

Centre Eau Terre Environnement

# **Modélisation et analyse hydrologique et thermique d'un cours d'eau aménagé : la rivière Tobique (Nouveau-Brunswick, Canada)**

Par  
Negin Rahmati

Mémoire pour l'obtention du grade de  
Maître ès Sciences (M.Sc.) en sciences de l'eau

## **Jury d'évaluation**

Président du jury et  
examineur interne

Normand Bergeron  
Professeur, INRS-ETE, Université de  
Québec

Examineur externe

Daniel Nadeau  
Département de génie civil et de génie  
des eaux, Faculté des sciences et de  
génie, Université Laval

Directeur de recherche

André St-Hilaire  
Professeur, INRS-ETE, Université de  
Québec

Codirecteur de recherche

Allen Curry  
Université du Nouveau-Brunswick

## REMERCIEMENTS

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces quelques lignes de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de mon travail. Je tiens avant tout à remercier mon directeur de recherche André St-Hilaire, pour son encadrement efficace, et pour m'avoir encouragée, aidée et incitée à mener à bien ce projet. Je lui suis reconnaissante de l'accueil qu'il m'a fait au sein de son équipe. Je salue son amabilité, sa patience malgré tous les défis que j'ai eu à relever au début, sa disponibilité, sa souplesse d'esprit et surtout ses conseils judicieux, qui m'ont permis d'approfondir mes connaissances.

Je remercie également mon codirecteur Allen Curry pour ses précieux conseils, son enthousiasme et dévouement envers la recherche. Sa rigueur professionnelle, ses critiques constructives et ses encouragements m'ont poussée à me dépasser moi-même et à donner une meilleure performance.

Je souhaite également remercier toute l'équipe qui travaille dans le cadre de ce projet, qui a bien voulu répondre à mes différentes questions, ce qui m'a aidée dans l'élaboration de ce travail. Je dédie un merci particulier à Eisenhower Rincon pour m'avoir aidée à récupérer les données requises et à Mostafa Khorsandi pour m'avoir familiarisée avec les concepts hydrologiques pour m'avoir tant appris sur les rivières.

Merci à Normand Bergeron et Daniel Nadeau pour avoir pris le temps de lire mon mémoire et me donner leurs suggestions et commentaires en tant qu'examineurs interne et externe. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et à Énergie Nouveau-Brunswick pour le financement de ce projet.

Enfin, je remercie ma famille, mes amis et, plus important encore, mon cher époux pour leur soutien continu, leur affection et leur compréhension lors de mes recherches et de la rédaction de ma thèse.

Merci beaucoup !



## RÉSUMÉ

La température de l'eau est reconnue comme une variable essentielle affectant la gestion des ressources en eau et contrôlant l'existence et le développement des organismes aquatiques. Malgré de nombreuses études sur les températures de l'eau en Amérique du Nord, seules quelques-unes se sont concentrées sur l'hiver et ont principalement ciblé l'altération des rivières régulées en été.

L'objectif principal de cette étude est de développer une approche pour prédire la température de l'eau de la rivière Tobique, Nouveau-Brunswick, Canada, en considérant l'impact de quatre réservoirs nommés Serpentine, Long, Sisson et Trousers, sur le système du régime thermique de la rivière d'ici 2100. De plus, les degrés-jours ont été utilisés pour estimer le temps d'éclosion du saumon atlantique et de l'omble de fontaine, deux espèces d'eau froide sensibles aux fluctuations irrégulières de la température de l'eau. À cet égard, CEQUEAU, un modèle hydrologique et de température de l'eau, a été utilisé pour simuler le débit et la température de l'eau de la rivière Tobique. L'évaluation de l'impact thermique des barrages sur la Tobique a été réalisée en simulant des températures de l'eau à différentes profondeurs dans les réservoirs du lac Serpentine et la température de l'eau en aval des trois autres réservoirs à l'aide d'un modèle statistique. Ce modèle statistique a été couplé à CEQUEAU pour étudier l'impact du puisage de l'eau du réservoir à différentes profondeurs sur les températures en aval. Des données météorologiques futures ont été requises comme données d'entrée dans le modèle pour simuler l'effet du changement climatique sur le régime thermique de la rivière Tobique. En conséquence, ces ensembles de données ont été extraits de l'expérience régionale coordonnée de réduction d'échelle du climat (CORDEX). Le modèle sélectionné était CanRCM4, un modèle climatique régional qui réduit dynamiquement les informations climatiques mondiales générées par le modèle canadien du système terrestre de deuxième génération (CanESM2). Parmi les scénarios de changement climatique disponibles, le RCP8.5 a été sélectionné. Les résultats ont indiqué que la température moyenne de la rivière augmenterait d'environ 3,5°C sous l'effet du changement climatique. La température de l'eau simulée a montré que les barrages pouvaient modifier les températures de l'eau en aval de la rivière couverte de glace en hiver jusqu'à une distance d'au moins 2-3 km des réservoirs. Les calculs des degrés-jours ont démontré que les œufs de saumon atlantique et d'omble de fontaine devraient éclore plus

tôt au printemps ou même en hiver en raison de la température plus élevée dans les tronçons de rivière à proximité du barrage (< 3 km), ce qui pourrait les mettre en danger.

Mots-clés : Barrages; Changement climatique; Degrés-jours d'éclosion; Modèle CEQUEAU; Modélisation statistique; Omble de fontaine; RCP8,5; Saumon atlantique; Température de l'eau

## ABSTRACT

Water temperature is recognized as an essential variable affecting water resource management and controlling the existence and development of aquatic organisms. Despite numerous studies on water temperatures in North America, only a few have focused on winter and mainly targeted summer and the alteration of regulated rivers in summer.

The main objective of this study is to develop an approach to predict the water temperature of the Tobique River, New Brunswick, Canada, considering the impact of four reservoirs named Serpentine, Long, Sisson and Trousers, on the system of the thermal regime of the river by 2100. In addition, degree days were employed to estimate the hatching time of Atlantic salmon and Brook trout, as two cold-water species sensitive to irregular water temperature fluctuation. In this regard, CEQUEAU, a hydrological and water temperature model, was used to simulate the flow and water temperature of the Tobique River. Assessment of the thermal impact of dams on the Tobique was performed by generating water temperatures at different depths in Serpentine Lake reservoirs and water temperature downstream of the other three reservoirs using a statistical model. This statistical model was coupled to CEQUEAU to investigate the impact of drawing reservoir water at different depths on the downstream temperatures. Future meteorological data were required as input in the model to simulate the effect of climate change on the thermal regime of the Tobique River. As a result, these datasets were retrieved from the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX). The selected model was CanRCM4, a regional climate model which dynamically downscales the global climate information generated by the second-generation Canadian Earth System Model (CanESM2). Among available climate change scenarios, RCP8.5 was selected. Results indicated the average temperature of the river would increase approximately by 3.5°C under the effect of climate change. The simulated water temperature showed that the dams could change downstream water temperatures of the ice-covered river in winter up to a distance of at least 2-3 km from the reservoirs. Degree days calculations demonstrated that Atlantic salmon and Brook trout eggs are expected to hatch earlier in spring or even winter due to the higher temperature in river reaches located close to the dam (< 3 km), which could endanger them.

Keywords: Atlantic salmon; Brook trout; CEQUEAU model; Climate Change; Dams; Hatching degree days; Statistical modelling; Water temperature.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>III</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
1.1 LA TEMPERATURE DE L'EAU.....	1
1.2 BARRAGES.....	1
1.2.1 <i>Grands barrages</i> .....	1
1.2.2 <i>Petits barrages</i> .....	2
1.3 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	2
1.4 ESPECES INDIGENES CIBLEES DANS CETTE ETUDE.....	3
1.4.1 <i>Le saumon atlantique</i> .....	3
1.4.2 <i>L'omble de fontaine</i> .....	3
1.5 CATEGORIES DE MODELES DE TEMPERATURE DE L'EAU.....	4
1.5.1 <i>Les modèles statistiques</i> .....	4
1.5.2 <i>Modèles déterministes</i> .....	4
1.6 REGION D'ETUDE, PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF .....	5
1.7 STRUCTURE DU MEMOIRE .....	6
<b>2 MATÉRIEL ET MÉTHODES</b> .....	<b>7</b>
2.1 STRUCTURE DU CHAPITRE .....	7
2.2 METHODE .....	7
2.2.1 <i>Zone d'étude</i> .....	7
2.2.2 <i>Le modèle CEQUEAU</i> .....	8
2.2.3 <i>Module thermique</i> .....	10
2.3 DISPOSITION DE LA GRILLE DU MODELE .....	12
2.4 ACQUISITION DE DONNEES .....	13
2.4.1 <i>Données physiographiques</i> : .....	13
2.5 CALIBRATION DU MODELE.....	13
2.5.1 <i>Calibration hydrologique</i> .....	13



2.5.2	<i>Calibration thermique</i> .....	13
2.5.3	<i>Modèle statistique</i> .....	14
2.6	ÉVALUATION DE L'IMPACT DES BARRAGES SUR LE TEMPS D'ECLOSION DU SAUMON ATLANTIQUE ET DE LA TRUITE DE RUISSEAU.....	15
2.7	CALIBRATION ET SIMULATION POUR L'ETE.....	15
2.8	CARACTERISTIQUES DE TEMPERATURE POUR L'ETE.....	16
<b>3</b>	<b>RESULTATS</b> .....	<b>19</b>
3.1	STRUCTURE DU CHAPITRE.....	19
3.2	COMPARAISON DU DEBIT DE L'HYPOLIMNION, DE LA THERMOCLINE ET DE L'EPILIMNION.....	19
3.3	MODELE STATISTIQUE.....	20
3.4	CALIBRATION HYDROLOGIQUE ET THERMIQUE.....	20
3.5	DEGRES-JOURS.....	22
3.6	RESULTATS DE LA SIMULATION DE TEMPERATURE ESTIVALE.....	23
3.6.1	<i>Simulation de modèles statistiques</i> .....	23
3.7	SIMULATION THERMIQUE - LE MODELE CEQUEAU.....	25
3.7.1	<i>Caractéristiques de température en aval du lac Serpentine</i> .....	25
3.8	DEGRES-JOURS ET IMPACT ECOLOGIQUE SUR LE SAUMON ATLANTIQUE ET L'OMBLE DE FONTAINE A LA CONFLUENCE DES RESERVOIRS.....	28
3.9	RESULTATS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	29
3.9.1	<i>Projection de la température des rivières</i> .....	29
3.9.2	<i>Projection des degrés-jours pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine dans les principaux affluents de la rivière Tobique</i> .....	33
<b>4</b>	<b>HYDRO-THERMAL MODELLING OF THE POTENTIAL IMPACTS OF RESERVOIRS ON WATER TEMPERATURE AND INCUBATION TIME OF ATLANTIC SALMON AND BROOK TROUT IN THE TOBIQUE RIVER, CANADA</b> .....	<b>39</b>
4.1	INTRODUCTION.....	39
4.2	PURPOSE OF THE STUDY.....	41
4.3	METHODS.....	41
4.3.1	<i>CEQUEAU model</i> .....	41
4.3.2	<i>Thermal module</i> .....	43
4.3.3	<i>Study Area</i> .....	44
4.3.4	<i>Meteorological data</i> .....	46
4.3.5	<i>Statistical model</i> .....	47
4.3.6	<i>Thermal Module Calibration</i> .....	49
4.3.7	<i>River temperature and embryo incubation periods</i> .....	49
4.4	RESULTS.....	49
4.4.1	<i>Reservoir statistical model calibration results</i> .....	49

4.4.2	<i>River thermal and hydrological calibration and validation</i> .....	53
4.4.3	<i>Incubation Periods</i> .....	56
4.4.4	<i>Long, Trousers and Sisson Lake Degree Days</i> .....	58
4.5	DISCUSSION.....	58
4.6	CONCLUSION.....	60
<b>5</b>	<b>DISCUSSION GÉNÉRAL ET CONCLUSION</b> .....	<b>61</b>
5.1	STRUCTURE DU CHAPITRE .....	61
5.2	COUPLAGE DU MODELE CONCEPTUEL CEQUEAU A UN MODELE STATISTIQUE.....	61
5.3	IMPLICATIONS ECOLOGIQUES DU RECHAUFFEMENT DE LA TEMPERATURE DE TOBIQUE.....	64
5.4	LIMITES ET TRAVAUX FUTURS .....	65
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>67</b>



## LISTE DES FIGURES

FIGURE 2-1 COMPOSANTES DU BASSIN VERSANT DE CEQUEAU (MORIN ET PAQUET 2007).....	10
FIGURE 2-2 REPRÉSENTATION DES TERMES DU BILAN THERMIQUE INCLUS DANS LE MODÈLE DE TEMPÉRATURE D'EAU CEQUEAU (MORIN ET COUILLARD 1990) .....	11
FIGURE 2-3 SEGMENTATION DU BASSIN VERSANT DE TOBIQUE EN CARRÉS ENTIERS. LE DEGRADE DE COULEURS REPRESENTE L'ELEVATION DU BASSIN VERSANT. L'ETOILE ROUGE EST LE POINT AUQUEL LE MODULE THERMIQUE CEQUEAU A ETE CALIBRE PAR RAPPORT AUX DONNEES OBSERVEES. CET EMPLACEMENT SERA MENTIONNE AVEC LE NOM CP562.....	12
FIGURE 3-1 PROFIL DE TEMPÉRATURE OBSERVÉ DU LAC SERPENTINE.....	20
FIGURE 3-2 RÉSULTATS DU MODÈLE CEQUEAU POUR LA RIVIÈRE TOBIQUE AU CE 281, A) DÉBIT. B) TEMPÉRATURE DE L'EAU.....	21
FIGURE 3-3 TEMPÉRATURES DE L'EAU SIMULÉES ET MESURÉES DANS LE LAC SERPENTINE À 1, 2, 3, 4, 5, 6 ET 7 M SOUS LA SURFACE DE L'EAU EN ÉTÉ 2020 .....	24
FIGURE 3-4 A) LE NOMBRE DE JOURS OU LA TEMPERATURE DE L'EAU DEPASSE 20 °C A DIFFERENTES PROFONDEURS DANS LE LAC SERPENTINE. B) DEGRES-JOURS POUR LES TEMPS OU LA TEMPERATURE DE L'EAU DEPASSE DE 20 °C A DIFFERENTES PROFONDEURS DANS LE LAC SERPENTINE. ....	26
FIGURE 3-5 NOMBRE DE JOURS PENDANT LESQUELS LA TEMPÉRATURE DE L'EAU EN AVAL DU LAC SERPENTINE SE SITUE DANS LA PLAGE DE TEMPÉRATURE OPTIMALE POUR LE SAUMON ATLANTIQUE (DE 1997 À 2020). LA VALEUR MÉDIANE EST X, LES LIMITES INFÉRIEURE ET SUPÉRIEURE DES CASES SONT LES 25E ET 75E CENTILES. LES MOUSTACHES MONTRENT DES VALEURS ABERRANTES À MOINS DE 1 IQR DE LA MOYENNE.....	27
FIGURE 3-6 NOMBRE DE JOURS PENDANT LESQUELS LA TEMPÉRATURE DE L'EAU EN AVAL DU LAC SERPENTINE SE SITUE DANS LA PLAGE DE TEMPÉRATURE OPTIMALE POUR L'OMBLE DE FONTAINE (DE 1997 À 2020). ....	28
FIGURE 3-7 DÉBIT INTERANNUEL À LA STATION RILEY BROOK DE 2036 À 2100 .....	30
FIGURE 3-8 CHANGEMENT DE TEMPÉRATURE ET DE RAYONNEMENT SOLAIRE SELON LE SCÉNARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE RCP8.5 DE 2041 À 2100 .....	31
FIGURE 3-9 CHANGEMENT PROJETÉ DE LA TEMPÉRATURE ANNUELLE MOYENNE DE L'EAU POUR 2060 ET 2100 PAR RAPPORT À L'ANNÉE DE RÉFÉRENCE 2020 DANS LE CADRE DU SCÉNARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE RCP8.5 A) COUR D'EAU PRINCIPAL (CP562) B) 3KM EN AVAL DU LAC SERPENTINE .....	31
FIGURE 3-10 MESURES ANNUELLES DE LA TEMPÉRATURE DE LA RIVIÈRE POUR LES PÉRIODES FUTURES 2036-2039 ET 2059-2063. LES BOÎTES À MOUSTACHES MONTRENT LA GAMME DE RENDEMENT DE VARIABILITÉ PAR SCÉNARIO DE CHANGEMENT CLIMATIQUE RCP8.5. LA VALEUR MÉDIANE EST ILLUSTRÉE PAR LA LIGNE MÉDIANE. VALEUR DE RÉFÉRENCE 2017-2020 INDIQUÉE PAR DES TIRETS HORIZONTAUX. LES 25E ET 75E CENTILES SONT LES CASES SUPÉRIEURES ET INFÉRIEURES.....	33
FIGURE 3-11 RÉSULTATS DU NOMBRE DE JOURS REQUIS ENTRE LA DATE DE FRAI MAXIMALE ET LA DATE D'ÉCLOSION EN AVAL DU LAC SERPENTINE POUR LE SAUMON ATLANTIQUE A) POUR LA PÉRIODE 2036-2063 B) POUR LA PÉRIODE 2063-2100. OMBLE DE FONTAINE : C) DE 2036 À 2063 D) DE 2063 À 2100. OMBLE DE FONTAINE : C) DE 2036 A 2063 D) DE 2063 A 2100. LE X DANS LA CASE REPRESENTE LA MOYENNE .....	35
FIGURE 3-12 RESULTAT DU NOMBRE DE JOURS REQUIS POUR QUE LE SAUMON ATLANTIQUE ATTEIGNE 470 DEGRES-JOURS EN AVAL DE. A) LAC TROUSERS B) LAC LONG. NOMBRE DE JOURS NECESSAIRES	

