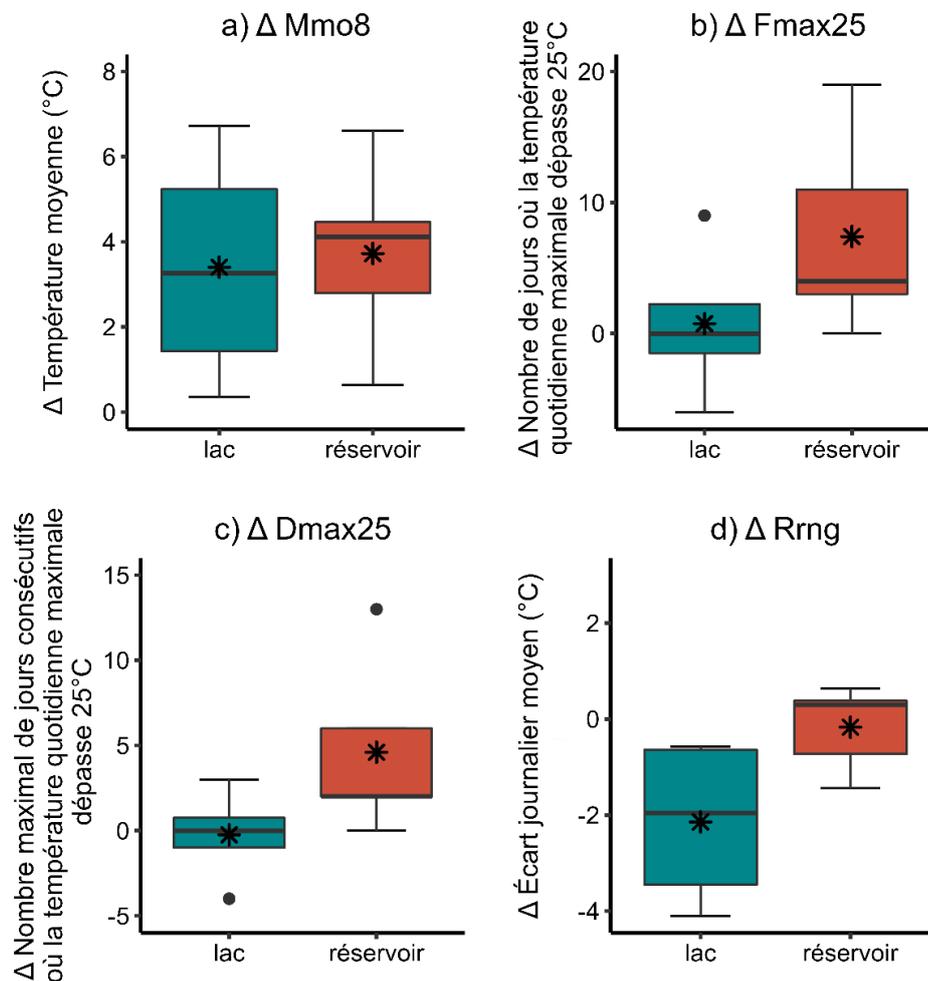


Figure 4: Diagrammes en boîte comparant la différence de a) magnitude, b) fréquence d'événements chauds, c) durée d'événements chauds et d) taux de variation entre l'aval et l'amont de lacs naturels et de réservoirs régulés par de petits barrages au mois d'août 2020. Les limites des boîtes représentent les premiers et derniers percentiles, la barre centrale la valeur médiane. Les points extérieurs sont $>1,5$ fois et <3 fois l'intervalle interquartile au-delà de chaque extrémité de la boîte. L'étoile représente la moyenne des données. L'étoile représente la moyenne.

2.4.3. La température moyenne de l'eau au mois d'août varie principalement selon l'aire de drainage et la proximité à un plan d'eau.

Le modèle GAM a permis d'expliquer 81,4 % de la variance de la température moyenne de l'eau au mois d'août aux sites de suivi. La validation croisée a montré une performance adéquate du modèle à prédire la température moyenne de l'eau au mois d'août 2020. Pour le jeu de validation (30 % des sites de suivi), la racine de

l'erreur quadratique moyenne (RMSE, équation 1) est de 1,2 °C et le pourcentage de biais (PBIAS, équation 2) est de 6%.

Selon le modèle GAM, les principaux déterminants de la température moyenne de l'eau au mois d'août sont la distance à un plan d'eau en amont, l'aire de drainage et le pourcentage de surface du bassin versant occupée par des plans d'eau (Tableau 5). Ces trois variables représentent 81,4 % de la variance totale expliquée par le modèle. Premièrement, en observant l'effet partiel des variables, on peut voir que la distance à un plan d'eau en amont a un effet de réchauffement d'environ 2 °C sur la température de l'eau à proximité de l'exutoire du plan d'eau et cet effet diminue de façon presque linéaire jusqu'à une distance de 900 m du plan d'eau (racine carrée = 30) après laquelle l'effet du plan d'eau ne se fait plus ressentir (Figure 5a). Deuxièmement, on observe une augmentation quasi-linéaire de la température moyenne de l'eau avec le logarithme base 10 de l'aire de drainage (Figure 5b). Ainsi, des températures plus froides sont associées aux cours d'eau de tête de bassin alors que des températures plus chaudes sont associées aux cours d'eau de grande taille. Ainsi, une augmentation d'environ 1 km² de l'aire de drainage est associée à une hausse d'environ 1 °C de la température moyenne de l'eau au mois d'août (Figure 5b). Troisièmement, on observe une relation quasi-linéaire entre le pourcentage de la surface du bassin versant occupée par des plans d'eau et la température de l'eau. Pour une augmentation de 5 % du pourcentage du bassin versant occupé par des plans d'eau, nous pouvons observer une augmentation d'environ 1 °C sur la température de l'eau au mois d'août (Figure 5c).