A L'ECLOSION DE L'OMBLE DE FONTAINE (400 DEGRES-JOURS) C) DU LAC TROUSERS D) DU LAC LONG.....	37
FIGURE 4-1 DIAGRAM OF THE PRODUCTION FUNCTION OF THE CEQUEAU MODEL (MORIN AND COUILLARD 1990) .....	42
FIGURE 4-2 TOBIQUE RIVER WATERSHED. THE TEMPERATURE LOGGER STATION USED FOR CALIBRATION IS CP562 (YELLOW DIAMOND) .....	45
FIGURE 4-3 THE RELATIONSHIP BETWEEN MEAN DAILY AIR TEMPERATURES AND MEAN DAILY WATER TEMPERATURE OF SERPENTINE LAKE AT DIFFERENT DEPTHS .....	51
FIGURE 4-4 SIMULATED AND MEASURED WATER TEMPERATURES IN SERPENTINE LAKE AT 1, 2, 3, 4, 5, 6, AND 7 M BELOW THE WATER SURFACE (OR ICE WATER INTERFACE).....	52
FIGURE 4-5 COMPARISON BETWEEN SIMULATED AND MEASURED WATER TEMPERATURE DOWNSTREAM OF THE TROUSERS LAKE .....	53
FIGURE 4-6 COMPARISON BETWEEN SIMULATED AND MEASURED WATER TEMPERATURE DOWNSTREAM OF THE LONG LAKE .....	53
FIGURE 4-7 SIMULATED INTERANNUAL FLOW COMPARED TO OBSERVED FLOW AT RILEY BROOK HYDROMETRIC FROM 1997 TO 2020 .....	54
FIGURE 4-8 SIMULATED WATER TEMPERATURE OF THE TOBIQUE RIVER AT LOCATION CP 562 (SEE FIGURE 4-2) BASED ON THE CEQUEAU MODEL. ....	55
FIGURE 4-9 COMPARISON OF PREDICTED NUMBER OF DAYS FOR INCUBATION TO HATCHING FOR A) ATLANTIC SALMON AND B) BROOK TROUT DOWNSTREAM OF SERPENTINE LAKE. MEDIAN VALUES ARE THE RED LINES, MEANS ARE BLACK CIRCLES, OUTLIERS ARE THE RED PLUS SIGNS, STANDARD DEVIATION IN PARENTHESES, AND THE LOWER AND UPPER LIMITS OF BOXES ARE THE 25TH AND 75TH PERCENTILES. WHISKERS ARE VALUES BETWEEN THE FIRST AND 3RD QUANTILES. ....	57

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1 CARACTÉRISTIQUES DES LACS DU BASSIN VERSANT TOBIQUE.....	8
TABLEAU 2-2 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES HISTORIQUES DU BASSIN VERSANT DE TOBIQUE.....	8
TABLEAU 2-3 PARAMÈTRES DE TEMPÉRATURE POUR LE SAUMON ATLANTIQUE ET L'OMBLE DE FONTAINE .....	16
TABLEAU 3-1 LA DATE D'ECLOSION PREVUE POUR LE SAUMON ET LA TRUITE AUX DIFFÉRENTES STATIONS .....	23
TABLEAU 3-2 LA RMSE CALCULÉE À PARTIR DU MODÈLE STATISTIQUE CALIBRAGE EN ÉTÉ 2020.....	25
TABLEAU 3-3 PARAMÈTRES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU PERTINENTS SUR LE PLAN ÉCOLOGIQUE POUR LE SAUMON ATLANTIQUE ET L'OMBLE DE FONTAINE (1997-2020).....	29
TABLE 4-1 CHARACTERISTICS OF THE TOBIQUE RIVER WATERSHED.....	46
TABLE 4-2 THE MAXIMUM RECORDED WATER TEMPERATURE AND THE RMSE FOR VARYING DEPTHS IN SERPENTINE LAKE (1997-2020). .....	50
TABLE 4-3 CALIBRATION AND VALIDATION RESULTS FOR THE HYDROLOGICAL AND THERMAL MODELS. KGE IS THE KLING-GUPTA EFFICIENCY CRITERION (EQ. 12). NSE IS THE NASH-SUTCLIFFE CRITERION (EQ. 11). RMSE IS THE ROOT MEAN SQUARE ERROR (EQ. 13) .....	54
TABLE 4-4 WATER TEMPERATURE METRICS FOR THE TOBIQUE RIVER AT CP562 FOR THE REFERENCE PERIOD (2002-2011).....	56



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

C3S	Copernicus Climate Change Service
CE	Carré entier (whole square)
CP	Carré partiel (Partial square)
DD	Degree days
Df	Degrees of freedom
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ESGF	Earth System Grid Federation
GCM (MCG)	Global climate model (modèle climatique mondial)
GEONB	New Brunswick Government geographic information
GIS	Geographic information system
GLM	(Generalized linear model) Modèle linéaire généralisé
IQR	Interquartile range
KGE	Kling-Gupta efficiency
NO. days	Number of days
NOD	Number of days
NSE	Nash–Sutcliffe efficiency
P	p-value
RBM	River Basin Model
RCP	Representative Concentration Pathway
RMSE	Root mean square error
USACE	U.S. Army Corps of Engineers



# 1 INTRODUCTION

---

## 1.1 La température de l'eau

La température de l'eau est reconnue comme une des variables parmi les plus cruciales dans les rivières (Dugdale et al. 2017a; Hannah et Garner 2015), influençant les réactions chimiques (Durance et Ormerod 2009), les propriétés biotiques et abiotiques (Webb et al. 2008), la qualité de l'eau (Bloomfield et al. 2006; Finlay 2003) et plusieurs caractéristiques physiques de l'eau, comme l'oxygène dissous (Gualtieri et al. 2002) et la quantité de matière organique dissoute (Matsumoto et al. 2007). En outre, la température de l'eau est une variable essentielle pour l'existence et le développement des organismes aquatiques (Zhu et Piotrowski 2020). Les changements de température de l'eau peuvent entraîner des variations du taux de croissance et de nombreuses espèces aquatiques (Elliott et Hurley 1997; Quinn et al. 1994).

Les modifications de la température de l'eau peuvent être dues à plusieurs raisons. De nombreuses causes naturelles, ainsi que des activités anthropiques telles que la déforestation, et la présence de barrages, peuvent affecter la température de l'eau (Poole et Berman 2001). L'urbanisation modifie également les températures saisonnières et annuelles de l'eau dans des bassins ciblés (Nelson et Palmer 2007; Webb et al. 2008).

## 1.2 Barrages

Les barrages sont des structures très répandues dans les cours d'eau canadiens. Ils sont l'une des structures importantes qui sont identifiées comme une cause de changement des régimes thermiques et hydrauliques des cours d'eau (Zaidel et al. 2021). Les barrages sont construits à diverses fins, comme la production d'électricité, l'approvisionnement en eau agricole et potable et le contrôle des inondations (Zhang et al. 2022).

### 1.2.1 Grands barrages

Des études récentes ont mis en évidence que les impacts des barrages sont liés à leur taille. Cela signifie que les grands barrages, dont la hauteur est supérieure à 15 m (Chen et al. 2021), pourraient modifier considérablement le régime thermique dans les cours d'eau en aval. D'après ces études, et selon la profondeur à laquelle l'eau est relâchée, la température à la sortie des grands barrages en été est plus froide que celle d'un cours d'eau naturel, et inversement, l'eau libérée par les barrages en hiver est plus chaude que dans les cours d'eau naturels (Armitage

1984; Preece et Jones 2002). Les grands barrages peuvent réduire la variabilité de la température à différentes échelles temporelles (Steel et Lange 2007).

### **1.2.2 Petits barrages**

Maheu et al. (2016) ont étudié les petits et moyens barrages de l'est du Canada. Ils ont conclu que deux barrages de stockage, l'un sur la rivière St-Jean (QC) et l'autre sur la rivière Fourchue, qui ont des réservoirs peu profonds, ont un effet constant sur la température moyenne quotidienne de l'eau des rivières. Ils ont indiqué que les petits barrages de stockage ont un impact sur le réchauffement tout au long de l'année. L'ampleur du réchauffement varie selon les saisons. Pendant la saison estivale, la température mensuelle en aval des barrages étudiés a augmenté de 1,4°C à 3,9°C comparativement à celle du même cours d'eau en amont du réservoir. En hiver, la température de l'eau a augmenté dans une fourchette de 1°C à 2,1°C.

### **1.3 Le changement climatique**

Récemment, le changement climatique a été identifié comme l'un des facteurs clé dans la variabilité de la température de l'eau. Le réchauffement climatique a de nombreux impacts tangibles sur l'environnement, comme la modification du débit des cours d'eau en hiver (Berthot et al. 2021; Justice et al. 2017), réduction possible de la végétation riveraine (Poole et Berman 2001) et augmentation de la température de l'eau.

L'augmentation des températures de l'eau affectera les espèces aquatiques vulnérables (Domisch et al. 2011) et les organismes préférant les basses températures. Par conséquent, de nombreux habitats aquatiques thermiques pourraient diminuer rapidement en réponse au changement climatique (Daufresne et al. 2007).

Le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 utilisé dans la présente étude indique une possible augmentation du réchauffement climatique (Riahi et al. 2011) à une moyenne de 8,5 W m<sup>-2</sup> sur la Terre résultant d'une forte concentration de carbone dans l'atmosphère. Bien que certains scientifiques pensent que le RCP8.5 risque de surestimer l'utilisation des combustibles fossiles d'ici la fin du siècle, beaucoup pensent qu'il ne faut pas se concentrer uniquement sur la fin du siècle. Le changement climatique devrait également être étudié pour des périodes plus courtes. Comme Schwalm et al. (2020) ont indiqué, le RCP8.5, en supposant une utilisation élevée de combustibles fossiles pour un horizon court, montre une évaluation proche de la réalité et peut anticiper la température moyenne mondiale (Schwalm et al. 2020).

## **1.4 Espèces indigènes ciblées dans cette étude.**

### **1.4.1 Le saumon atlantique**

Le saumon atlantique (*Salmo salar*) est distribué du nord de la Russie au nord du Portugal à l'Est de l'océan Atlantique et de la région de l'Ungava (nord du Québec) à la rivière Connecticut aux États-Unis du côté nord-américain (MacCrimmon et Gots 1979). Le saumon atlantique a toujours été culturellement et économiquement important pour les Premières nations et est considéré comme une ressource alimentaire (Justice et al. 2017). Le saumon atlantique présente une tolérance à la température variable selon les stades de vie. Le saumon atlantique passe les trois premières années de sa vie en eau douce froide. Ils migrent ensuite vers la mer pendant une certaine période. Après une période de 2 à 7 ans, ils retournent en eau douce pour se reproduire. Cette durée varie selon le régime thermique (Scott et Scott 1988). Selon (Jonsson et Jonsson 2009), le saumon peut survivre à  $> 0^{\circ}\text{C}$ , et la température maximale (température létale) est de  $27,8^{\circ}\text{C}$ . Bien que le seuil de température générant un stress pour le saumon atlantique juvénile en eau douce soit de  $23^{\circ}\text{C}$  (Calado et al. 2021), il ne peut supporter des températures supérieures à  $23^{\circ}\text{C}$  que pendant une très courte période. La préférence thermique du saumon atlantique en eau de mer est de  $4$  à  $12^{\circ}\text{C}$ . Le faible taux d'oxygène dissous associé aux températures élevées est l'une des principales raisons de leur faible tolérance aux eaux chaudes.

### **1.4.2 L'omble de fontaine**

L'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) comme d'autres espèces anadromes, migre occasionnellement de l'eau douce à la mer. C'est une espèce d'eau froide et que l'on retrouve partout au Canada (Cunjak et Power 1986; O'sullivan et al. 2021). L'omble de fontaine a tendance à passer le printemps dans l'eau de mer, et en juillet, il retourne dans les cours d'eau clairs. La température préférée de l'omble de fontaine est de  $5 - 20^{\circ}\text{C}$ , et la température optimale pour sa croissance est de  $11-16^{\circ}\text{C}$  (Robinson 2008). La température seuil de stress pour l'omble de fontaine est de  $20^{\circ}\text{C}$  (Scott et Scott 1988), et la température létale est de  $25^{\circ}\text{C}$ . Entre  $20^{\circ}\text{C}$  et  $25^{\circ}\text{C}$ , cette espèce subit une diminution de ses performances physiologiques, et seuls les poissons adultes peuvent supporter  $25^{\circ}\text{C}$  pendant une courte période (Morrison et al. 2020; Wilbur et al. 2020).

## **1.5 Catégories de modèles de température de l'eau**

Différents modèles ont été développés pour estimer la température de l'eau des rivières. Ils ont été classés en deux grandes catégories : les modèles déterministes, basés sur une représentation mathématique explicite des processus physiques et les modèles stochastiques/statistiques qui sont le plus souvent basés sur la corrélation (linéaire ou non linéaire) entre un nombre limité des prédicteurs et la température de l'eau.

### **1.5.1 Les modèles statistiques**

Les modèles statistiques et stochastiques nécessitent généralement la température de l'air comme prédicteur (variable exogène) (Mitchell 1999) et la température moyenne de l'eau pour la calibration et la validation (Caissie et al. 1998). Les modèles stochastiques sont en fait un cas spécial des modèles statistiques pour lesquels le terme d'erreur (ou résidus) est formellement modélisé. Un avantage significatif des méthodes statistiques est que, dans la plupart des cas, ils nécessitent peu de données d'entrée (Ahmadi-Nedushan et al. 2007). Par conséquent, les modèles statistiques pourraient être applicables dans de nombreuses études de la température de l'eau pour lesquels il y a relativement peu de données hydrologiques et météorologiques qui seraient nécessaires au calcul du bilan thermique.

Caissie et al. (2001) ont évalué la température de l'eau du ruisseau Catamaran au Nouveau-Brunswick en utilisant différentes approches statistiques. D'abord, ils ont séparé la température de l'eau en deux composantes : les composantes annuelles et les résidus à court terme. Ils ont utilisé deux méthodes pour calculer les composantes annuelles : la série de Fourier et une fonction sinusoïdale optimisée. Les résidus, c'est-à-dire les valeurs qui demeurent après la soustraction de la composante annuelle, ont été modélisés à l'aide de la régression linéaire multiple, du processus de Markov du second ordre et du modèle de Box-Jenkins. Les résultats ont démontré que tous les modèles étaient capables de prédire la température de l'eau avec un degré de précision raisonnable (les racines de l'erreur quadratique moyennes, ou RMSE de la méthode de régression linéaire, de Markov et de Box-Jenkins étaient de 0,87°C, 0,96°C et 0,89°C, respectivement).

### **1.5.2 Modèles déterministes**

Les modèles déterministes sont basés sur la physique (représentée plus ou moins conceptuellement selon les modèles) qui évaluent une variable clé, telle que la température de l'eau, en utilisant des données météorologiques et physiographiques, qui varient dans le temps

et l'espace (Joss et Resele 1987; Wang et al. 2021). Les modèles déterministes utilisés pour prédire la température des cours d'eau sont basés sur le calcul du bilan thermique et énergétique. Ils évaluent les échanges thermiques entre le cours d'eau et son environnement au moyen de variables d'entrée telles que le rayonnement solaire, les précipitations, la vitesse du vent, l'évaporation, la température de l'air et la condensation (Chen et al. 1998; Sinokrot et Stefan 1993; Zhu et Piotrowski 2020). Les modèles déterministes hydrologiques, quant à eux, utilisent les précipitations comme intrant pour calculer un bilan hydrologique. Les modèles déterministes peuvent être considérés comme des modèles exigeants en raison du nombre et de la diversité des entrées nécessaires à leur fonctionnement (Caissie et al. 2005).

Les modèles distribués forment une grille ou un ensemble de polygones définis par l'utilisateur sur l'ensemble du bassin versant et simulent les variables d'intérêt pour chaque tuile ou polygone (Dugdale et al. 2017b). Pour les modèles semi-distribués les variables d'entrées et les paramètres du modèle sont divisés en deux groupes : le premier regroupe les variables et paramètres globaux (c'est-à-dire une seule valeur pour l'ensemble du bassin versant). Le second type de variables ou paramètres est discrétisé à travers le bassin avec une résolution qui peut varier en fonction de la taille du bassin versant (Dugdale et al. 2017b).

## **1.6 Région d'étude, problématique et objectif**

Le bassin versant de la rivière Tobique, situé au Nouveau-Brunswick, Canada, abrite des populations de saumon atlantique et d'omble de fontaine. La retenue de la rivière Tobique par des barrages hydroélectriques tels que Serpentine, Long, Trousers et Sisson a possiblement affecté l'habitat thermique de ces espèces aquatiques. Des études antérieures sur cette rivière ont indiqué des changements dans le débit et la température de la rivière Tobique (Dubos et St-Hilaire 2019). Dubos et St-Hilaire (2019) ont noté que les températures de l'eau mesurées en aval des réservoirs augmentaient en hiver, et qu'on observait moins de fluctuations de la température quotidienne de l'eau que dans la rivière non régulée.

Afin de développer des méthodes pour réduire l'effet négatif des barrages sur les régimes thermiques actuels et futurs de la rivière Tobique, il faut d'abord comprendre et modéliser le régime thermique dans les réservoirs et en aval des barrages. L'objectif de ce projet, qui est brièvement présenté dans ce chapitre, est de modéliser les températures actuelles et futures de la rivière Tobique et d'étudier l'effet des barrages hydroélectriques sur les altérations de la température de l'eau.

Les objectifs spécifiques de ce projet sont :

- 1- Mettre en œuvre un modèle déterministe hydrologique et thermique de la rivière Tobique.
- 2- Caractériser le régime de température de la rivière Tobique en se basant sur des métriques écologiques (seuils de tolérance thermiques pour deux espèces de salmonidés) à travers le modèle.
- 3- Étudier l'effet des réservoirs, en particulier celui de relâches d'eau provenant de différentes profondeurs sur la température de la rivière Tobique.
- 4- Évaluer l'effet du réchauffement climatique futur sur la température de la rivière Tobique.

## **1.7 Structure du mémoire**

Ce mémoire de maîtrise se divise en quatre chapitres :

- Le chapitre 1 présente une introduction générale avec le contexte afin de mieux comprendre le cadre de ce projet de recherche. Ensuite, une revue de la littérature des travaux antérieurs sur le thème de la modélisation de la température de l'eau est présentée.
- Le chapitre 2 décrit les approches utilisées dans le projet. Il présente également les analyses effectuées pour évaluer la température estivale de la rivière Tobique et la probabilité d'exposer le saumon atlantique et l'omble de fontaine au stress thermique. De plus, ce chapitre traite de l'impact du changement climatique sur le bassin versant de la Tobique et de ses effets écologiques sur les poissons.
- Le chapitre 3 décrit les résultats obtenus pour estimer la condition d'hivernage du saumon atlantique et de l'omble de fontaine sous l'influence des barrages, la température estivale de la rivière Tobique et l'impact des changements climatiques sur la température de la rivière Tobique et le temps d'éclosion des poissons.
- Le chapitre 4 présente le travail de recherche sous la forme d'un article rédigé en anglais qui présente la simulation de la température de l'eau de la rivière Tobique à l'aide du modèle CEQUEAU couplé à un modèle statistique, et fournit des métriques écologiques (liées à la température de l'eau) nécessaires à l'éclosion du saumon atlantique et de l'omble de fontaine.