Tableau 5: Modèle additif généralisé de la température moyenne de l'eau (°C) au mois d'août 2020.

Variable	Degrés de liberté effectifs	Test de Fisher	Valeur de p
Distance à un plan d'eau en amont	1,7	10,5	< 0,05
Aire de drainage	1,1	6,3	<0,05
Pente du cours d'eau	0,0003	0	0,5

Température de l'air	0,00009	0	0,77
Surface du bassin versant occupée par des plans d'eau	0,9	5,1	< 0,05
Élévation	0,0001	0	0,9

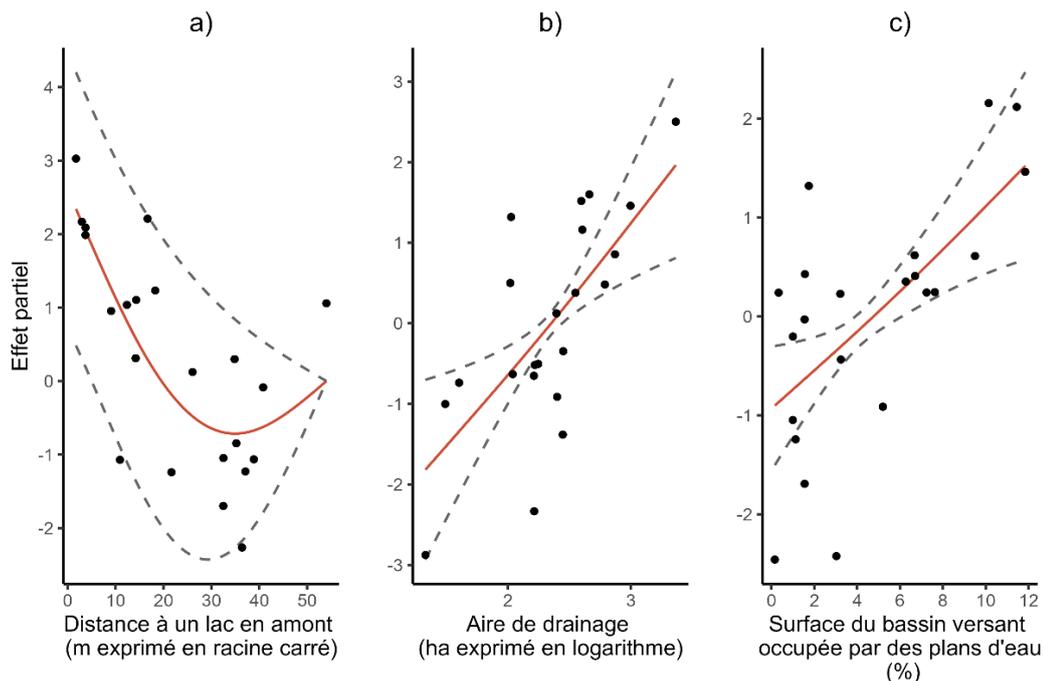


Figure 5: Effet partiel de a) la distance à un plan d'eau en amont, b) l'aire de drainage et c) la surface du bassin versant occupée par des plans d'eau sur la température moyenne de l'eau au mois d'août 2020 selon le modèle additif généralisé. Les points représentent les résidus partiels après avoir pénalisé les autres variables et les lignes pointillées représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

À l'aide du modèle GAM, nous avons modélisé la température de l'eau dans l'ensemble du réseau hydrographique du parc de la Gatineau. Nous avons estimé une gamme de température allant d'un minimum de 14,7 °C dans les tronçons de tête de bassin à un maximum de 27 °C à l'exutoire de grands lacs comme le lac La Pêche au nord de l'aire d'étude. En comparaison, nos observations avaient montré des variations comprises entre 14,5 et 23,6 °C. Nous pouvons voir sur la figure 6 que les exutoires des grands lacs du parc de la Gatineau ainsi que les exutoires des bassins versants les plus grands ont les températures de l'eau les plus chaudes. Ces

prédictions témoignent de l'importance des variables de distance aux plans d'eau et de superficie de l'aire de drainage. Les cours d'eau proches des exutoires de plans d'eau ont généralement un pourcentage élevé de superficie occupée par des plans d'eau dans le bassin versant et sont donc davantage susceptibles d'être plus chauds.

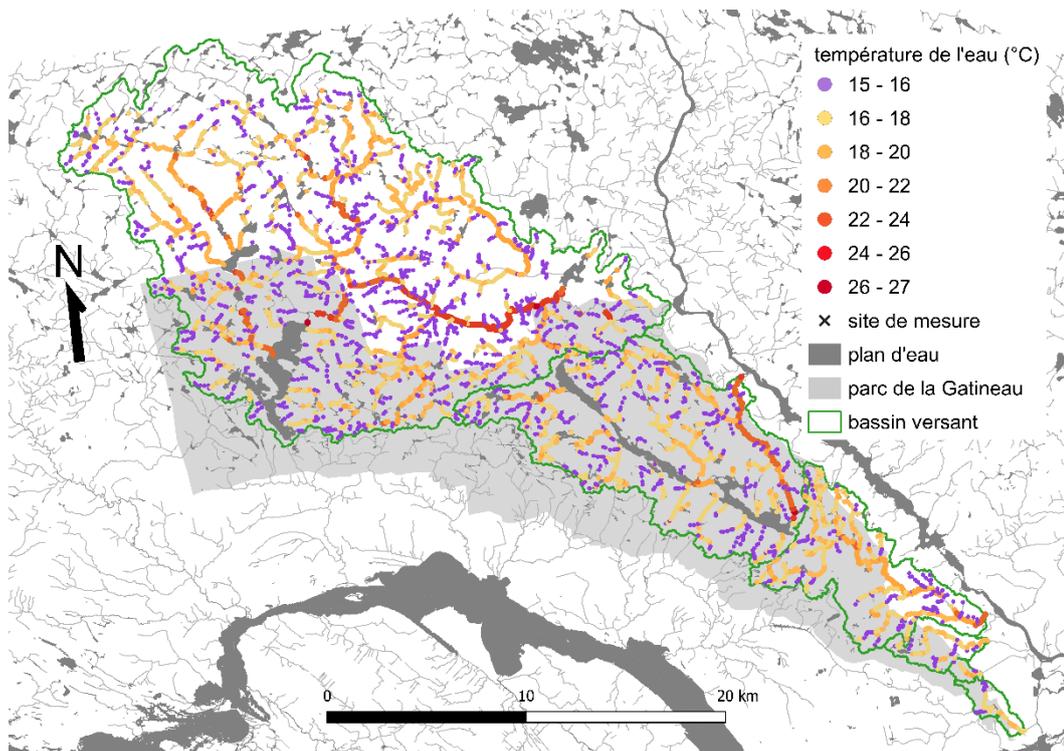


Figure 6: Températures moyennes de l'eau au mois d'août 2020 prédites pour chaque tronçon dans l'ensemble du réseau hydrographique des bassins versants du parc de la Gatineau à l'aide du modèle additif généralisé.

2.5. Discussion

Selon notre étude, on observe au mois d'août 2019 et 2020 un réchauffement moyen de 4,1 °C entre les cours d'eau en amont et en aval de réservoirs régulés par de petits barrages (Tableau 4). Un réchauffement similaire entre l'amont et l'aval des petits réservoirs a été observé par Lessard *et* Hayes (2003; +5,2 °C), Dripps *et* Granger (2013; +5,2 °C) et Zaidel *et al.* (2021 ; +5,3 °C).

Une augmentation de la magnitude en aval des réservoirs s'est traduite par une augmentation de la fréquence et de la durée des événements chauds (Tableau 4). Le réchauffement de la température de l'eau en aval du réservoir fut suffisant pour

entraîner des dépassements fréquents du seuil de 25 °C, limitant ainsi l'habitat disponible pour des espèces ayant une faible tolérance pour des conditions chaudes tel que l'omble de fontaine. En effet, l'omble de fontaine voit ses limites de températures létales (25 °C) fréquemment dépassées en aval des réservoirs au mois d'août (moyenne = 7,4 jours) et ce pour de longues périodes (moyenne = 4,6 jours consécutifs). Certaines études en climat tempéré et boréal ont montré que les populations de poissons ont diminué en aval des petits réservoirs par rapport aux populations en amont (Jensen, 2003) ou par rapport aux populations dans des rivières non régulées (Lessard and Hayes, 2003). Suite à l'augmentation des températures de l'eau en aval de petits barrages, une contraction de l'habitat des poissons indigènes a été observée, mais aussi une expansion de l'aire de répartition d'espèces adaptées à un régime thermique plus chaud (Hari *et al.*, 2006; Milner *et al.*, 2008; Morales-Marín *et al.*, 2019). Ainsi, le réchauffement occasionné pourrait favoriser l'implantation d'espèces invasives dans les tronçons en aval des plans d'eau (Rahel and Olden, 2008).

Au contraire de Chandesris *et al.* (2019), nous n'avons pas observé de différence significative de l'écart journalier moyen entre l'amont et l'aval des petits réservoirs (Tableau 4). D'autres études ont montré une diminution de l'écart journalier moyen en aval de petits réservoirs par rapport à des cours d'eau non-régulés (Ham *et al.*, 2006; Dripps and Granger, 2013). Cependant, ces différentes études ont été réalisées sur des périodes plus longues, s'échelonnant sur une saison entière ou une année. Notre étude se concentre uniquement sur la mois d'août et des données supplémentaires seraient nécessaire pour évaluer l'effet des petits réservoirs étudiés sur l'écart journalier à d'autres mois de l'été ou de l'année.

Dans notre étude, l'effet de réchauffement entre l'amont et l'aval de réservoirs n'était pas significativement différent de celui observé entre l'amont et l'aval de lacs naturels (3,4 °C, Figure 4) au mois d'août 2020. Le réchauffement entre l'amont et l'aval de petits lacs est similaire à celui observé dans la littérature (Chu *et al.*, 2010; Seyedhashemi *et al.*, 2021). Par exemple, Maxted *et al.* (2005) ont observé un réchauffement moyen de 3,9 °C entre l'amont et l'aval de petits lacs en

(superficie entre 0,05 et 0,75 ha). Dans notre étude, la petite taille d'échantillon ($n = 9$) pourrait limiter la puissance statistique de l'ANOVA et donc notre habilité à détecter des différences de moindre ampleur entre l'effet de réchauffement des réservoirs et des lacs naturels. Or, un pairage minutieux a été effectué entre les lacs et réservoirs afin d'obtenir des sites dont la surface du bassin versant occupée par des plans d'eau était similaire, permettant ainsi de minimiser la faible puissance associée à la petite taille d'échantillon de notre étude.