## **2 MATÉRIEL ET MÉTHODES**

---

### **2.1 STRUCTURE DU CHAPITRE**

Le chapitre comporte trois composantes :

- La première section consiste à simuler les températures historiques de l'eau de la rivière Tobique (N.-B., Canada) en mettant l'accent sur les possibles impacts des barrages sur la température hivernale dans le but d'estimer de possibles modifications dans le temps d'incubation et d'éclosion des œufs de saumon atlantique et d'omble de fontaine, qui se produisent en hiver et au printemps. Un couplage de modèles déterministe et statistique a été utilisé pour simuler les températures historiques de l'eau de la rivière Tobique, en considérant l'impact des quatre réservoirs construits sur la rivière.
- La deuxième composante vise à étudier les conditions thermiques auxquelles le saumon atlantique et de l'omble de fontaine sont exposés durant dans la rivière Tobique en été. Les dépassements de seuil de tolérance thermique connus seront analysés. De plus, l'effet des barrages sur la température maximale des tronçons de la rivière en aval des barrages sont étudiés.
- Dans la dernière section de ce chapitre, les modèles sont utilisés afin de générer un scénario thermique futur basé sur la voie de concentration représentative la plus pessimiste (RCP8.5) afin de fournir une perspective sur l'évolution possible du régime thermique de la rivière Tobique et, par la suite, l'impact plausible de la variation thermique sur le saumon atlantique et l'omble de fontaine jusqu'à l'année 2100.

### **2.2 Méthode**

#### **2.2.1 Zone d'étude**

La rivière Tobique draine un bassin versant d'une superficie de 4637 km<sup>2</sup> situé dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick, au Canada (Figure 4-2). La rivière Tobique prend sa source dans le lac Nictau, dans le parc provincial du mont Carleton, et s'écoule sur 148 km jusqu'à sa confluence avec le fleuve Saint-Jean, aux coordonnées géographiques (46.766, -67.700). La rivière est endiguée à certains endroits, notamment par quatre réservoirs faisant partie d'un complexe hydroélectrique : la branche Sisson, le lac Long, le lac Serpentine et le lac Trousers (Tableau 2-1). Le débit a été mesuré à la station de Riley Brook (47.173, -67.211) et le module est de 52,63 m<sup>3</sup>/s. Les données météorologiques historiques du bassin versant de Tobique sont présentées

dans le Tableau 2-2. Les algorithmes et les formules des modèles et des méthodes sont présentés en détail dans le chapitre 3. Les sections suivantes fournissent un résumé des modèles et des techniques utilisés.

**Tableau 2-1 Caractéristiques des lacs du bassin versant Tobique**

Lac	Niveau maximum du réservoir (m)	Superficie (km <sup>2</sup> )
Serpentine	38,71	5,25
Long	34,13	10,09
Trousers	36,27	11,29

**Tableau 2-2 Données météorologiques historiques du bassin versant de Tobique**

Données historiques	
Précipitations historiques moyennes	3,25 (mm)
Vitesse moyenne historique du vent	10,92 (km h <sup>-1</sup> )
Température moyenne historique	3,83 (°C)
Nébulosité moyenne historique	0,68
Rayonnement solaire moyen historique	12,03 (MJ m <sup>-2</sup> )

### 2.2.2 Le modèle CEQUEAU

CEQUEAU est un modèle hydrologique et de température de l'eau semi-distribué capable de considérer l'impact des lacs et des barrages sur les rivières (Dubos et St-Hilaire 2019). Un outil analytique a été ajouté à la dernière version du modèle CEQUEAU (Dugdale et al. 2017b) qui permet aux utilisateurs de récupérer les données physiographiques et la direction du drainage à l'aide d'un système d'information géographique (ArcGIS) et d'une boîte à outils développée dans Matlab (MathWorks 2015).

Comme le montre la Figure 2-1, ce modèle conceptuel décompose le bassin versant en unités égales appelées carrés entiers (CE). La division du carré entier est effectuée sur la base de la superficie du bassin versant et de sa physiographie. Une deuxième décomposition est effectuée



sur le bassin versant pour déterminer la direction du drainage de chaque CE vers son CE en aval. C'est-à-dire que les CE sont subdivisés en zones plus petites appelées carrés partiels (CP). Par conséquent, en utilisant les CE et CP et la fonction de routage dans le modèle, le mouvement amont-aval de l'eau peut être déterminé, et le volume des flux d'eau de chaque CE vers l'autre CP est calculé.

Le mouvement vertical de l'eau est calculé en utilisant la fonction de production pour simuler le bilan hydrologique du bassin versant à chaque CE (Figure 4-1). La fonction de production représente la zone saturée en eau du sol, la zone non saturée et les lacs/marais. Elle calcule le mouvement vertical de toute eau de source atmosphérique, solide ou liquide, à travers ces zones jusqu'à ce qu'elle atteigne la rivière dans un laps de temps donné. Afin de calculer la température de l'eau pour chaque CP, il est nécessaire de simuler d'abord le débit car il est requis pour être utilisé comme entrée dans le module thermique de CEQUEAU.

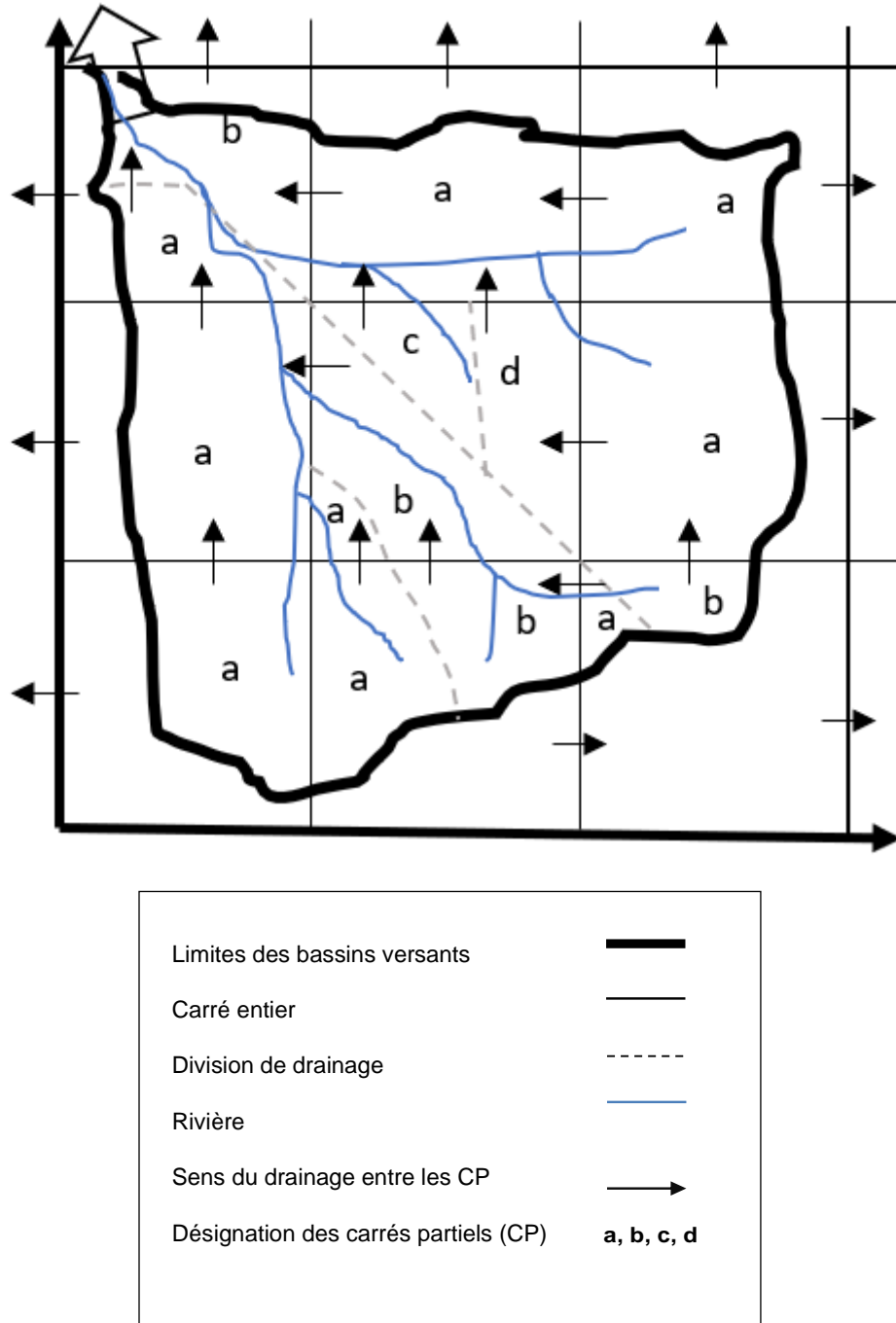


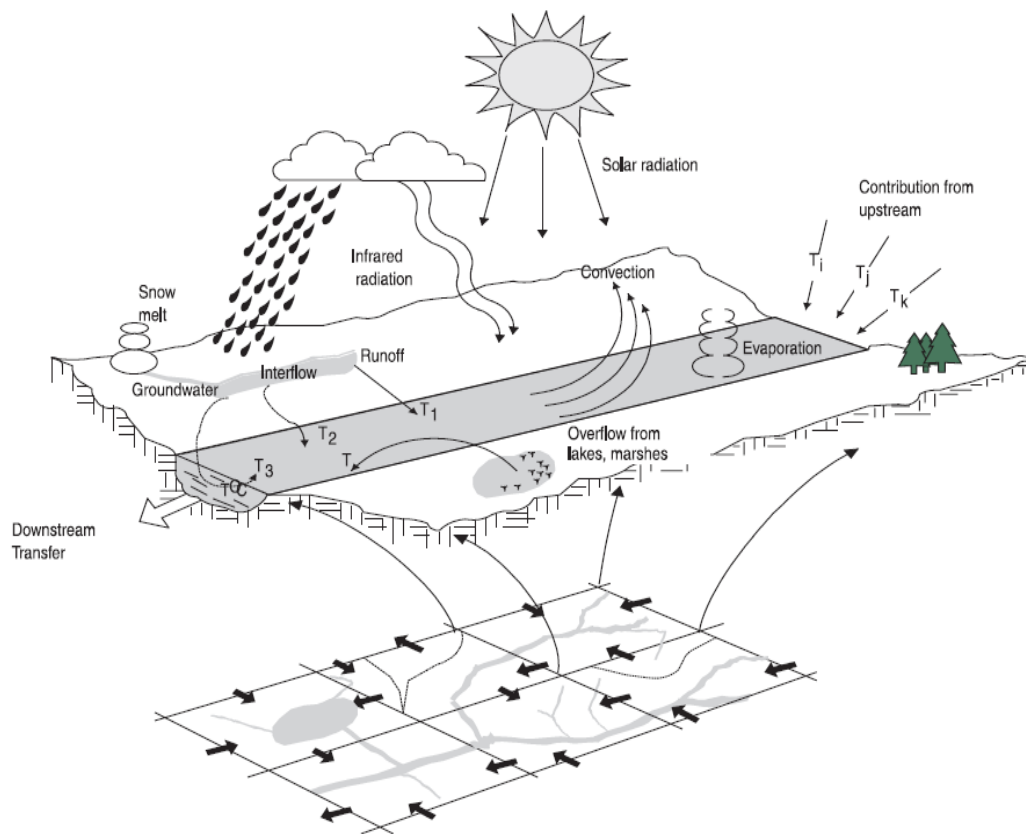
Figure 2-1 Discrétisation du bassin versant de CEQUEAU (Morin et Paquet 2007)

### 2.2.3 Module thermique

Les données météorologiques utilisées en entrée des simulations thermiques du modèle CEQUEAU, combinées avec le débit simulé obtenu à partir de la simulation hydrologique, permettent au module thermique de CEQUEAU de simuler la température quotidienne de l'eau.

En plus des données de précipitations et température de l'air requises pour le module hydrologique, ce module nécessite des variables météorologiques additionnelles (vitesse du vent, rayonnement solaire, nébulosité, pression atmosphérique) (Moriasi et al. 2007). Les réanalyses ERA5 ont été utilisées (Hersbach et al. 2020). Le volume d'eau sur lequel le bilan thermique est calculé provient des débits simulés par le module hydrologique.

Les principaux éléments du calcul de la température de l'eau sont représentés sur la Figure 2-2. La température de l'eau dans chaque carré partiel est simulée en calculant le rapport de l'enthalpie sur le volume d'eau et la capacité thermique de l'eau. Les équations correspondantes sont présentées au chapitre 4, Équation (2).



**Figure 2-2 Représentation des termes du bilan thermique inclus dans le modèle de température d'eau CEQUEAU (Morin et Couillard 1990)**

En outre, l'énergie associée aux apports advectifs locaux tels que le ruissellement de surface, l'écoulement intermédiaire, les eaux souterraines et le débordement des lacs et des marais est prise en compte dans le calcul du modèle CEQUEAU (Morin et Couillard 1990). Les calculs détaillés faits par le modèle thermique sont décrits dans Morin et Couillard (1990).

## 2.3 Disposition de la grille du modèle

Le bassin versant de la Tobique est divisé en 548 CE d'une superficie de 9 km<sup>2</sup>, puis, sur la base de la direction du drainage de chaque CE, les CE sont divisés en CP, pour un total de 1157 CP sur le bassin versant. La Figure 2-3 représente la division du bassin versant de Tobique en CE.

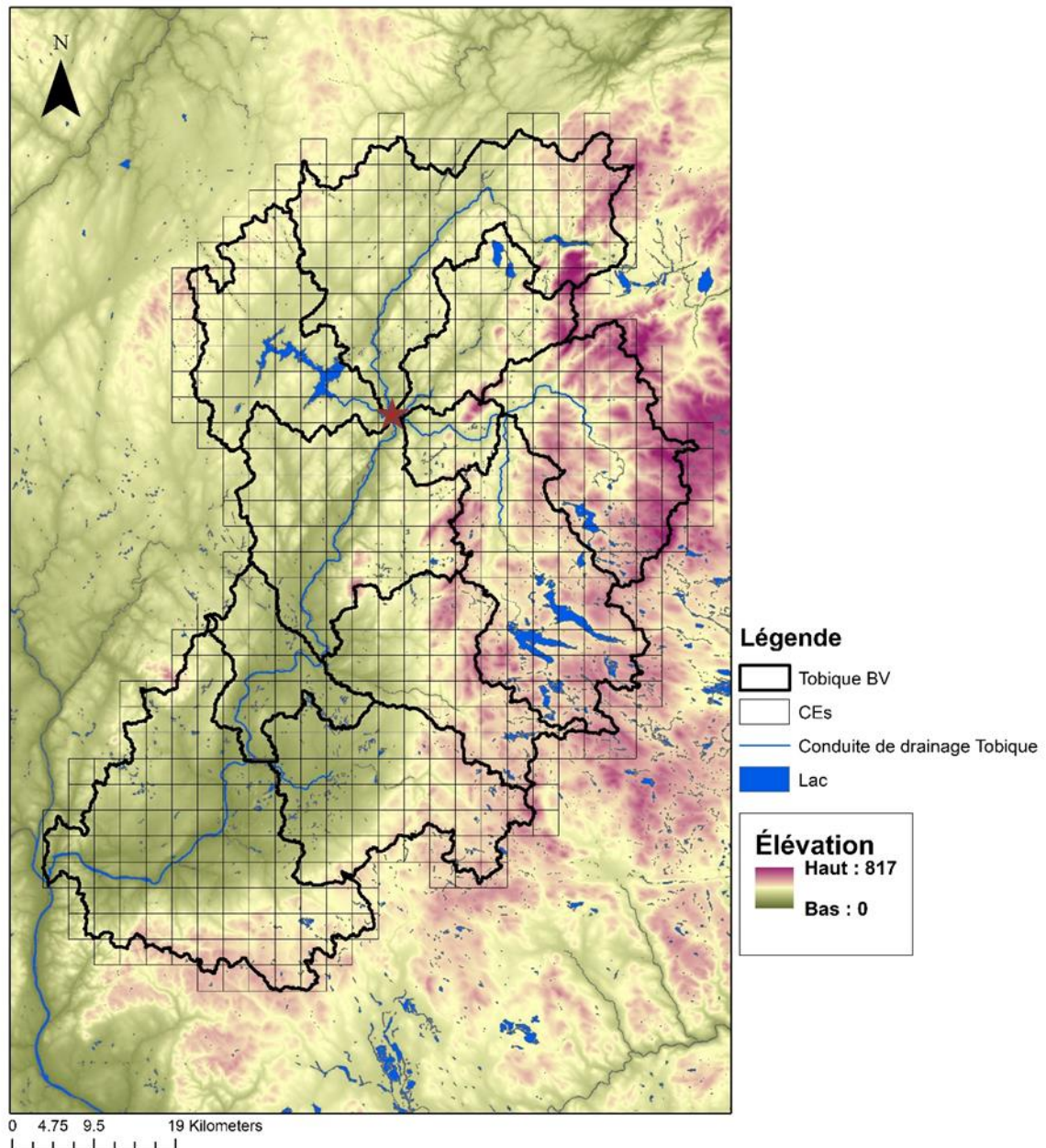


Figure 2-3 Segmentation du bassin versant de Tobique en carrés entiers. Le dégradé de couleurs représente l'élévation du bassin versant. L'étoile rouge est le point où le module thermique CEQUEAU a été calibré par rapport aux données observées. Cet emplacement sera mentionné avec le nom CP562.

## **2.4 Acquisition de données**

Les données météorologiques et les données physiographiques sont les deux principaux types de données nécessaires au calcul du bilan hydrologique par CEQUEAU.

### **2.4.1 Données physiographiques :**

La couverture forestière, la couverture terrestre, le pourcentage de superficie couverte par le plan d'eau, le pourcentage de superficie couverte par les marais et les lacs, l'altitude et la pente (Charbonneau et al. 1977) sont requis par le modèle et doivent être spécifiés comme pour chaque carré entier (Morin et Couillard 1990).

Des données météorologiques sont requises pour chaque carré partiel. Cependant, ces données ne sont disponibles qu'à un nombre limité de stations à l'intérieur ou à proximité du bassin versant. Par conséquent, dans ce projet, des réanalyses ERA5, avec une résolution de 31 km sur 31 km ont été utilisées. Par la suite, ces données ont été réinterpolées sur la grille du module hydrologique de la Figure 2-3 par une approche de voisins les plus proches.

## **2.5 Calibration du modèle**

### **2.5.1 Calibration hydrologique**

L'étalonnage du module hydrologique a été effectué sur 25 paramètres hydrologiques en comparant les débits simulés avec les valeurs observées à la station de Riley Brook, qui est en opération depuis 1964 (Dubos et St-Hilaire 2019). Les mesures de performance utilisées sont l'efficacité de Kling-Gupta (KGE) (Santos et al. 2018b) et le coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) (McCuen et al. 2006). Le calage du modèle hydrologique a été effectué en deux étapes: tout d'abord, une calibration manuelle a été effectuée. Chaque paramètre influent a été ajusté manuellement pour identifier la valeur qui maximisait les mesures de performance, (KGE et NSE) sans toutefois mener à des aberrations physiques (par exemple, tarir la nappe phréatique). Deuxièmement, le calibrage automatique est effectué à l'aide d'un algorithme génétique (Pattern Search) (Audet et Dennis Jr 2002) en utilisant comme point de départ les meilleures valeurs du calage manuel et en définissant une limite réaliste supérieure et inférieure de chaque paramètre.

### **2.5.2 Calibration thermique**

Le débit obtenu à partir de la simulation hydrologique est utilisé comme intrant dans le module thermique de CEQUEAU. Le calage de ce module thermique a été réalisé en deux étapes, tout

comme celui du module hydrologique. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été utilisée comme fonction objectif pour mesurer la performance du module thermique (Dugdale et al. 2018). Dix paramètres ont été ajustés, dont un pour pondérer chacun des flux de surface (rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde, rayonnement infrarouge, convection, évaporation), la température des eaux souterraines et la température de fonte de la neige. Le calibrage thermique a été mené sur une période de dix ans (2002-2012) sur le CE situé à la confluence de quatre réservoirs.

### **2.5.3 Modèle statistique**

Puisque les températures de l'eau relâchée des réservoirs servent de conditions limites en amont pour le modèle CEQUEAU et puisque ces températures dans les réservoirs n'ont pas été mesurées pour de longues périodes dans le passé, un modèle a aussi été développé pour simuler ces températures. Il s'agit d'un modèle statistique relativement simple, qui utilise la température de l'air en intrant. D'après les températures observées du lac Serpentine (Figure 3-1), le lac est thermiquement stratifié. De plus, le barrage Serpentine est un barrage exutoire à plusieurs niveaux. Par conséquent, il était nécessaire d'acquérir les séries chronologiques de la température de l'eau à différentes profondeurs du lac Serpentine afin de calibrer un modèle thermique. Le modèle CEQUEAU n'ayant pas la capacité de modéliser en deux ou trois dimensions. En conséquence, un modèle statistique développé par Caissie et al. (1998) a été utilisé pour simuler les séries chronologiques (1997-2020) à différentes profondeurs du lac Serpentine (1 m - 7 m) et immédiatement en aval des lacs Sisson, Trousers et Long. Ce modèle statistique ajuste d'abord une fonction sinusoïdale à la composante saisonnière des séries chronologiques de température de l'eau et de l'air (Caissie et al. 1998). Les résidus, c'est-à-dire la différence entre les mesures et la fonction sinusoïdale ajustée, sont ensuite simulés à l'aide d'un modèle autorégressif avec variable explicative exogène détaillé dans le chapitre deux. Pour améliorer les résultats d'étalonnage de la température estivale pour des profondeurs de 4 et 5 m, des valeurs supplémentaires décalées (quatre et cinq jours) ont été utilisées. Les sorties obtenues par l'approche statistique ont été imposées comme intrants (conditions limites en amont) dans le modèle CEQUEAU pour simuler la température de l'eau de la rivière Tobique en tant que rivière régulée.

## **2.6 Évaluation de l'impact des barrages sur le temps d'éclosion du saumon atlantique et de la truite de ruisseau**

Après avoir simulé la température de l'eau de la rivière Tobique, l'effet des barrages sur la température de l'eau et, par la suite, sur la période d'incubation du saumon atlantique et de l'omble de fontaine a été étudié. Cette partie de l'étude a été réalisée en utilisant les degrés-jours comme indicateur. Selon Brännäs (1988), les degrés-jours depuis le pic de frai jusqu'au moment de l'éclosion pour le saumon atlantique sont en moyenne de 470 degrés-jours (Brännäs 1988). Pour l'omble de fontaine, Curry et al. (2002) ont indiqué qu'il faut 400 degrés-jours. On a donc calculé les degrés-jours pour les deux espèces pour chaque année de 1997 à 2020 à divers endroits de la rivière, comme immédiatement en aval des réservoirs, au confluent de quatre réservoirs et loin des barrages (ce qui représente une rivière non régulée) afin d'estimer la date à laquelle l'éclosion risque de se produire. Ensuite, le test de Kruskal-Wallis a été effectué pour évaluer si les distributions des degrés-jours à différents scénarios de prélèvement d'eau en aval du lac Serpentine sont significativement différentes (Curry et al. 2002). Le test de Kruskal-Wallis est un test statistique non paramétrique qui évalue les différences entre trois groupes indépendants ou plus (McKnight et Najab 2010). L'exécution du test de Kruskal-Wallis permet de déterminer dans quelle mesure la modification de l'élévation de la sortie du lac Serpentine pourrait modifier la date d'éclosion.

## **2.7 Calibration et simulation pour l'été**

Pour simuler la température de l'eau du lac Serpentine en été à l'aide du modèle statistique, la calibration du modèle a été effectuée par rapport aux données observées en été 2020 à différentes profondeurs du réservoir. Ensuite, la température de l'eau à différentes profondeurs du lac Serpentine a été simulée de 1997 à 2020 et utilisée comme condition limite en aval du réservoir pour simuler la température de l'eau à l'aide du modèle CEQUEAU.

Pour simuler la température de l'eau en aval des lacs Trousers, Long et Sisson en été, le modèle primaire calibré a été employé et utilisé comme conditions limites dans le modèle CEQUEAU pour simuler la température de l'eau de la rivière Tobique.

Des séries chronologiques historiques de température de l'eau (1997-2020) de la rivière Tobique ont été simulées à l'aide du modèle CEQUEAU. La température moyenne journalière de l'eau dans tout le bassin versant a été reproduite. La température simulée a été utilisée pour calculer les paramètres de température relatifs à l'omble de fontaine et au saumon atlantique.

Les caractéristiques de la température de la rivière ont été calculées pour la CP562, située à la confluence de quatre réservoirs (Sisson, Long, Trousers et Serpentine). En outre, les caractéristiques de la température de l'eau en aval des réservoirs ont été étudiées afin d'examiner l'impact des réservoirs sur la température estivale.

## 2.8 Caractéristiques de température pour l'été

Une série d'indices de température a été calculée pour déterminer le régime thermique de la rivière Tobique dans le contexte d'habitat thermique des deux espèces ciblées et ses changements dans le temps (Tableau 2-3). L'une des métriques est la température optimale de l'eau en eau douce, qui se situe entre 8°C et 19°C pour le saumon atlantique et entre 11 et 16°C pour l'omble de fontaine (Dugdale et al. 2018). En considérant le seuil de température de l'espèce, le stress thermique cumulatif a été évalué en utilisant les degrés jours.

**Tableau 2-3 Paramètres de température pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine**

Nombre annuel de jours dans la plage de température annuelle	Plage de température optimale pour la croissance et l'alimentation.  Le saumon atlantique se situe entre 8°C et 19°C  Croissance optimale de l'omble de fontaine entre 11°C et 16°C
Stress thermique du saumon atlantique et de l'omble de fontaine	Saumon atlantique 23°C  Omble de fontaine 20°C
Nombre annuel de jours au-dessus de la température critique pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine	

Les futures données météorologiques nécessaires pour effectuer les projections de température de l'eau via le modèle CEQUEAU ont été extraites de la base de données provenant du projet : "Expérience coordonnée de mise à l'échelle du climat régional (CORDEX)", qui est disponible via les plates-formes en ligne de la Fédération du réseau du système terrestre (ESGF) (Jacob et al. 2020). Parmi les sorties de modèles disponibles, celui qui a été sélectionné était le CanRCM4, un modèle climatique régional canadien qui réduit dynamiquement les informations climatiques mondiales générées par le modèle canadien du système terrestre de deuxième génération



(CanESM2). CanESM2 est un modèle climatique mondial (MCG) développé par le Centre canadien pour la modélisation et l'analyse du climat (CCCma) d'Environnement et Changement Climatique Canada. Parmi les scénarios de changement climatique disponibles, le RCP8.5 a été sélectionné.

Avant de simuler la température de l'eau de la rivière Tobique, les conditions limites ont été générées par l'approche statistique décrite dans le chapitre 3. Pour reproduire la première condition limite (température de l'eau en aval des quatre barrages), la température quotidienne moyenne de l'air de 2036-2062 et 2063-2100 récupérée dans le scénario de changement climatique RCP8.5 a été utilisée comme variable indépendante dans l'approche statistique. Les coefficients de la fonction sinusoïdale et de la composante autorégressive obtenus à partir de l'étalonnage du modèle statistique des séries chronologiques historiques ont été utilisés pour calculer les températures en aval des lacs Long, Sisson et Trousers, ainsi que les températures des différentes profondeurs du lac Serpentine. Le modèle statistique a ensuite été couplé au modèle déterministe CEQUEAU pour estimer la température de l'eau en aval du barrage.

Afin de générer des séries chronologiques météorologiques quotidiennes telles que ; couverture nuageuse, précipitations, pression de vapeur, vitesse du vent, température maximale/minimale de l'air et rayonnement solaire hors du modèle choisi, le processus de correction du biais a été effectué à l'aide de la méthode de cartographie des quantiles. En conséquence, 12 points de grille ont été obtenus sur le bassin versant de Tobique, fournissant des données météorologiques quotidiennes de 1950 à 2100. Enfin, les séries chronologiques météorologiques corrigées (débiaisées) ont été interpolées sur l'ensemble du bassin versant. Les projections ont été faites pour les périodes 2036-2063 et 2063-2100.

En ce qui concerne le débit de la rivière Tobique comme deuxième condition limite, étant donné qu'il n'y avait pas d'information disponible sur la gestion du débit des barrages en exploitation future dans le bassin de la Tobique, les enregistrements historiques du débit sortant des barrages ont été utilisés pour représenter leurs futurs débits journaliers. Ceci a été réalisé en calculant les valeurs Q5, Q25, Q50, Q75 et Q95 et la date julienne du débit de pointe maximal pour chacun des débits sortants des quatre barrages en exploitation pour toute la période disponible, qui est 1997-2020 (Dugdale et al. 2018; Palmer et al. 2009a). Tous ces paramètres ont été calculés séparément pour chaque année de la période. Ensuite, tous ces paramètres ont été calculés pour chaque année de la période. Chaque année a été classée en fonction de la similarité de sa métrique avec les métriques de la période entière. Ensuite, un classement a été attribué à chaque année en fonction de la similarité de sa métrique annuelle et des métriques calculées pour toute

la période. L'année avec le classement combiné le plus élevé (plus similaire à l'ensemble des paramètres de la période) a été choisie pour représenter le débit sortant des installations hydroélectriques et considérée comme la condition limite de débit en aval. La simulation a été réalisée pour la phase de prévision.

Après la simulation et l'extraction des paramètres de température par le modèle CEQUEAU et les résultats satisfaisants obtenus par le modèle, la variation de la série chronologique de la température de l'eau dans le bassin a été simulée.

Les séries chronologiques météorologiques quotidiennes telles que la vitesse du vent, la température maximale et minimale de l'air, le rayonnement des ondes courtes et des ondes longues, la couverture nuageuse et la pression de vapeur réelle requises dans le modèle CEQUEAU ont été reproduites en utilisant les scénarios de changement climatique sélectionnés et utilisées pour prévoir la température de l'eau.

## **3 RESULTATS**

---

### **3.1 STRUCTURE DU CHAPITRE**

Le chapitre contient trois sections principales :

La première section documente les résultats de la calibration hydrologique et thermique du modèle CEQUEAU, la calibration du modèle statistique par rapport à la température de l'eau à différentes profondeurs du lac Serpentine et la température de surface des lacs Long et Trousters.

La deuxième section traite des résultats de l'impact des températures estivales sur le saumon atlantique et l'omble de fontaine. Ce chapitre étudie la période pendant laquelle la température de l'eau dépasse les seuils de température de stress pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine.

Le troisième chapitre documente les résultats de la projection de la température de l'eau dans le cadre du scénario de changement climatique RCP8.5. Selon les résultats, la température de l'eau augmentera de 4°C d'ici 2100. Ce phénomène peut affecter négativement le temps d'éclosion des œufs de saumon atlantique et d'omble de fontaine.

Les résultats de cette étude sont exposés dans les paragraphes suivants. Dans un premier temps, nous présentons le développement du modèle statistique, qui produit les conditions thermiques limitées au modèle déterministe. Puis nous résumons celles du modèle de CEQUEAU. Par la suite, nous présentons le résultat des degrés-jours.

Ensuite, nous présentons les résultats de l'étalonnage statistique par rapport à la température estivale. Sur cette base, nous offrons les résultats de la température de l'eau de la rivière Tobique et son impact potentiel sur les poissons en aval du barrage serpentine et à la confluence de quatre réservoirs. Enfin, nous expliquons les résultats de l'analyse du scénario de changement climatique.

### **3.2 Comparaison du débit de l'hypolimnion, de la thermocline et de l'épilimnion**

La Figure 3-1 représente la température de l'eau mesurée dans le lac Serpentine de septembre 2020 à janvier 2021. Comme le montre la Figure 3-1, en hiver, une stratification s'inverse se produit dans le lac Serpentine. En septembre et en août, la zone de transition de la thermocline se forme à une profondeur de 3 m (Ottosson et Abrahamsson 1998). En conséquence, la densité et la température de cette zone changent par rapport à la zone supérieure appelée Épilimnion. Par exemple, en août, lorsque la profondeur passe de 3 à 4 m, la température de l'eau diminue

de 22°C à 14°C. Selon le graphique, en octobre, la thermocline se déplace de 1 m vers le bas, et la couche de transition se forme à une profondeur de 4 m. En novembre 2020, l'épilimnion s'étend jusqu'à 6 m. Enfin, durant l'hiver 2020,2021, les thermographes ont mesuré des températures uniformes dans tout le lac.

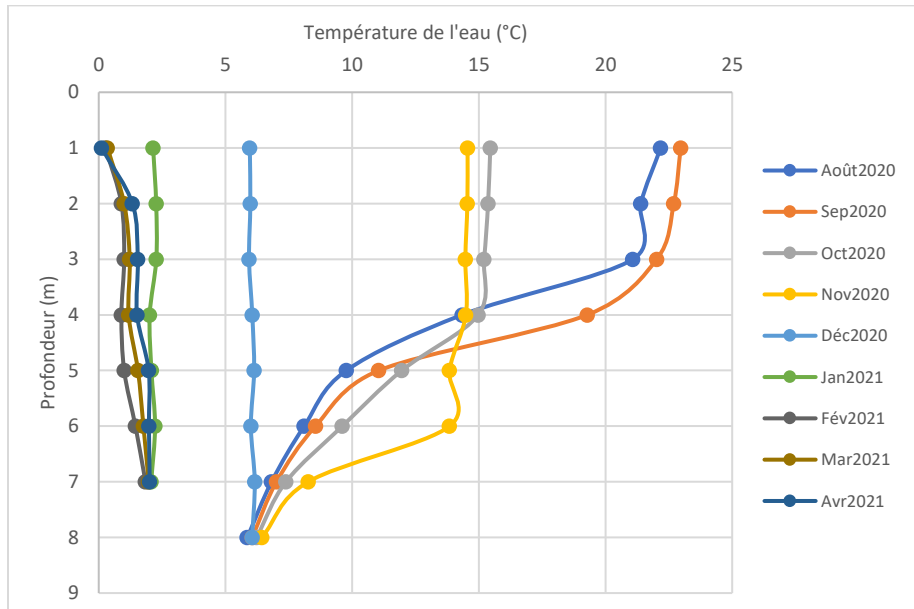


Figure 3-1 Profils de températures observées du lac Serpentine

### 3.3 Modèle statistique

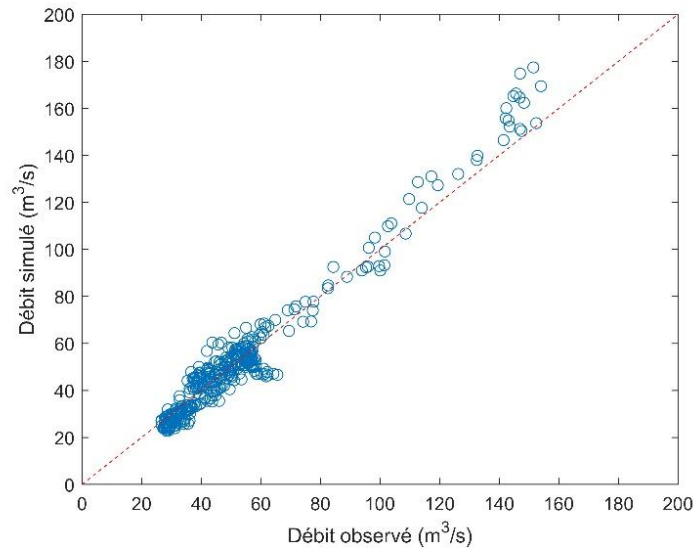
Les résultats de la calibration statistique indiquent un ajustement relativement bon entre les températures observées et simulées. La période de calibration s'étendait du 2020-06-19 au 2021-04-29. Les valeurs RMSE à 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 m du lac Serpentine sont respectivement, 1,05, 1,06, 1,72, 1,3, 1,41, 1,33, 1,48°C.