Le modèle GAM a montré que les plans d'eau et leurs caractéristiques sont d'importants déterminants de la température des cours d'eau de notre aire d'étude. Outre l'aire de drainage, la distance à un plan d'eau en amont et la proportion du bassin versant occupée par des plans d'eau constituaient les principaux déterminants de la température moyenne des cours d'eau au mois d'août dans nos bassins versants forestiers (Tableau 5). Avec plus de 17 millions de petits plans d'eau dans le monde (Lehner *et al.*, 2011), les petits plans d'eau ont potentiellement un important effet de réchauffement sur les cours d'eau. En plus d'augmenter le temps de résidence de l'eau, les plans d'eau ont une plus grande superficie que les cours d'eau et reçoivent un rayonnement solaire plus important (Sinokrot and Gulliver, 2000). Dans cette étude, nous avons considéré le pourcentage de la surface du bassin versant occupée par des plans d'eau comme un proxy du temps de résidence. D'autres études utilisent plutôt le ratio de drainage (c'est-à-dire l'inverse de la proportion du bassin versant occupée par des plan d'eau) comme proxy du temps de résidence (Wehrly *et al.*, 2006; Zaidel *et al.*, 2021). Ces études sur des petits barrages ont montré qu'une diminution du ratio de drainage (c'est-à-dire une plus grande superficie du bassin versant occupé par des plans d'eau) est associée à un réchauffement des cours d'eau (Wehrly *et al.*, 2006; Zaidel *et al.*, 2021). Ainsi, la création de nouveaux plans d'eau par de petits barrages est susceptible d'augmenter la proportion du bassin versant occupée par des plans d'eau et d'augmenter la température des cours d'eau.

La distance à un plan d'eau en amont est également ressortie comme une variable déterminante de la température de l'eau en août au sein de l'aire d'étude. Le

réchauffement occasionné par les plans d'eau est maximal à l'exutoire des plans d'eau et diminuera progressivement vers l'aval pour devenir presque nul à une distance de 900 m en aval du plan d'eau (Figure 6).

Des études portant sur des cours d'eau régulés par des petits barrages et des cours d'eau non-régulés ont également montré un effet de réchauffement des plans d'eau sur une distance pouvant être comprise entre 500 et 4700 m en aval (Lessard and Hayes, 2003; Dripps and Granger, 2013; Zaidel *et al.*, 2021). La construction de petits barrages et la création de réservoirs en séquence pourraient accentuer le réchauffement occasionné par les plans d'eau si le réservoir créé se situe au sein du tronçon où l'effet d'un plan d'eau se fait ressentir. Il est donc important de mieux comprendre l'effet longitudinal des plans d'eau, d'autant plus que celui-ci varie dans le temps selon les périodes de fort et faible débit (Carlson and Poole, 2021; Leach *et al.*, 2021). L'influence des plans d'eau peut même diminuer voire se résorber lors des périodes de faible débit où d'autres variables telles que les échanges hyporhéiques et les apports latéraux en eau et les apports en eaux souterraines prennent plus d'importance vis-à-vis la température des cours d'eau (Leach *et al.*, 2021). Dans notre étude, un suivi du débit n'a pas été effectué aux sites de suivi thermique, mais de telles mesures seraient pertinentes pour étudier l'effet des plans d'eau sur la température de l'eau et comment celui-ci est amené à varier à différentes périodes de l'année. De plus, ce suivi permettrait de savoir si les variations du débit modifient la distance pour laquelle l'effet du plan d'eau sur la température de l'eau est détectable.

2.6. Conclusion

Les réservoirs régulés par de petits barrages ont eu un effet de réchauffement sur les cours d'eau en aval qui se traduit par une augmentation de la magnitude, de la fréquence et de la durée des événements chauds. Or, le réchauffement observé entre l'amont et l'aval des réservoirs n'était pas différent de celui observé entre l'amont et l'aval de lacs naturels avec des caractéristiques similaires. Dans les bassins

forestiers étudiés, les caractéristiques des plans d'eau (proportion du bassin versant occupée par des plans d'eau, distance à un plan d'eau en amont et superficie de l'aire de drainage) ont été identifiées comme d'importants déterminants de la température des cours d'eau pendant l'été. Ces résultats permettent donc de mieux comprendre l'effet des petits plans d'eau dans des écosystèmes relativement peu perturbés par des activités anthropiques. La cartographie de la température de l'eau pour l'ensemble du réseau permet de cibler les habitats thermiques froids à préserver. La disponibilité de ces habitats est amenée à diminuer avec les changements climatiques et leur préservation est importante pour les espèces sensibles aux températures chaudes. De plus, l'importante quantité de petits plans d'eau au Québec et dans le monde justifie le besoin de mieux comprendre leur rôle face aux changements climatiques : les petits plans d'eau viendront-ils exacerber ou atténuer le réchauffement des cours d'eau ? Par ailleurs, la construction de nouveaux petits barrages pour répondre au besoin en hydroélectricité, en irrigation agricole et afin de pallier les problèmes de sécheresse de plus en plus importants dans le monde risque de participer à la multiplication des petits plans d'eau dans les bassins versants et ainsi réduire les habitats thermiques froids. Il est donc nécessaire de mieux comprendre les effets cumulatifs des petits lacs et réservoirs sur la température des cours d'eau afin notamment d'assurer une saine gestion des écosystèmes aquatiques sensibles.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'importante proportion de petits barrages dans le monde ainsi que le faible nombre d'études réalisées sur ceux-ci soulignent l'importance de mieux comprendre leurs impacts potentiels sur la température de l'eau des rivières et autres cours d'eau. Cette étude a permis de mieux comprendre l'effet des petits barrages sur les différents attributs du régime thermique des rivières dans des bassins versants forestiers peu perturbés. De plus, cette étude s'intéresse à l'impact des petits barrages sur des attributs du régime thermique qui est encore peu abordé dans la littérature.

Nous avons ainsi montré que les petits barrages provoquent une augmentation de la magnitude, de la fréquence et de la durée des événements où la température dépasse 25°C mais qu'ils n'avaient pas d'effet sur le l'écart journalier moyen du régime thermique en aval des réservoirs par rapport à l'amont. Nous avons montré que ces effets n'étaient pas significativement différents de ceux que peuvent avoir de petits lacs naturels sur le régime thermique des cours d'eau. Ainsi, la présence d'un plan d'eau semble être la variable principale du réchauffement en aval et n'est pas nécessairement attribuable à la présence d'un petit barrage. Le risque de réduction des habitats thermiques froids se pose donc principalement lorsqu'un petit barrage engendre la création d'un nouveau plan d'eau. l'aide d'un modèle additif généralisé, nous avons pu faire ressortir les variables principales de la température moyenne de l'eau en août 2020 dans les cours d'eau du parc de la Gatineau possédant une aire de drainage supérieure à 1 ha. Nous avons observé un réchauffement significatif des cours d'eau de l'amont vers l'aval avec l'accroissement de l'aire de drainage et de la proportion du bassin versant occupée par des plans d'eau, ainsi qu'un effet de réchauffement lorsque des plans d'eau étaient situés à moins de 900m en amont. Avec l'augmentation des projets de barrages dans le monde, les résultats de cette étude pourraient permettre aux gestionnaires de limiter la présence de réservoirs

dans des bassins versants fortement occupés par des plans d'eau. La distance avec d'autres plans d'eau dans le réseau hydrographique devrait également être prise en compte avant toute nouvelle implantation de réservoirs. Cela permettrait de limiter la réduction des habitats thermiques froids notamment lorsque les plans d'eau sont disposés en séquence.

BIBLIOGRAPHIE

- Angilletta MJ, Ashley Steel E, Bartz KK, Kingsolver JG, Scheuerell MD, Beckman BR, Crozier LG. 2008. Big dams and salmon evolution: changes in thermal regimes and their potential evolutionary consequences: Thermal adaptation of salmon. *Evolutionary Applications* **1** (2): 286–299 DOI: 10.1111/j.1752-4571.2008.00032.x
- Astrade L. 1998. La gestion des barrages-réservoirs au Québec : exemples d'enjeux environnementaux. *Annales de Géographie* **107** (604): 590–609 DOI: 10.3406/geo.1998.20878
- Beaufort A. 2015. Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale : Application au bassin versant de la Loire.thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, Tours.
- Beaufort A, Moatar F, Curie F, Ducharne A, Bustillo V, Thiéry D. 2016. River Temperature Modelling by Strahler Order at the Regional Scale in the Loire River Basin, France: River Temperature Modelling by Strahler Order. *River Research and Applications* **32** (4): 597–609 DOI: 10.1002/rra.2888
- Brooks M E, Kristensen K, Benthem K J ,van, Magnusson A, Berg C W, Nielsen A, Skaug H J, Mächler M, Bolker B M. 2017. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal* **9** (2): 378 DOI: 10.32614/RJ-2017-066

- Brown GW. 1969. Predicting temperatures of small streams. *Water Resources Research* **5** (1): 68–75 DOI: 10.1029/WR005i001p00068
- Caissie D. 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* **51** (8): 1389–1406 DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x
- Caissie D, Kurylyk BL, St-Hilaire A, El-Jabi N, MacQuarrie KTB. 2014. Streambed temperature dynamics and corresponding heat fluxes in small streams experiencing seasonal ice cover. *Journal of Hydrology* **519**: 1441–1452 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.034
- Carlson SP, Poole GC. 2021. Describing alpine lake influence on stream network temperatures: A statistical modelling approach. *Hydrological Processes* **35** (3) DOI: 10.1002/hyp.14072
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 2014. Guide d'interprétation de la fiche technique d'un barrage: 20
- Chandesris A, Van Looy K, Diamond JS, Souchon Y. 2019. Small dams alter thermal regimes of downstream water. *Hydrology and Earth System Sciences* **23** (11): 4509–4525 DOI: 10.5194/hess-23-4509-2019
- Chu C, Jones NE, Allin L. 2010. Linking the thermal regimes of streams in the Great Lakes Basin, Ontario, to landscape and climate variables: thermal regimes in Ontario streams. *River Research and Applications* **26** (3): 221–241 DOI: 10.1002/rra.1259
- Comte L, Buisson L, Daufresne M, Grenouillet G. 2013. Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends: *Climate*