Les valeurs RMSE pour le lac Trousers et le lac Long étaient de 1,73 et 1,39°C respectivement. Les résultats ont ensuite été imposés en intrants comme conditions limites en amont dans le modèle CEQUEAU pour simuler l'impact des barrages sur la température de l'eau en aval.

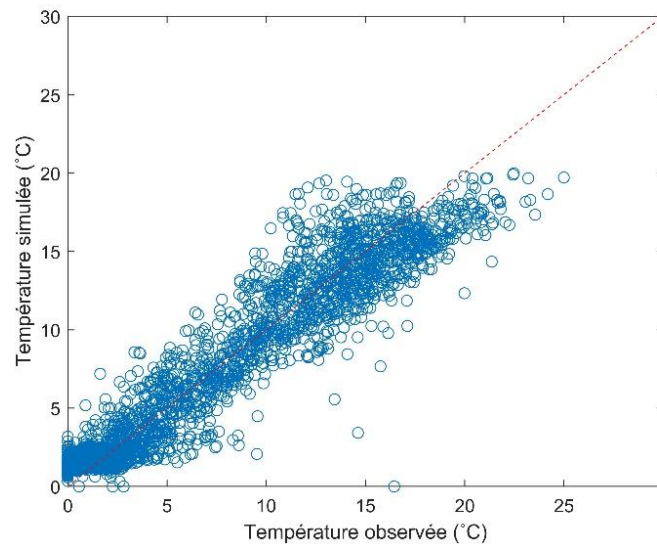
### 3.4 Calibration hydrologique et thermique

Le calage hydrologique a été réalisé de 1997 à 2013 ; le KGE calculé était de 0,85, et le coefficient de NSE était de 0,75. Les résultats démontrent la performance acceptable du modèle dans la simulation du débit. La Figure 3-2a compare le débit interannuel simulé et observé à la station Riley Brook de 1997 à 2020. Le graphique montre une corrélation positive généralement étroite entre le débit simulé et observé. Le calage du module thermique a été réalisé en utilisant le débit

simulé par le module hydrologique comme l'une des entrées du module thermique. La RMSE obtenue à partir du calibrage automatique était de 1,73°C pour la période de 2002 à 2007. La comparaison de la température simulée et de la température observée illustrée à la Figure 3-2b indique que le module de température CEQUEAU est capable de générer la température de l'eau avec un Degré de précision.



(a)



(b)

Figure 3-2 Résultats du modèle CEQUEAU pour la rivière Tobique au CE 281, a) débit. b) température de l'eau

### 3.5 Degrés-jours

Les degrés-jours pour le saumon atlantique (avec comme date initiale, celle du pic de frai au 1<sup>er</sup> novembre) (Heggberget 1988) ont été additionnés jusqu'à ce que la valeur atteigne 470 degrés-jours. Les dates auxquelles ce chiffre est atteint n'ont montré aucune différence significative en aval (> 3 km des réservoirs), et les changements dans la profondeur des relâches d'eau sortant du lac Serpentine ne provoquent pas de changement notable à > 3 km plus en aval. Cependant, jusqu'à 1,5-2,5 km en aval, le changement de température est plus tangible. Par conséquent, le stade d'éclosion du saumon atlantique se produit plus tôt dans les tronçons immédiatement en aval du barrage que dans la rivière non régulée. Pour l'omble de fontaine, les degrés-jours ont été comptés à partir du 15 octobre (pic de frai) jusqu'à 400 degrés-jours et les mêmes conclusions que pour le saumon atlantique ont été obtenues. Le Tableau 3-1 montre les dates d'éclosion moyennes prévues pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine dans un rayon de 3 km du lac Serpentine et immédiatement en aval des lacs Long et Trousers.

Tableau 3-1 La date d'éclosion prévue pour le saumon et la truite aux différentes stations

Localisation	Profondeur (m)	Date moyenne d'éclosion du saumon atlantique de 1997 à 2020	Date moyenne d'éclosion de l'omble de fontaine de 1997 à 2020
Lac serpentine	1	10 mai	23 avril
Lac serpentine	2	10 mai	23 avril
Lac serpentine	3	10 mai	23 avril
Lac serpentine	4	10 mai	23 avril
Lac serpentine	5	8 mai	23 avril
Lac serpentine	6	7 mai	21 avril
Lac serpentine	7	7 mai	21 avril
Lac Trousers	Surface (immédiatement en aval)	11 avril	21 mars
Lac Long	Surface (immédiatement en aval)	10 avril	21 mars

### 3.6 Résultats de la simulation de température estivale

#### 3.6.1 Simulation de modèles statistiques

Les résultats obtenus à partir de l'étalonnage statistique démontrent un accord relativement bon entre la température de l'eau mesurée et simulée en été à différentes profondeurs du lac Serpentine (Figure 3-3). Cependant, en dessous de 3 m, le graphique de la température simulée est devenu plus lisse et est moins capable d'illustrer la variabilité de la température tout au long de la période.

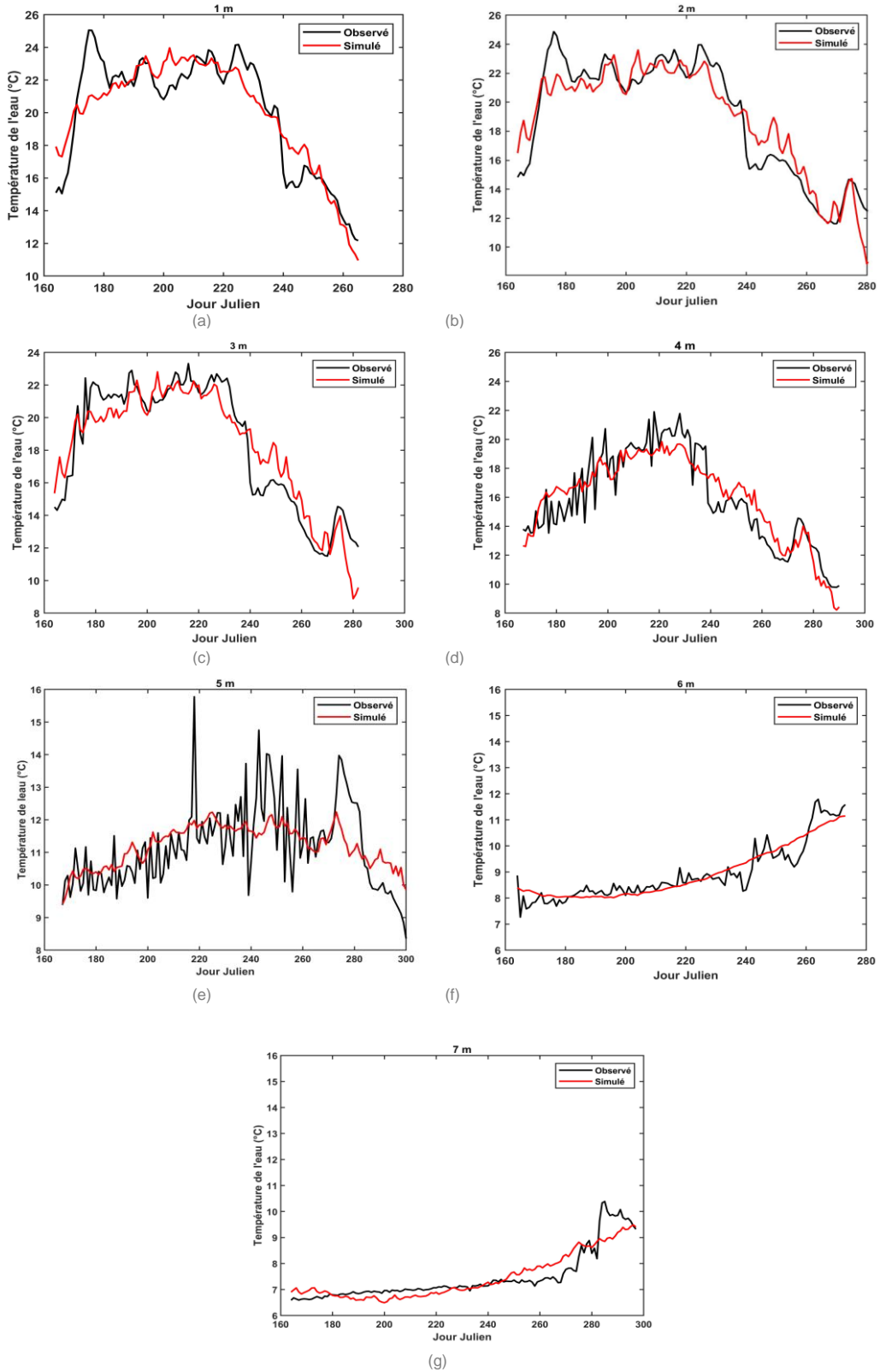


Figure 3-3 Températures de l'eau simulées et mesurées dans le lac Serpentine à 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 m sous la surface de l'eau en été 2020



Selon le profil de température (Figure 3-1), la couche de thermocline se forme à 3 m de profondeur, et un changement de température tangible se produit en dessous de ce niveau. Par conséquent, ce phénomène affecte la corrélation entre les températures de l'eau et de l'air et, par la suite, la température de l'eau simulée. La valeur RMSE a été calculée pour chaque profondeur et est présentée dans le Tableau 3-2.

**Tableau 3-2 La RMSE calculée à partir du modèle statistique Calibrage en été 2020**

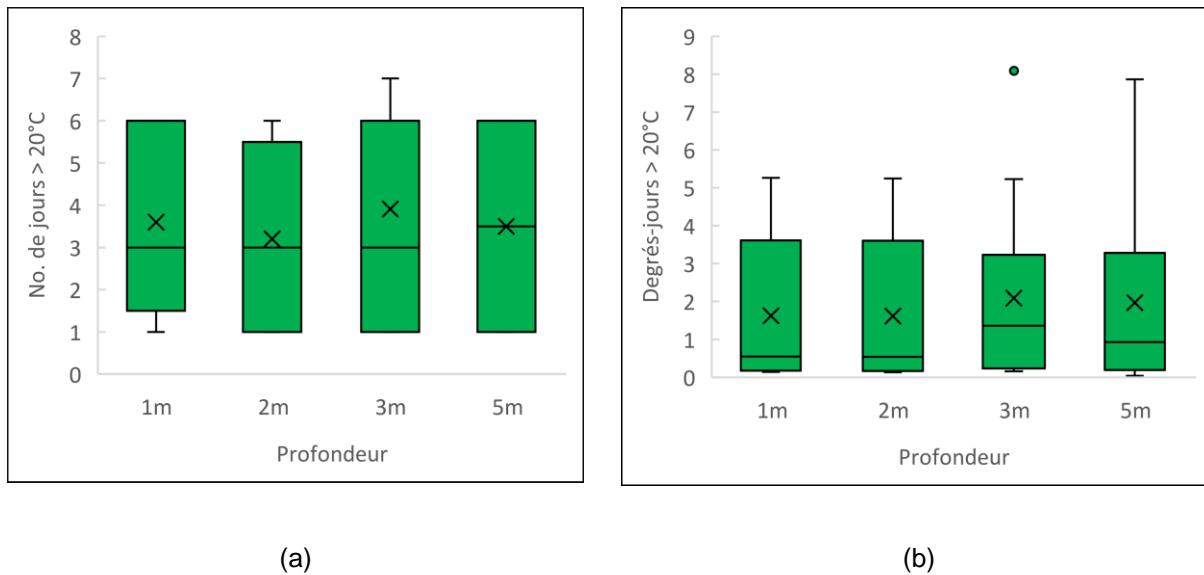
<b>Localisation</b>	<b>Profondeur (m)</b>	<b>Température maximale de l'eau (°C)</b>	<b>RMSE (°C)</b>
<b>Lac serpentine</b>	1	25,01	1,49
<b>Lac serpentine</b>	2	24,90	1,49
<b>Lac serpentine</b>	3	23,32	1,41
<b>Lac serpentine</b>	4	21,90	1,38
<b>Lac serpentine</b>	5	15,78	1,01
<b>Lac serpentine</b>	6	11,79	0,41
<b>Lac serpentine</b>	7	10,35	0,42
<b>Lac Long</b>	Surface (immédiatement en aval)	23,79	1,73
<b>Lac Trousers</b>	Surface (immédiatement en aval)	23,62	1,39

### **3.7 Simulation thermique - le modèle CEQUEAU**

#### **3.7.1 Caractéristiques de température en aval du lac Serpentine**

Les degrés-jours de température de l'eau supérieure à 20°C à une distance de 3 km du réservoir ont été calculés pour évaluer la possibilité de conditions de stress thermique dans les tronçons inférieurs du lac Serpentine. Il a été observé qu'il existe une différence de température en aval lorsque l'eau est relâchée de la zone hypolimnique par rapport à lorsqu'elle est relâchée de la zone épilimnique. Le nombre de jours pendant lesquels la température de l'eau a été supérieure à 20°C est indiqué dans la Figure 3-4a.

Les résultats simulés de la température de l'eau libérée des profondeurs de 1 et 2 m du lac Serpentine indiquent que des températures de l'eau supérieures à 20°C ne se sont produites que pendant cinq ans (1999, 2001, 2002, 2013 et 2015) (Figure 3-4b). La température simulée pour l'eau libérée à partir d'une profondeur de 3 m a montré que l'aval du lac Serpentine connaît des températures supérieures à 20°C plus fréquemment. Les résultats ont démontré que lorsque la décharge du lac Serpentine a lieu à partir de 7 m, une diminution de la température de l'eau se produit en aval et la température de l'eau n'atteint jamais 20°C pendant la période de simulation.

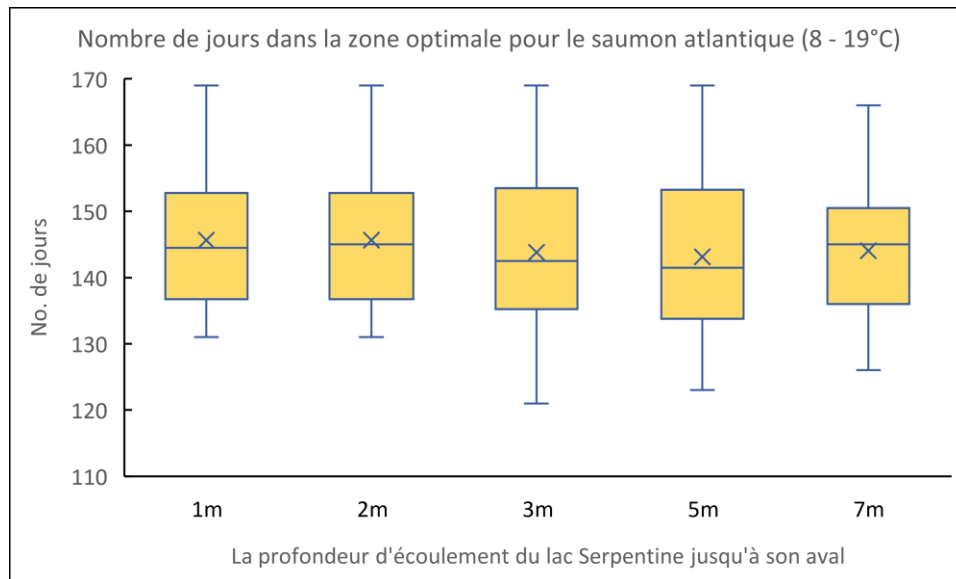


**Figure 3-4 a) Le nombre de jours où la température de l'eau dépasse 20 °C à différentes profondeurs dans le lac Serpentine. b) Degrés-jours pour les temps où la température de l'eau dépasse de 20 °C à différentes profondeurs dans le lac Serpentine.**

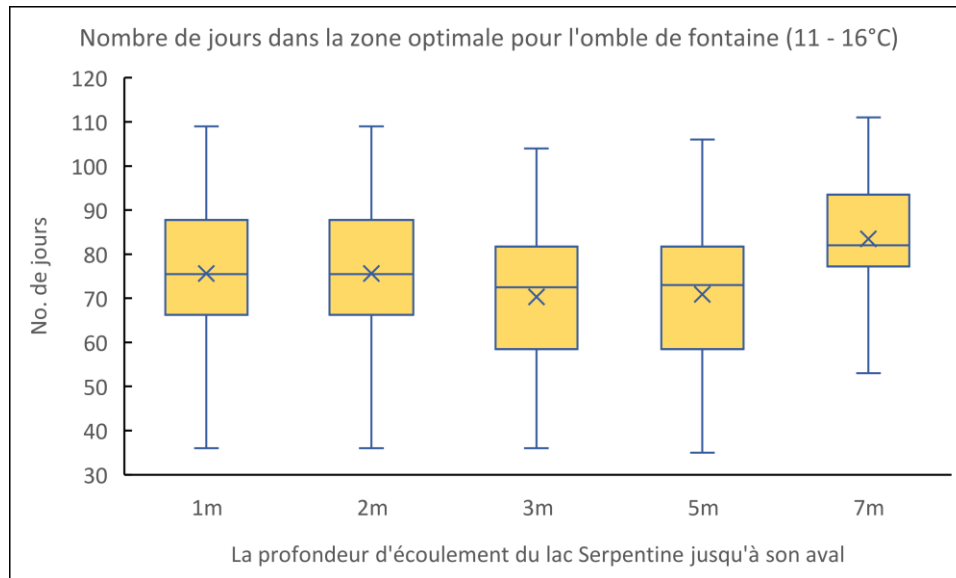
Pour étudier les conditions de la rivière pour le saumon atlantique, nous avons évalué les jours où les températures se situent dans la plage de températures optimales pour cette espèce (8-19°C). La température en aval du lac Serpentine (à 3 km) indique une augmentation du nombre de jours où la température se situe entre 8°C et 19°C à 3 m et à 5 m (Figure 3-5). La modification du nombre de jours dans la plage de température optimale peut être attribuée à la baisse rapide de la température de l'eau pendant les mois de septembre et août à une profondeur de 3 mètres. Par conséquent, la température de l'eau tombe rapidement en dessous de 20°C, ce qui lui permet d'entrer plus tôt dans la plage optimale et de rester dans cette plage pendant une période prolongée. Le résultat de 7 m est globalement conforme aux données observées et à ce que nous attendions. La température de l'eau à 7 m dans le lac Serpentine est plus stable et reste dans une plage de température plus étroite et a tendance à rester entre 0 et 8°C. Par conséquent, la

température de l'eau libérée à 7 m descend sous 8°C plus tôt que ses niveaux supérieurs (Figure 3-5).