- change and freshwater fish. Freshwater Biology* **58** (4): 625–639 DOI: 10.1111/fwb.12081
- Cranswick RH, Cook PG, Lamontagne S. 2014. Hyporheic zone exchange fluxes and residence times inferred from riverbed temperature and radon data. *Journal of Hydrology* **519**: 1870–1881 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.059
- Dripps W, Granger SR. 2013. The impact of artificially impounded, residential headwater lakes on downstream water temperature. *Environ Earth Sci*: 9
- Ebersole JL, Liss WJ, Frissell CA. 2003. Thermal heterogeneity, stream channel morphology, and salmonid abundance in northeastern Oregon streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60** (10): 1266–1280 DOI: 10.1139/f03-107
- Elliott JM, Elliott JA. 2010. Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of Fish Biology* **77** (8): 1793–1817 DOI: 10.1111/j.1095-8649.2010.02762.x
- Elliott JM, Hurley MA. 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 DOI: 10.1046/j.1365-2435.1997.00130.x
- Evans EC, McGregor GR, Petts GE. 1998. River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological Processes* **12**: 21

- Ficke AD, Myrick CA, Hansen LJ. 2007. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **17** (4): 581–613 DOI: 10.1007/s11160-007-9059-5
- Ham J, Toran L, Cruz J. 2006. Effect of upstream ponds on stream temperature. *Environmental Geology* **50** (1): 55–61 DOI: 10.1007/s00254-006-0186-4
- Hari RE, Livingstone DM, Siber R, Burkhardt-Holm P, Guttinger H. 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* **12** (1): 10–26 DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x
- Hartig florian. 2021. *DHARMa: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models. R(0.3.3.0)*. Available at: <http://florianhartig.github.io/DHARMa/>
- Hasnain SS, Minns CK, Shuter BJ. 2010. *Key Ecological Temperature Metrics for Canadian Freshwater Fishes*.
- International Commission on Large Dams. 2011. Constitution Status.pdf Available at: https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/CIGB/INSTITUTIONAL_FILES/Constitution2011.pdf[accessed 2020 Apr 27]
- Isaak DJ, Peterson EE, Ver Hoef JM, Wenger SJ, Falke JA, Torgersen CE, Sowder C, Steel EA, Fortin M-J, Jordan CE, et al. 2014. Applications of spatial statistical network models to stream data: Spatial statistical network models for stream data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **1** (3): 277–294 DOI: 10.1002/wat2.1023

- Jensen AJ. 2003. Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the regulated River Alta: effects of altered water temperature on parr growth. *River Research and Applications* **19** (7): 733–747 DOI: 10.1002/rra.710
- Jonsson B, Jonsson N. 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): 2381–2447 DOI: 10.1111/j.1095-8649.2009.02380.x
- Kędra M, Wiejaczka Ł. 2018. Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: Assessment and management implications. *Science of The Total Environment* **626**: 1474–1483 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.044
- Kelleher C, Wagener T, Gooseff M, McGlynn B, McGuire K, Marshall L. 2012. Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams. *Hydrological Processes* **26** (5): 771–785 DOI: 10.1002/hyp.8186
- Kil HK, Bae YJ. 2012. Effects of low-head dam removal on benthic macroinvertebrate communities in a Korean stream. *Animal Cells and Systems* **16** (1): 69–76 DOI: 10.1080/19768354.2011.611176
- Leach JA, Neilson BT, Buahin CA, Moore RD, Laudon H. 2021. Lake outflow and hillslope lateral inflows dictate thermal regimes of forested streams draining small lakes. *Water Resources Research* DOI: 10.1029/2020WR028136
- Lehner B, Liermann CR, Revenga C, Vörösmarty C, Fekete B, Crouzet P, Döll P, Endejan M, Frenken K, Magome J, et al. 2011. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management.

Frontiers in Ecology and the Environment **9** (9): 494–502 DOI:
10.1890/100125

Lessard JL, Hayes DB. 2003. Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. *River Research and Applications* **19** (7): 721–732 DOI: 10.1002/rra.713

Lund SG, Caissie D, Cunjak RA, Vijayan MM, Tufts BL. 2002. The effects of environmental heat stress on heat-shock mRNA and protein expression in Miramichi Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **59** (9): 1553–1562 DOI: 10.1139/f02-117

Lund SG, Lund MEA, Tufts BL. 2003. Red blood cell Hsp 70 mRNA and protein as bio-indicators of temperature stress in the brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60** (4): 460–470 DOI: 10.1139/f03-039

Magilligan FJ, Nislow KH. 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* **71** (1–2): 61–78 DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.017

Maheu A, St-Hilaire A, Caissie D, El-Jabi N, Bourque G, Boisclair D. 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): 1885–1897 DOI: 10.1139/cjfas-2015-0486

Marra G, Wood SN. 2011. Practical variable selection for generalized additive models. *Computational Statistics & Data Analysis* **55** (7): 2372–2387 DOI: 10.1016/j.csda.2011.02.004

- Maxted JR, McCreedy CH, Scarsbrook MR. 2005. Effects of small ponds on stream water quality and macroinvertebrate communities. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **39** (5): 1069–1084 DOI: 10.1080/00288330.2005.9517376
- Mbaka JG, Wanjiru Mwaniki M. 2015. A global review of the downstream effects of small impoundments on stream habitat conditions and macroinvertebrates. *Environmental Reviews* **23** (3): 257–262 DOI: 10.1139/er-2014-0080
- McCullough DA. 1999. Review and synthesis of effects of alterations to the water temperature regime on freshwater life stages of salmonids, with special reference to Chinook salmon. *Ecological Applications* **9**: 291
- Mellina E, Moore RD, Hinch SG, Macdonald JS, Pearson G. 2002. Stream temperature responses to clearcut logging in British Columbia: the moderating influences of groundwater and headwater lakes. **59**: 15
- Mendoza-Lera C, Larrañaga A, Pérez J, Descals E, Martínez A, Moya O, Arostegui I, Pozo J. 2012. Headwater reservoirs weaken terrestrial-aquatic linkage by slowing leaf-litter processing in downstream regulated reaches: slow leaf-litter processing in downstream regulated reaches. *River Research and Applications* **28** (1): 13–22 DOI: 10.1002/rra.1434
- Milner AM, Robertson AL, Monaghan KA, Veal AJ, Flory EA. 2008. Colonization and development of an Alaskan stream community over 28 years. *Frontiers in Ecology and the Environment* **6** (8): 413–419 DOI: 10.1890/060149

- Mischke U. 2003. Cyanobacteria associations in shallow polytrophic lakes: influence of environmental factors. *Acta Oecologica* **24**: S11–S23 DOI: 10.1016/S1146-609X(03)00003-1
- Mohseni O, Erickson TR, Stefan HG. 1999. Sensitivity of stream temperatures in the United States to air temperatures projected under a global warming scenario. *Water Resources Research* **35** (12): 3723–3733 DOI: 10.1029/1999WR900193
- Moore RD, Sutherland P, Gomi T, Dhakal A. 2005. Thermal regime of a headwater stream within a clear-cut, coastal British Columbia, Canada. *Hydrological Processes* **19** (13): 2591–2608 DOI: 10.1002/hyp.5733
- Morales-Marín LA, Rokaya P, Sanyal PR, Sereda J, Lindenschmidt KE. 2019. Changes in streamflow and water temperature affect fish habitat in the Athabasca River basin in the context of climate change. *Ecological Modelling* **407**: 108718 DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108718
- Myers BJE, Lynch AJ, Bunnell DB, Chu C, Falke JA, Kovach RP, Krabbenhoft TJ, Kwak TJ, Paukert CP. 2017. Global synthesis of the documented and projected effects of climate change on inland fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **27** (2): 339–361 DOI: 10.1007/s11160-017-9476-z
- Neuheimer AB, Taggart CT. 2007. The growing degree-day and fish size-at-age: the overlooked metric. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **64** (2): 375–385 DOI: 10.1139/f07-003
- Olden JD, Naiman RJ. 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater

- ecosystem integrity: Incorporating thermal regimes in environmental flows assessments. *Freshwater Biology* **55** (1): 86–107 DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x
- Pedersen NL, Sand-Jensen K. 2007. Temperature in lowland Danish streams: contemporary patterns, empirical models and future scenarios. *Hydrological Processes* **21** (3): 348–358 DOI: 10.1002/hyp.6237
- Poesch MS, Chavarie L, Chu C, Pandit SN, Tonn W. 2016. Climate Change Impacts on Freshwater Fishes: A Canadian Perspective. *Fisheries* **41** (7): 385–391 DOI: 10.1080/03632415.2016.1180285
- Poff NL, Allan JD, Bain MB, Karr JR, Prestegard KL, Richter BD, Sparks RE, Stromberg JC. 1997. The Natural Flow Regime. *BioScience* **47** (11): 769–784 DOI: 10.2307/1313099
- Poole GC, Berman CH. 2001. An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management* **27** (6): 787–802 DOI: 10.1007/s002670010188
- Prats J, Val R, Dolz J, Armengol J. 2012. Water temperature modeling in the Lower Ebro River (Spain): Heat fluxes, equilibrium temperature, and magnitude of alteration caused by reservoirs and thermal effluent. *Water Resources Research* **48** (5) DOI: 10.1029/2011WR010379
- Preece RM, Jones HA. 2002. The effect of Keepit Dam on the temperature regime of the Namoi River, Australia. *River Research and Applications* **18** (4): 397–414 DOI: 10.1002/rra.686

- Prokešová M, Gebauer T, Matoušek J, Lundová K, Čejka J, Zusková E, Stejskal V. 2020. Effect of temperature and oxygen regime on growth and physiology of juvenile *Salvelinus fontinalis* × *Salvelinus alpinus* hybrids. *Aquaculture*: 735119 DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.735119
- Rahel FJ, Olden JD. 2008. Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species. *Conservation Biology* **22** (3): 521–533 DOI: 10.1111/j.1523-1739.2008.00950.x
- Raptis CE, van Vliet MTH, Pfister S. 2016. Global thermal pollution of rivers from thermoelectric power plants. *Environmental Research Letters* **11** (10): 104011 DOI: 10.1088/1748-9326/11/10/104011
- Recknagel F, Zohary T, Rucker J, Orr PT, Branco CC, Nixdorf B. 2019. Causal relationships of Raphidiopsis (formerly Cylindrospermopsis) dynamics with water temperature and N:P-ratios: A meta-analysis across lakes with different climates based on inferential modelling. *Harmful Algae* **84**: 222–232 DOI: 10.1016/j.hal.2019.04.005
- Risley JC, Constantz J, Essaid H, Rounds S. 2010. Effects of upstream dams versus groundwater pumping on stream temperature under varying climate conditions: UPSTREAM DAM AND GW PUMPING IMPACTS. *Water Resources Research* **46** (6) DOI: 10.1029/2009WR008587
- Ruiz-Navarro A, Gillingham PK, Britton JR. 2016. Predicting shifts in the climate space of freshwater fishes in Great Britain due to climate change. *Biological Conservation* **203**: 33–42 DOI: 10.1016/j.biocon.2016.08.021