La Figure 3-6 représente le nombre calculé de jours dans la plage optimale pour l'omble de fontaine pour différentes profondeurs du lac Serpentine. Les résultats indiquent que le nombre de jours avec des conditions optimales de température de l'eau pour l'omble de fontaine diminue à mesure que la profondeur de sortie du barrage passe de 1 m à 7 m. Cela est dû au fait que la plage de température optimale pour l'omble de fontaine est relativement plus étroite. Lorsque l'eau est évacuée des couches plus profondes, la stratification thermique fait que la température de l'eau en aval sort de la plage optimale pour l'omble de fontaine plus tôt que lorsque le barrage relâche de l'eau de surface.



**Figure 3-5** Nombre de jours pendant lesquels la température de l'eau en aval du lac Serpentine se situe dans la plage de température optimale pour le saumon atlantique (de 1997 à 2020). La valeur médiane est X, les limites inférieure et supérieure des cases sont les 25e et 75e centiles. Les moustaches montrent des valeurs aberrantes à moins de 1 IQR de la moyenne



**Figure 3-6 Nombre de jours pendant lesquels la température de l'eau en aval du lac Serpentine se situe dans la plage de température optimale pour l'omble de fontaine (de 1997 à 2020).**

### **3.8 Degrés-jours et impact écologique sur le saumon atlantique et l'omble de fontaine à la confluence des réservoirs**

Selon les résultats, la température maximale de l'eau se produit habituellement à la mi-août (Tableau 3-3). La température maximale de 21,80°C s'est produite le 5 septembre en 2001. Les températures supérieures à 20°C sont plus fréquentes en 2015 (8 jours).

En ce qui concerne le saumon atlantique, étant donné que la température moyenne maximale de l'eau dans le CP562 est de 21,80°C et que la température létale pour le saumon atlantique est de 27.8°C, le régime thermique dans le CP562 ne met pas en danger la santé du saumon atlantique pendant l'été et il ne subit pas de stress thermique.

**Tableau 3-3 Paramètres de température de l'eau pertinents sur le plan écologique pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine (1997-2020)**

Année	Degrés jours > 20 degrés-jours	Température max (°C)	No. de jours > 20°C
1998	0,59	20,46	2
1999	4,63	21,30	6
2001	1,49	21,80	4
2002	3,13	20,70	6
2005	0,16	20,10	2
2007	0,73	20,51	2
2010	1,02	20,46	3
2012	2,12	20,45	5
2013	1,06	20,51	2
2014	3,88	20,02	1
2015	0,59	20,86	8

### 3.9 Résultats du changement climatique

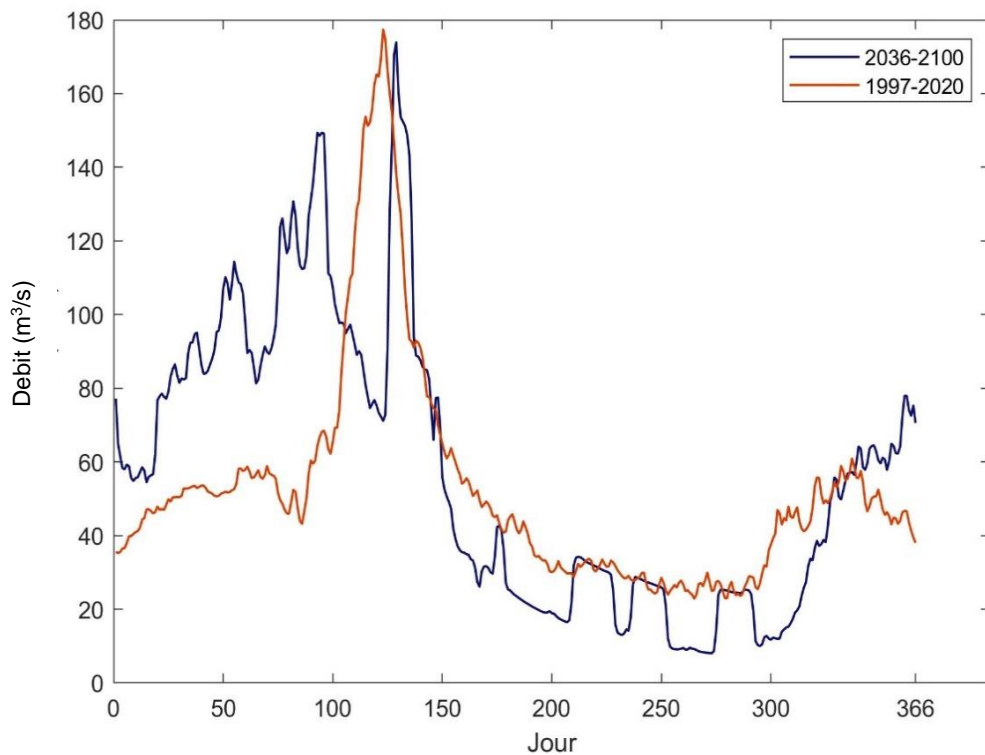
#### 3.9.1 Projection de la température des rivières

Le débit de quatre barrages a été estimé de 2036 à 2100 à l'aide de données de débit historiques. La Figure 3-7 montre le débit interannuel de la rivière Tobique à la station Riley Brook par rapport au débit historique. Il est clair que l'occurrence du pic et sa durée sont affectées par le changement climatique. Les débits hivernaux sont accrus en moyenne sur 45 jours, ce qui pourrait être dû à la fonte précoce des neiges et aux crues printanières. Les étiages estivaux diminuent en moyenne de 10 m<sup>3</sup>/s par rapport aux débits historiques.

De plus, comme une année des données historiques a été choisie pour représenter le débit sortant des aménagements hydroélectriques et servir de débit aval, les données d'exploitation du

débit (débit sur 365 jours) pour chaque année sont devenues des valeurs constantes. Par conséquent, le débit annuel moyen est influencé par cette partie du calcul.

Le modèle statistique a été exécuté dans la capacité de prévision. Étant donné que la température moyenne prévue de l'air a augmenté de 4°C (2041-2100) au fil du temps (Figure 3-8), on s'attendait à ce que la température quotidienne prévue de l'eau augmente également. La projection du changement climatique dans le cours principal et les affluents de la rivière Tobique d'ici 2100 a été réalisée à l'aide du modèle CEQUEAU. Les résultats indiquent une tendance graduelle d'augmentation de la température de l'eau. Cependant, les températures de l'eau hivernales sont moins influencées par le changement climatique que les autres saisons (Figure 3-9).



**Figure 3-7 Débit interannuel à la station du ruisseau Riley de 2036 à 2100 comparé au débit historique de 1997 à 2020**

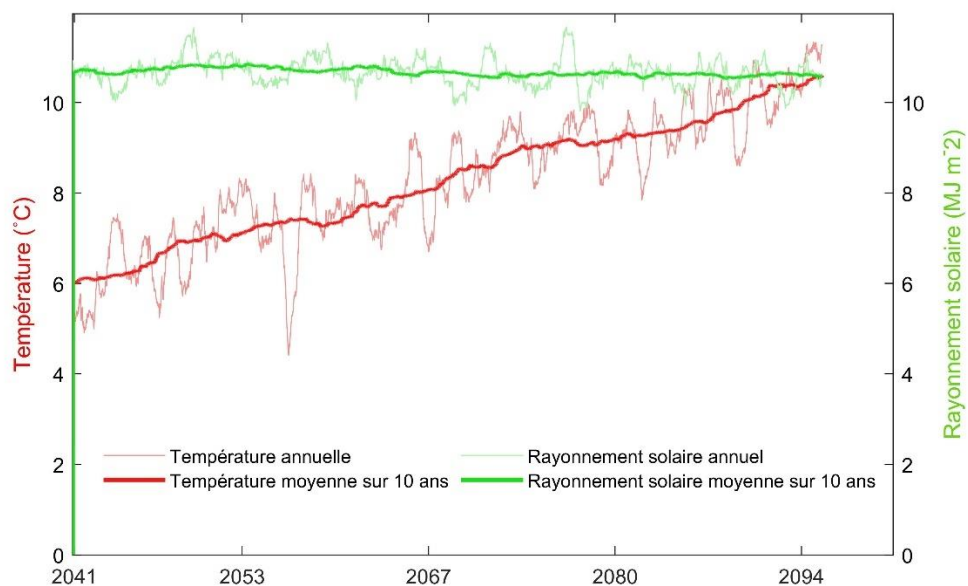


Figure 3-8 Changement de température et de rayonnement solaire selon le scénario de changement climatique RCP8.5 de 2041 à 2100

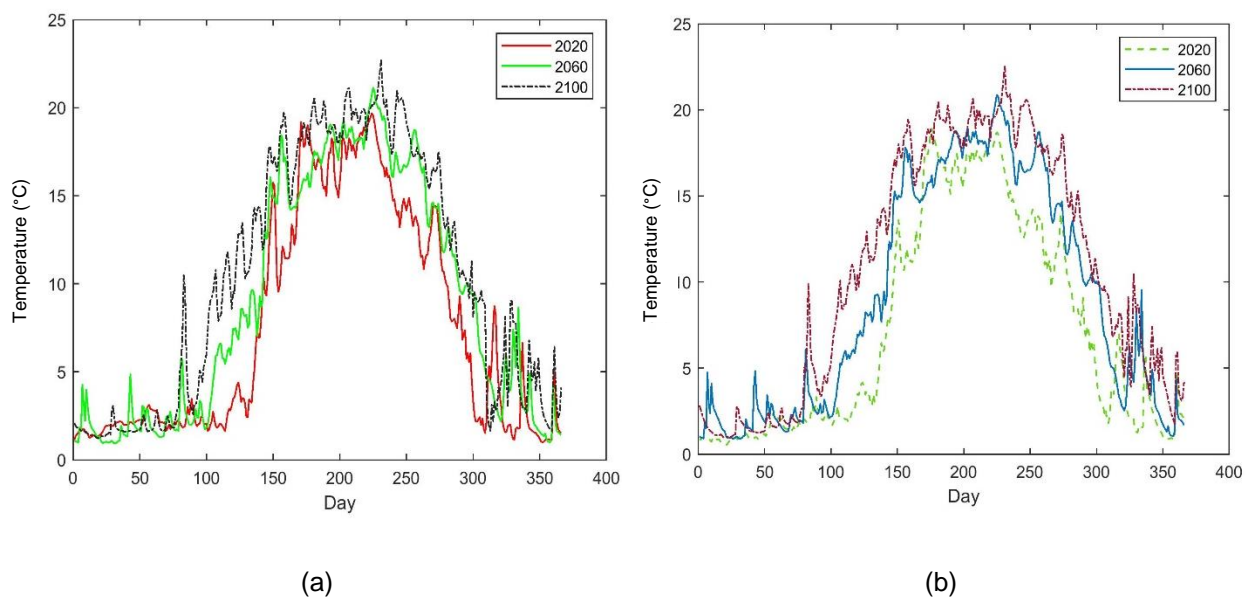
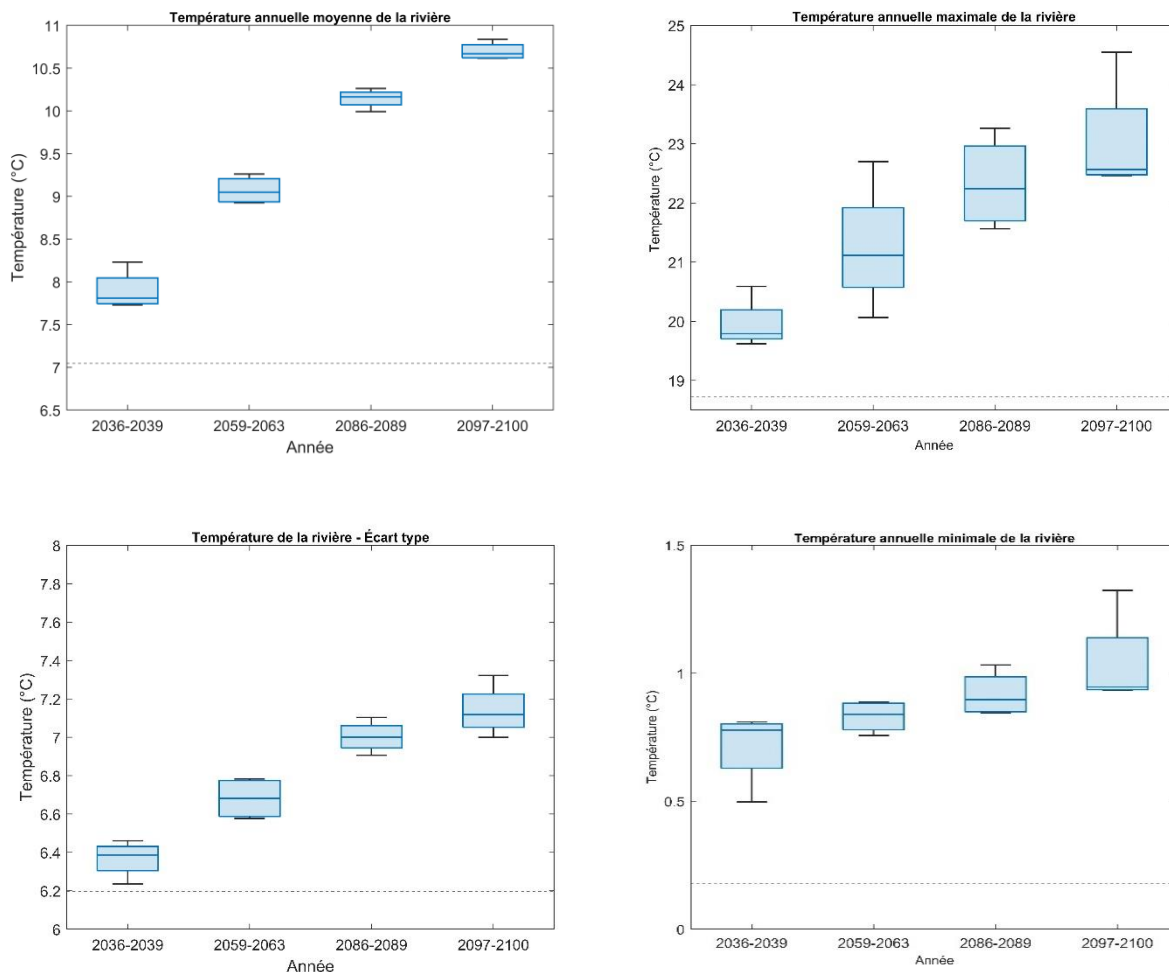


Figure 3-9 Changement projeté de la température annuelle moyenne de l'eau pour 2060 et 2100 par rapport à l'année de référence 2020 dans le cadre du scénario de changement climatique RCP8.5 a) Cour d'eau principal (cp562) b) 3km en aval du lac Serpentine

Les températures annuelles projetées de l'eau en aval du lac Serpentine (à 3 km du barrage (CP1014)) sur des périodes de 4 ans de 2036 à 2100 sont présentées à la Figure 3-10. Selon les résultats, la température annuelle moyenne de la période de référence est d'environ 7°C. Une température annuelle moyenne plus élevée est prévue pour les périodes 2036-2039, 2059-2063, 2086-2089 et 2097-2100 (8,9°C, 10,3,1°C, 10,35°C et 10,85°C respectivement) dans la rivière Tobique (CP1014), montrant une augmentation de la température d'environ 1°C pour chaque période de ~20 ans (Figure 3-9a). L'ampleur de l'augmentation de la température annuelle moyenne (4°C d'ici 2100) est généralement cohérente avec d'autres études de l'est du Canada (Jeong et al. 2013).

Les résultats des simulations CEQUEAU utilisant le scénario de changement climatique RCP8.5 comme entrée indiquent que la température annuelle maximale de la rivière Tobique augmentera d'environ 2°C d'ici 2059-2063 et d'environ 2°C supplémentaires d'ici 2098-2100 (Figure 3-10). Aussi, selon le scénario retenu, la température minimale annuelle du fleuve devrait augmenter de 0,8 d'ici 2098-2100 (Figure 3-10). L'augmentation de la température minimale est plus faible que l'augmentation de la température maximale en raison de la variation de température plus faible en hiver qu'en été. En termes d'écart type journalier, une différence moyenne de l'ordre de 0,8°C entre la période de référence et les projections 2100 est observée, montrant une variabilité de la température en croissance.





**Figure 3-10** Températures de la rivière pour les périodes futures 2036-2039 et 2059-2063. Les boîtes à moustaches montrent la gamme de rendement de variabilité par scénario de changement climatique RCP8.5. La valeur médiane est illustrée par la ligne à l'intérieur du rectangle. La valeur médiane de référence 2017-2020 est indiquée par des tirets horizontaux. Les 25e et 75e centiles sont les cases supérieures et inférieures.

### 3.9.2 Projection des degrés-jours pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine dans les principaux affluents de la rivière Tobique

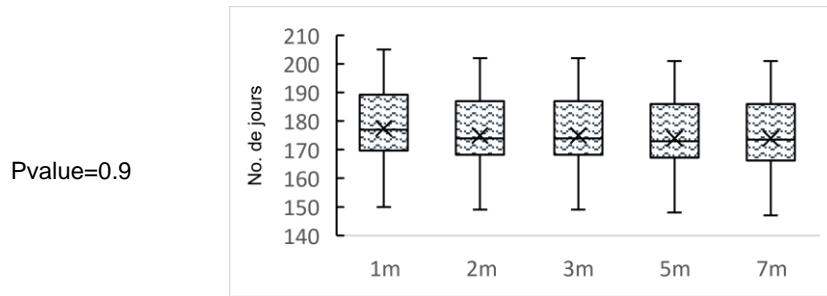
#### 3.9.2.1 En aval du lac Serpentine

La Figure 3-11 fournit le nombre estimé de jours pour que le saumon atlantique et l'omble de fontaine atteignent leurs degrés-jours d'éclosion respectifs (470 et 400 degrés-jours). Les prévisions de la température de l'eau entre 2036 et 2063 indiquent que le nombre de jours nécessaires à l'éclosion des œufs de saumon atlantique, à partir de la période de frai maximale, variera de 150 à 205 jours. Entre 2063 et 2100, la période d'incubation devrait diminuer pour

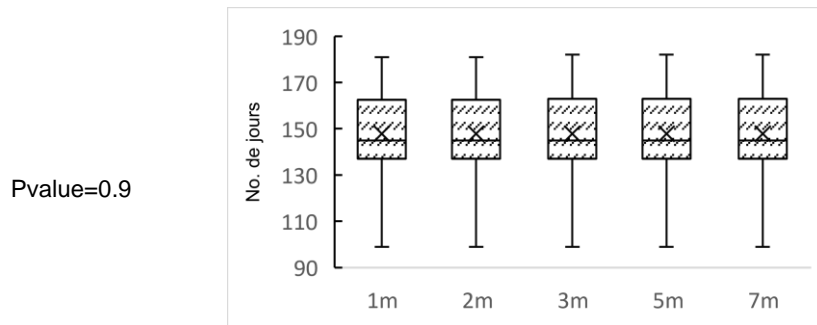
atteindre une plage de 99 à 181 jours. Cette réduction du nombre de jours suggère que les températures de l'eau pendant l'hiver et le printemps augmenteront selon le scénario de changement climatique RCP8.5 d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Par conséquent, les œufs de saumon atlantique auront besoin de moins de jours à partir de la date de frai maximale (1<sup>er</sup> novembre) pour atteindre 470 degrés-jours cumulatifs.

Les résultats des degrés-jours d'éclosion de l'omble de fontaine indiquent une diminution significative de la période d'incubation d'ici 2100. Compte tenu des résultats obtenus à partir de la simulation historique des températures, l'éclosion s'est produite après une moyenne de 191 jours de frai, tandis que sur la base du scénario de changement climatique RCP8.5, la période d'incubation moyenne de l'omble de fontaine devrait diminuer à 70 d'ici 2100, ce qui est dû à l'automne plus chaud et aux hivers moins froids.

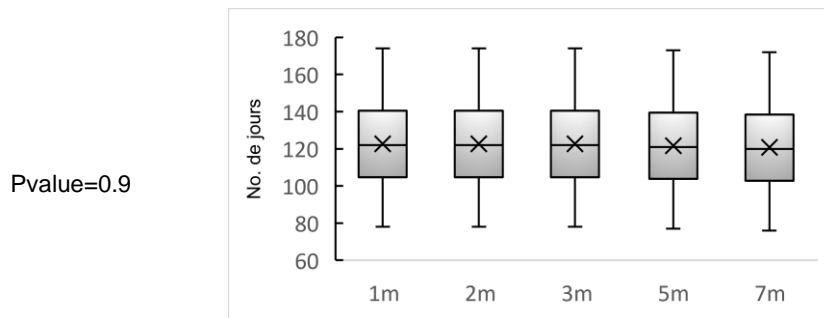
Par contre, l'évaluation des degrés-jours d'éclosion montre que la profondeur à laquelle l'eau est relâchée du réservoir Serpentine n'a pas d'effet significatif sur les degrés-jours d'éclosion du saumon atlantique au cours des deux périodes d'étude (Figure 3-11a et c). Le diagramme en boîte de la première période montre que lorsque l'eau est puisée dans les parties supérieures du lac Serpentine, la période d'incubation du saumon atlantique et de l'omble de fontaine peut être légèrement plus longue que lorsque l'eau est puisée dans la partie inférieure du lac. Cependant, selon le test de Kruskal-Wallis, la différence n'est pas statistiquement significative et tous les groupes ont la même distribution (lorsque la valeur  $P > 5\%$ , cela signifie que le test confirme l'hypothèse nulle selon laquelle tous les échantillons de données proviennent de la même distribution). On peut donc conclure que la profondeur de l'eau déversée ne modifie pas significativement le régime thermique à 3 km en aval du lac Serpentine et qu'elle n'altère donc pas la vulnérabilité des œufs et de leur habitat.



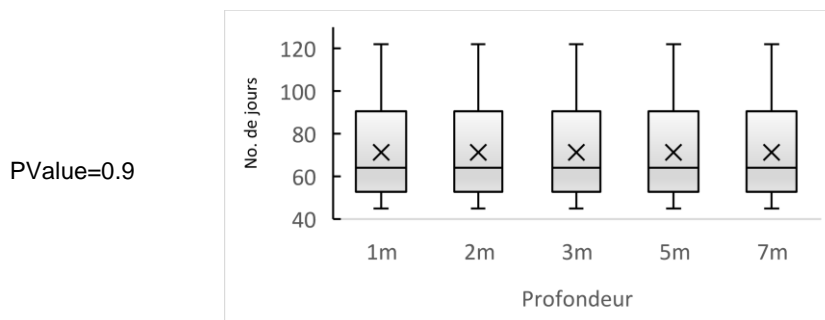
(a)



(b)



(c)



(d)

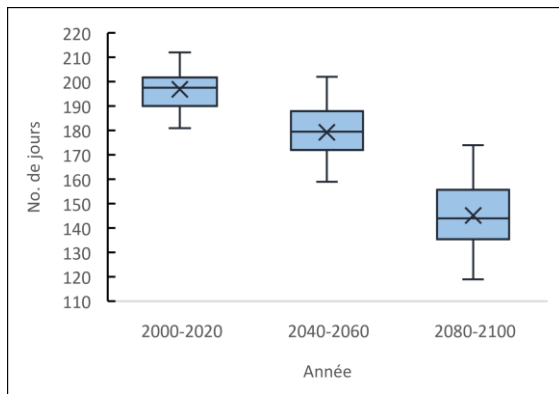
Figure 3-11 Résultats du nombre de jours requis entre la date de frai maximale et la date d'éclosion en aval du lac Serpentine pour le saumon atlantique a) pour la période 2036-2063 b) pour la période 2063-2100. Omble de fontaine : c) de 2036 à 2063 d) de 2063 à 2100 Le X dans la case représente la moyenne

### 3.9.2.2 Lac Long et Lac Trousers en aval

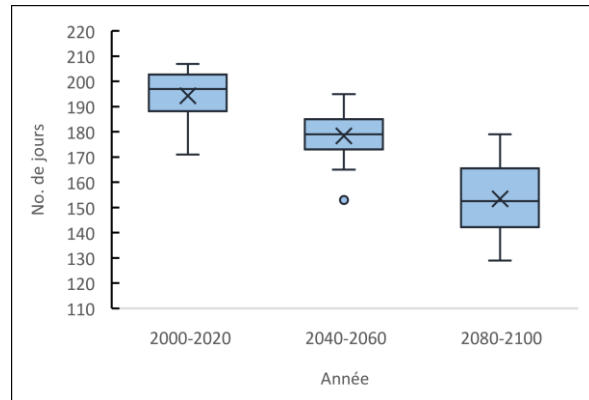
Le calcul du nombre de jours entre la date du pic de fraie et la date d'éclosion du saumon atlantique et de l'omble de fontaine en aval du lac Long et du lac Trousers (à 3 km des réservoirs) a été effectué pour trois périodes différentes de 2000 à 2100. L'objectif de cette étape était d'évaluer les variations de la température de l'eau au cours du 21ème siècle, en particulier pendant les saisons froides (Figure 3-12).

D'après les résultats, au cours des 20 premières années (2000-2020), le nombre de jours nécessaires aux œufs de saumon atlantique pour éclore s'étend de 170 à 215 jours (le nombre moyen de jours est de 195). Par conséquent, on s'attend à ce que les œufs de saumon atlantique éclosent entre le début d'avril et la mi-mai en aval du lac Trousers et du lac Long.

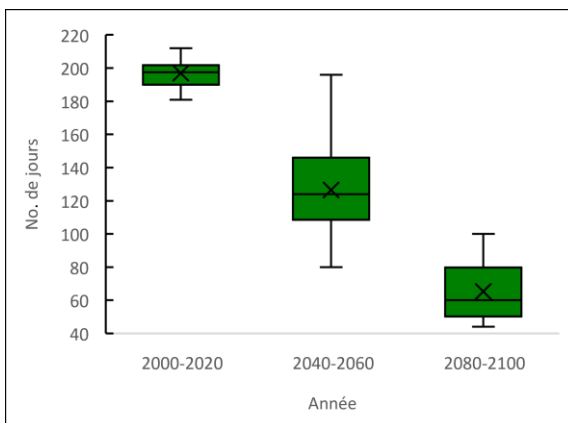
De 2040 à 2060, on prévoit que pour les deux réservoirs, le nombre de jours d'incubation diminuera pour atteindre une moyenne de 180 et que l'éclosion devrait avoir lieu en avril, ce qui est le résultat d'une augmentation de la température de l'eau pendant toute la période d'incubation. La température de l'eau prévue pour les deux dernières décennies du siècle indique une diminution du nombre de jours pour atteindre la température cumulative dont les œufs de saumon atlantique ont besoin pour éclore, avec une période moyenne de 145 jours (l'éclosion devrait avoir lieu en mars et au début d'avril).



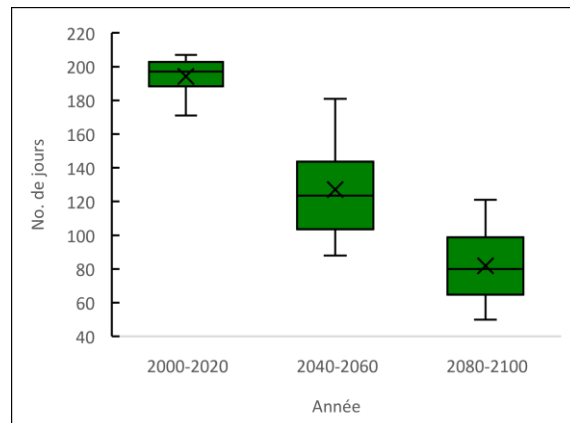
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 3-12 Résultat du nombre de jours requis pour que le saumon atlantique atteigne 470 degrés-jours en aval de. a) Lac Trouseurs b) Lac Long. Nombre de jours nécessaires à l'éclosion de l'omble de fontaine (400 degrés-jours) c) du lac Trouseurs d) du lac Long.**

En comparant les résultats de trois périodes différentes, on prévoit que le nombre moyen de jours d'éclosion du saumon atlantique diminuera de 9% d'ici 2060. De plus, d'ici 2100, on prévoit que l'éclosion aura lieu jusqu'à 26% plus tôt.

En ce qui concerne la date d'éclosion de l'omble de fontaine en aval du lac Long et du lac Trouseurs, le graphique suit la même tendance que la date d'éclosion du saumon atlantique. Les résultats montrent une diminution du nombre de jours d'éclosion des œufs d'omble de fontaine. Pendant la première période, le nombre moyen de jours est de 200. Le nombre moyen de jours de la deuxième période sera réduit à 125 jours, et la dernière période sera raccourcie à 80 jours. D'après les résultats, de 2080 à 2100, les éclosions auront lieu en janvier et février. Cela montre que l'éclosion aura lieu 60% plus tôt que dans la première période. De plus, les résultats montrent

que dans la plupart des cas, les valeurs du nombre de jours oscillent autour de la valeur médiane tandis que les valeurs deviennent plus variables selon le RCP8.5. Ce qui impliquerait le changement plus rapide des différentes variables météorologiques dans le climat projeté.

## 4 HYDRO-THERMAL MODELLING OF THE POTENTIAL IMPACTS OF RESERVOIRS ON WATER TEMPERATURE AND INCUBATION TIME OF ATLANTIC SALMON AND BROOK TROUT IN THE TOBIQUE RIVER, CANADA

---

Negin Rahmati<sup>a</sup>

André St-Hilaire<sup>a</sup>

Allen Curry<sup>b</sup>

Eisinhower Rincon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, INRS-ETE, 490 de la couronne, Québec, QC, G1K9A9, Canada

<sup>b</sup> University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada

### Corresponding author

Negin Rahmati: [negin.rahmati@inrs.ca](mailto:negin.rahmati@inrs.ca)

Tel : +1(581) 578 - 8007

INRS-ETE, 490 de la couronne, Québec, QC, G1K9A9, Canada

Soumis au Journal River Research and Applications

(Déposé le 14 mars 2023)

### Contribution de l'auteur principal et des coauteurs

Negin Rahmati : la conception et la mise en place du plan de travail, méthodologie, analyse formelle, interprétation, rédaction-copie originale. André St-Hilaire : la conception et la mise en place du plan de travail, supervision, révision. Allen Curry : la conception et la mise en place du plan de travail, supervision, révision. Eisinhower Rincon: la collecte des données.

### 4.1 Introduction

Water temperature is recognized as a master variable in lotic ecosystems with a significant effect on all physical and chemical processes (O'sullivan et al. 2021; Qiu et al. 2021). Temperature regulates among many things, the persistence of biota (Li et al. 2022), dissolved oxygen availability (Armstrong et al. 2003), and organic and inorganic pollutants (Bloomfield et al. 2006)

For biota, water temperature controls growth and development as well as behaviour (Armstrong et al. 2003).

Fish are adapted to thermal regimes and changes in temperatures outside their normal range can be detrimental for them (Caissie et al. 2001), and human activities can create these adverse thermal conditions for fish (Preece and Jones 2002; Qiu et al. 2022; Zarri et al. 2019). Ecohydrologists are developing temperature models (Caissie et al. 2001; Caissie et al. 2007; Chenard and Caissie 2008; Dugdale et al. 2018) to explore and predict the likelihood of temperature alterations (Qiu et al. 2021; Webb and Nobilis 2007) and the effects on aquatic fauna (Dugdale et al. 2016; O'sullivan et al. 2021). Statistical models are now popular and produce satisfactory results based on surface water temperature modelling (Ahmadi-Nedushan et al. 2007; Caissie et al. 1998; Mohseni et al. 1998) and also a river's spatial temperature network (e.g., SSN models; (O'sullivan et al. 2020). Alternatively, deterministic models are physical models that use heat energy balance equations to calculate the energy exchange between the stream and its environment (Sinokrot and Stefan 1993; Zhu and Piotrowski 2020). They have been used successfully for predicting the thermal regimes in both natural and human-altered river systems (Dugdale et al. 2018; St-Hilaire et al. 2015).

This paper couples a statistical reservoir temperature model with a deterministic river temperature model (CEQUEAU) to simulate the hydrological and thermal regime of the Tobique River, N.B. (Canada) and then examines the thermal regime of the reproduction environments for Atlantic salmon (*Salmo salar*) and Brook trout (*Salvelinus fontinalis*). These cold-water species use riverbeds (typically gravel substrates as their embryo incubation habitats from fall to spring. The spawning period for Atlantic salmon spans from late October to late November when river temperatures are between 1°C and 4.7°C (Scott and Scott 1988). For Brook trout, spawning begins when surface water temperature decreases below 11-10°C, typically in mid-October. The incubation period for both species occurs in winter at temperatures between 0.5 - 5°C, and alevins emerge in spring when water temperature approaches 10°C -March to May (Power 1980). The spawning and incubation habitat is selected based on several environmental factors, such as river depth, water velocity, substrate size (Heggberget 1988; Wallace and Heggberget 1988) plus water temperature (Power 1980; Scott and Scott 1988).

Humans alter river systems by building dams and creating reservoirs. These changes in turn alter the river's thermal regime (Preece and Jones 2002; Yang et al. 2022) and therefore the thermal environment for fish and other biota (Cheng et al. 2020; Dugdale et al. 2018; Elliott and Elliott 1995; Steel et al. 2017; Yang et al. 2022; Zaidel et al. 2021). Thermal regime alteration causes



many negative issues for river ecosystems downstream of dams where temperatures can fluctuate outside of natural ranges, and changes in diel, seasonal, and interannual temperature variability can occur.

These temperature changes can be considered as thermal pollution, e.g., releasing cold water from the hypolimnion of a reservoir during the summer thermal stratification and then warm water in winter (Lessard and Hayes 2003; Olden and Naiman 2010). Therefore, dams can effectively reset water temperature boundary conditions by modifying the magnitude of temperature in the river downstream.

## **4.2 Purpose of the study**

The objective of this study is to investigate the impact of water releases from variable depths of an impoundment on river water temperatures downstream and as a result, the thermal environments for incubating Atlantic salmon and brook trout embryos during winter. We employed the CEQUEAU model, a process-based semi-distributed hydrological and water temperature model, to simulate the water temperature of the rivers, using meteorological and physiographic data of the watershed as inputs (Morin and Couillard 1990). The CEQUEAU modelling domain was defined by setting the flows and temperatures at reservoirs outlets as boundary conditions. For one of the reservoirs, we coupled a model statistical model for the reservoir to the CEQUEAU model for the river, and then investigated the potential impact of water releases from various depths within the reservoir on river temperatures downstream and the thermal regimes potentially experienced by incubating Atlantic salmon and Brook trout embryos.

## **4.3 Methods**

### **4.3.1 CEQUEAU model**

CEQUEAU is a process-based hydrological and water temperature model. It is a semi-distributed model that first simulates river flow for natural or regulated rivers and subsequently simulates water temperature using the hydrological module outputs as well as atmospheric and local heat forcings. The first step is to construct a physiographic database by dividing the watershed into homogenous elementary areas with identical dimensions called “whole squares”.

To simulate flow, each whole square is subdivided from one to a maximum of four polygons called Partial squares (CP). The subdivision of CPs is conducted based on the drainage divides of the

watershed (Dugdale et al. 2017b), and the size of each CP is proportional to the area of the CPs located upstream that drain into it.

The hydrological module requires watershed physiography (percentage of wetland, percentage of bare soil, marshes and lakes, and altitude) and meteorological inputs (precipitation, solid and liquid, or total and air temperature) to simulate the hydrological budget of each partial square at each time step.

The vertical movement of water throughout the watershed in each whole square within each time step, usually daily, is calculated using the so-called production function. The production function is representative of different reservoirs in the ground (i.e., saturated zone, unsaturated zone, marshes and lakes) in which water can be stored or transferred until it reaches the river (Figure 4-1).