- Seyedhashemi H, Moatar F, Vidal J-P, Diamond JS, Beaufort A, Chandesris A, Valette L. 2021. Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale. *Science of The Total Environment* **766**: 142667 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142667
- Singer EE, Gangloff MM. 2011. Effects of a small dam on freshwater mussel growth in an Alabama (U.S.A.) stream: Small dams and mussel growth. *Freshwater Biology* **56** (9): 1904–1915 DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02608.x
- Sinokrot BA, Gulliver JS. 2000. In-stream flow impact on river water temperatures. *Journal of Hydraulic Research* **38** (5): 339–349 DOI: 10.1080/00221680009498315
- Sinokrot BA, Stefan HG, McCormick JH, Eaton JG. 1995. Modeling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs. *Climatic Change* **30** (2): 181–200 DOI: 10.1007/BF01091841
- Somers KA, Bernhardt ES, Grace JB, Hassett BA, Sudduth EB, Wang S, Urban DL. 2013. Streams in the urban heat island: spatial and temporal variability in temperature. *Freshwater Science* **32** (1): 309–326 DOI: 10.1899/12-046.1
- Wawrzyniak V. 2012. Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône.thèse de doctorat de géographie et d'aménagement, Université de Lyon, Lyon.

- Wehrly KE, Wiley MJ, Seelbach PW. 2006. Influence of Landscape Features on Summer Water Temperatures in Lower Michigan Streams: 17
- Xu CL, Letcher BH, Nislow KH. 2010. Size-dependent survival of brook trout *Salvelinus fontinalis* in summer: effects of water temperature and stream flow. *Journal of Fish Biology* **76** (10): 2342–2369 DOI: 10.1111/j.1095-8649.2010.02619.x
- Zaidel PA, Roy AH, Houle KM, Lambert B, Letcher BH, Nislow KH, Smith C. 2021. Impacts of small dams on stream temperature. *Ecological Indicators* **120**: 106878 DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106878
- Zhang Q, Dong Y, Li F, Zhang A, Lei T. 2014. Quantifying detachment rate of eroding rill or ephemeral gully for WEPP with flume experiments. *Journal of Hydrology* **519**: 2012–2019 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.040
- Zhao F, Zhan X, Xu H, Zhu G, Zou W, Zhu M, Kang L, Guo Y, Zhao X, Wang Z, et al. 2022. New insights into eutrophication management: Importance of temperature and water residence time. *Journal of Environmental Sciences* **111**: 229–239 DOI: 10.1016/j.jes.2021.02.033
- Zhong Y, Power G. 1996. Environmental impacts of hydroelectric projects on fish resources in China. *River Research and Applications* **12** (1): 18

ANNEXE

Annexe 1 : Localisation des sites de suivi

Code du site	Nom du site	Longitude	Latitude	Période de suivi
Site 1	Barrage Pink - Amont	-75.80929	45.470834	2019-2020
Site 2	Barrage Pink - Aval	-75.801941	45.46663	2019-2020
Site 3	Ruisseau 1	-75.83203	45.4943	2019-2020
Site 4	Barrage Fortune - Amont	-75.874006	45.509901	2019-2020
Site 5	Barrage Fortune - Aval	-75.862044	45.509193	2019-2020
Site 6	Ruisseau 2	-75.860876	45.50391	2019-2020
Site 7	Barrage Renaud - Amont	-76.031488	45.602278	2019-2020
Site 8	Barrage Renaud - Aval	-76.021259	45.600466	2019-2020
Site 9	Barrage Taylor - Amont	-76.058285	45.60354	2019-2020
Site 10	Barrage Taylor - Aval	-76.05756	45.60352	2019-2020
Site 11	Ruisseau3	-75.928231	45.5678	2019-2020
Site 12	Ruisseau4	-76.020345	45.598211	2019-2020
Site 13	Ruisseau5	-76.14901	45.640337	2019-2020
Site 14	Ruisseau6	-75.8525	45.477399	2019-2020
Site 15	Ruisseau7	-75.85146	45.493027	2019-2020
Site 16	Lac Lusk - aval	-75.98115	45.582789	2020
Site 17	Barrage Dennison - Amont	-75.79206	45.47207	2019-2020
Site 18	Barrage Dennison - Aval	-75.791894	45.477093	2019-2020
Site 19	Ruisseau8	-75.758174	45.438508	2020
Site 20	Lac Kelly - Amont	-76.24621	45.66804	2020
Site 21	Lac Kelly - Aval	-76.23647	45.66633	2020
Site 22	Lac Lusk -Amont	-76.01626	45.5824	2020
Site 23	Ruisseau 9	-76.13937	45.65703	2020
Site 24	Ruisseau 10	-75.81323	45.50737	2020
Site 25	Lac Meunier - Amont	-76.00967	45.62397	2020
Site 26	Lac Meunier - Aval	-76.01111	45.62405	2020
Site 27	Ruisseau 11	-75.8994	45.53621	2020
Site 28	Ruisseau 12	-75.91051	45.54322	2020
Site 29	Ruisseau 13	-75.80797	45.48419	2020
Site 30	Ruisseau 14	-75.83049	45.47655	2020

Site 31	Ruisseau 15	-75.91289	45.54126	2020
Site 32	Ruisseau 16	-75.88086	45.50639	2020
Site 33	Ruisseau 17	-75.85477	45.51895	2020
Site 34	Lac Kidder - Amont	-76.08488	45.60359	2020
Site 35	Lac Kidder - Aval	-76.09236	45.60264	2020
Site 36	Ruisseau 18	-75.793696	45.474085	2019-2020