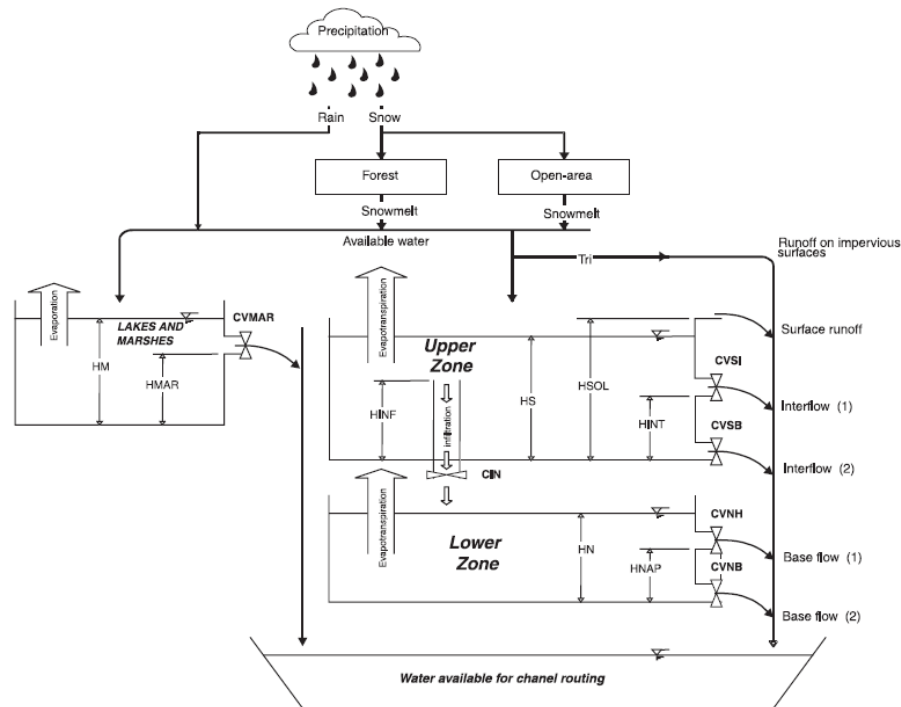


Figure 4-1 Diagram of the production function of the CEQUEAU model (Morin and Couillard 1990)

The amount of total flow at each CP on a daily basis determined through the production function is calculated as follows:

$$Q_t = P_t + ETP_t + (HU_t - HU_{t-1}) + (HL_t - L) \quad (1)$$

Where  $Q_t$  is the amount of total flow (mm),  $P_t$  is the liquid precipitation of snowmelt (mm), ETP is evapotranspiration (mm), HU is the amount of water accumulated in the unsaturated zone, HL is the amount of water accumulated in the saturated zone, and  $t$  is the time step (daily). Percolation and infiltration from the unsaturated zone to the saturated zone are considered a portion of HU and HL.

The CEQUEAU model employs a routing function to calculate the water transfer from each CP downstream. For more detailed calculations and the description of the hydrological budget of the CEQUEAU model, readers are referred to (Morin and Couillard 1990) and (St-Hilaire et al. 2000).

### 4.3.2 Thermal module

CEQUEAU's water temperature module takes advantage of the hydrological model's output. It determines the energy budget for the water volume linked to the simulated discharge in each grid square, which depends on the heat gain or loss resulting from energy transfers into or out of the square. This calculation uses the enthalpy for each grid square and the specific heat capacity of water to determine the water temperature. As a result, water temperature at daily time step is calculated as follows:

$$\Delta T_{w,t,i} = \frac{\Delta H_{t,i}}{V_{t,i} \Theta} \quad (2)$$

Where  $\Delta T_w$  is the change in water temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta H$  is the change in enthalpy of the reach (MJ),  $V$  is the water volume ( $\text{m}^3$ ) and  $\Theta$  is the calorific capacity of the water ( $4.187 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) for the model time step ( $t$ ) and CP ( $i$ ).

The following equation calculates the enthalpy of each CP by adding up the net amount of solar shortwave radiation, longwave radiation, sensible heat, latent heat, and advective heat fluxes:

$$H = Q_{sw}(t,i) + Q_{lw}(t,i) + Q_e(t,i) + Q_s(t,i) + Q_a(t,i) \quad (3)$$

Where  $H$  is enthalpy of the reach (MJ),  $Q_{sw}$  is incoming solar shortwave energy,  $Q_{lw}$  is the longwave radiative energy,  $Q_e$  is energy lost through evaporation,  $Q_s$  is sensible heat transfer (gain or loss) and  $Q_a$  is advective heat transfer from CP upstream to CP downstream (MJ).

Solar shortwave flux derived from actual solar radiation values was inputted into the model, while the other heat flux terms (latent heat, sensible heat, and advective heat) are computed using a set of equations. Long wave radiation was obtained from the equation below:

$$Q_{lW_{t,i}} = A 0.97 \sigma [\varepsilon(T_{a_t})^4 - (T_{w_t})^4] \quad (4)$$

Where  $\varepsilon$  is estimated atmospheric emissivity,  $\sigma$  is Stephan-Boltzmann constant ( $4.9 \times 10^{-9}$  MJ  $m^{-2} K^{-4}$ ),  $A$  is estimated surface of the reach ( $m^2$ ),  $T_a$  is mean daily air temperature ( $^{\circ}K$ ), and  $T_w$  is mean daily water temperature calculated for the previous day ( $^{\circ}K$ ) in which atmospheric emissivity is given by the equation as follows:

$$\varepsilon = (0.74 + 0.0065p_{t,i}) \cdot (1 + 0.17b^2_{t,i}) \quad (5)$$

Where  $P$  is actual vapor pressure (mm Hg) and  $b$  is cloud cover (from 0.0 to 1.0).

Evaporation is calculated considering the lost latent energy as an influential factor in evaporated water volume from the river surface.

$$Q_{e_{t,i}} = E_{e_{t,i}} \cdot H \quad (6)$$

Where  $E_e$  is the volume of water evaporated at each time step ( $m^3$ ) which is estimated using the Thornthwaite method (Morin and Couillard 1990).  $H$  is the latent heat of evaporation (2480 MJ  $m^{-3}$ ).

Convection is given by:

$$Q_{h,i} = 0.2 A w_{t,i} \cdot (T_{a_{t,i}} - T_{w_{t,i}}) \quad (7)$$

Where  $W$  is wind velocity ( $km h^{-1}$ ) and 0.2 is empirical coefficient obtained based on previous simulations (Morin and Couillard 1990).

Local advective inputs are derived from the energy being transferred through water flowing in various approaches from the upstream CP to the CP of interest. In addition to heat fluxes at the air-water interface, the thermal module also accounts for heat advected from upstream, groundwater, surface runoff and interflow (Couillard et al. 1988).

### 4.3.3 Study Area

The Tobique River watershed is located in northwestern New Brunswick, Canada (Table 4-1; Figure 4-2). The watershed is 4637  $km^2$  in area, the main stem is 148 km long. Its average flow measured at the Riley brook hydrometric station (47.173, 67.210) is 52  $m^3/s$  (upstream watershed = 2230  $km^2$ ). Hourly temperatures were monitored at the confluence of four reservoirs (Point

CP562). There are four dams and reservoirs used for water control by New Brunswick Power Corporation: Long Lake, Serpentine Lake, Sisson Lake, and Trousers Lake.

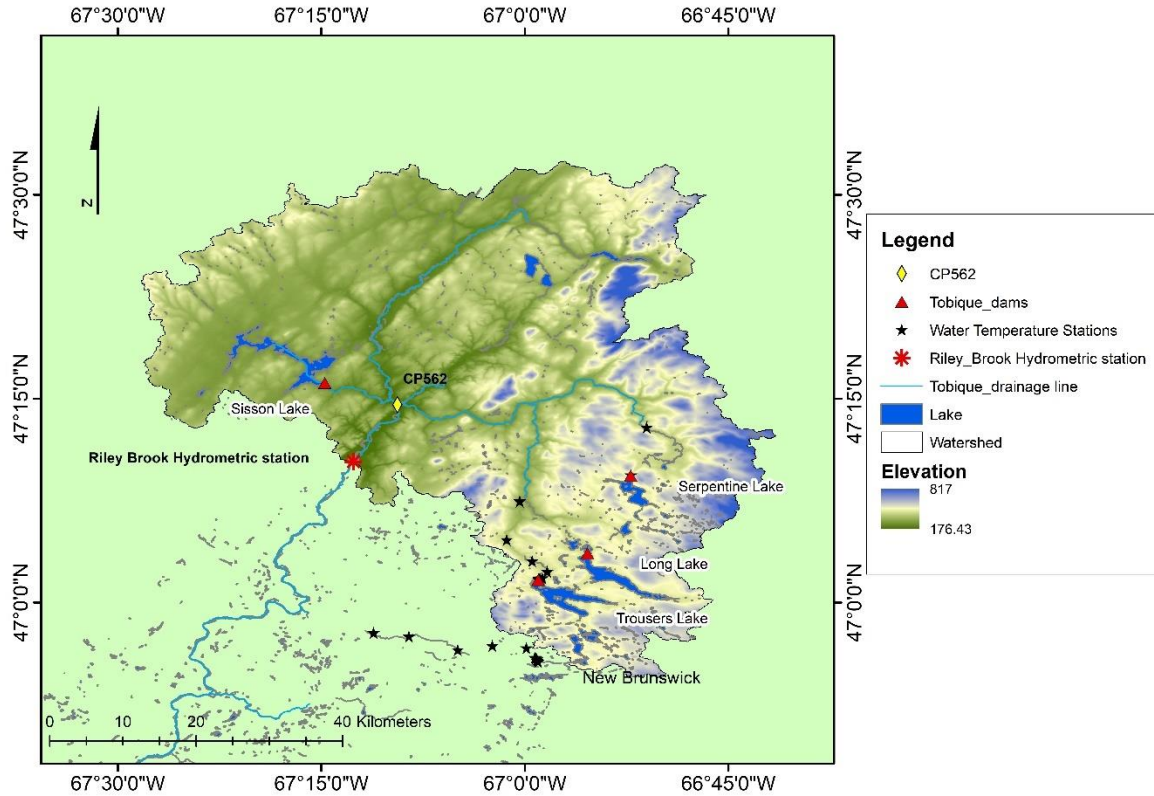


Figure 4-2 Tobique River watershed. The temperature logger station used for calibration is CP562 (yellow diamond)

**Table 4-1 Characteristics of the Tobique River watershed**

<b>Characteristic</b>	<b>Value</b>
Watershed Area (km <sup>2</sup> )	4637
Average Elevation (m)	330
Forest cover (%)	91.52
Bare soil (%)	3.83
Lake and marshes (%)	2.81

### **3.1. Model Grid Layout and Physiographic Data Inputs**

Following the approach of Dugdale et al. (2017b), the CEQUEAU model was implemented to fractionate the Tobique River watershed into 548, 3 x 3 km grid squares (CE) and further divided in 1157 partial squares (CP). The number of CPs in each CE can be from 1 to a maximum of 4, and the division is based on drainage divides. Physiographic data were gathered from the New Brunswick Government (GeoNB), including all water bodies (Dugdale et al. 2018). Forest and bare soil cover were computed using raster land use data retrieved from North American Land-Change Monitoring System. A range of information including the channel altitude and slope, the length of the main stem of the river in each CE, and width and depth of the river are also required for the CEQUEAU thermal model which were derived from geographic information system (GIS) data (Morin and Couillard 1990). MATLAB version R2020a software was used to construct the data base structure and run the CEQUEAU model.

#### **4.3.4 Meteorological data**

Vapour pressure, wind speed, precipitation, maximum and minimum air temperature, cloud cover, and solar radiation necessary for calibration / validation of hydrological and thermal components were derived from ERA5 reanalysis which is the fifth generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (<https://www.ecmwf.int>). The data are generated by the Copernicus Climate Change Service (C3S) at ECMWF. The atmospheric data used, represent the atmospheric conditions at 1 m above the earth throughout the watershed. In the ERA5

reanalysis system, the hourly data are provided on a 31x31 km grid (Hersbach et al. 2020). They were converted to daily meteorological data and then interpolated on each grid point using a nearest-neighbour approach. According to the area and shape of the catchment area, 8 ERA5 grid points were used to interpolate meteorological data on the CEQUEAU grid.

#### 4.3.5 Statistical model

The CEQUEAU model simulates water flow and temperature for a well-mixed water column and is therefore ill-adapted to simulate reservoir temperatures. To address this, we set the reservoirs as boundaries in the model. In three reservoirs there is only surface water releases and for these we simulated downstream water temperatures. One reservoir, Serpentine Lake, is being studied for water releases from four possible different depths (a dam rebuild). We used the statistical model to simulate reservoir temperatures at different depths. For the Sisson Branch, there was no water temperature data available, and we applied the coefficients from the most similar reservoir condition, i.e., Long Lake. For Serpentine Lake, a series of thermographs (1 to 7 m deep) was deployed in 2020-2021, which allowed the calibration of statistical model simulating temperature of water released from different depths.

Water temperatures of the reservoirs were simulated using sinusoidal function for the seasonal trend and an auto-regressive model with an exogenous predictor (air temperature) for the residuals (time series from which the trend was subtracted). Lagged air temperature (0, 1 and 2 days lag) were used as predictors (Ahmadi-Nedushan et al. 2007; Caissie et al. 1998). Equations (8) to (10) describe the model:

$$TW(t) = TA(t) + RW(t) \quad (8)$$

Where TW is simulated water temperature (°C), TA is the seasonal component, and RW is water temperature residuals. TA is calculated by fitting a sinusoidal function over observed water temperature:

$$TA(t) = a + b\text{Sin}\left(\frac{2\pi}{365}(t + t_0)\right) \quad (9)$$

Where b and t are coefficients. Water temperature residuals were obtained using:

$$RW(t) = \beta_1 Ra(t) + \beta_2 Ra(t - 1) + \beta_3 Ra(t - 2) \quad (10)$$

Where Ra is air temperature residuals which were also calculated by subtracting the observed air temperatures from the trend line obtained with Equation (9) fitted to daily air temperature means and  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  are regression coefficients. More details on this statistical approach have been provided by (Caissie et al. 1998).

### 3.2.1 Hydrological Module Calibration

First, the hydrological module was calibrated by manually adjusting the parameters one at a time and then automatically calibrated using the pattern search algorithm (PS) (Audet and Dennis Jr 2002). To measure the performance of both automatic and manual calibration, two indicators, the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) and Kling-Gupta efficiency (KGE) coefficients were calculated.

NSE conducts a comparison between residual variance and observed variance. KGE is considered a suitable global indicator to measure the calibration performance as it takes into account simultaneously variance, bias and correlation (Santos et al. 2018a):

$$NSE = 1 - \frac{\sum^n (Q_{obs} - Q_s)^2}{\sum^n (\bar{Q}_{obs} - Q_s)^2} \quad (11)$$

Where  $Q_{obs}$  is the measured discharge at time t ( $m^3/s$ ),  $\bar{Q}_{obs}$  is the mean of the measured values ( $m^3/s$ ),  $Q_s$  is the predicted discharge at time t ( $m^3/s$ ) and n is the sample size.

The best NSE value is 1 and is achieved when simulated data have identical values to observed data (McCuen et al. 2006).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (12)$$

$$r = \frac{cov(Q_o, Q_s)}{\sigma_s^2 \sigma_o^2} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{\mu_o \sigma_s}{\sigma_o \mu_s} \quad (15)$$

Where r is the Pearson correlation coefficient, cov is the covariance between observation and simulation,  $\sigma$  is standard deviation,  $Q_s$  is simulated flow ( $m^3/s$ ),  $Q_o$  is observed flow ( $m^3/s$ ),  $\beta$  is the bias term,  $\mu_o$  is mean observed flow ( $m^3/s$ ),  $\mu_s$  is mean simulated flow ( $m^3/s$ ), and  $\gamma$  is the ratio between the simulated and observed coefficients of variation.



### 4.3.6 Thermal Module Calibration

Data from thermographs installed in the main stem of the Tobique River at the confluence of each of the four reservoirs (Cp 562) from 2002 to 2012 were employed to calibrate the model. The model was validated against temperature data recorded by thermographs deployed in other tributaries of the river, such as the Serpentine River (47.1589, -66.868) and Long river (47.079, -66.949) during 2019-2020.

Thermal calibration was conducted in two stages. First, the parameters modulating the relative importance of surface heat budget terms were manually adjusted (Morin and Couillard 1990). The Pattern search algorithm was subsequently employed to calibrate the thermal model component. The Root mean squared error (RMSE) was used to assess the quality of the simulation.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(S_i - O_i)^2}{n}} \quad (16)$$

Where  $S_i$  is the simulated value on a daily basis ( $^{\circ}\text{C}$ ) and  $O_i$  is the observed value on a daily basis ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 4.3.7 River temperature and embryo incubation periods

We chose two metrics related to spawning, incubation, and hatching periods for salmon and trout. For Atlantic salmon and Brook trout, we selected a temperature when spawning was most probably nearing completion and thus embryos were in the river bed:  $2.4^{\circ}\text{C}$  (Curry et al. 2002) and  $7^{\circ}\text{C}$  (Scott and Crossman 1964), respectively. We used these temperatures as the standardized start of the incubation period. Next, we used the degree-days to hatching for Atlantic Salmon: 470 (Brännäs 1988; Peterson et al. 1977) and for brook trout: 400 (Blanchfield et Ridgway 1997; Curry et al. 2002; Heggberget 1988) to determine the length of the incubation period for each thermal regime modelled.

## 4.4 Results

### 4.4.1 Reservoir statistical model calibration results

The calibration period was from 2020-06-09 (Julian day 161) to 2021-04-29 (Julian day 120). The RMSE between measured and simulated water temperature for selected depths are given in Table 4-2. Taking the mean air temperature as input in the statistical model, the simulation was

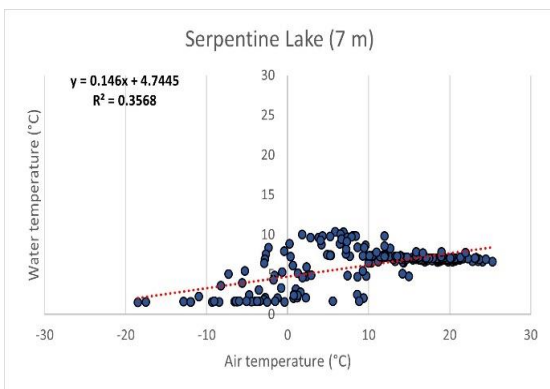
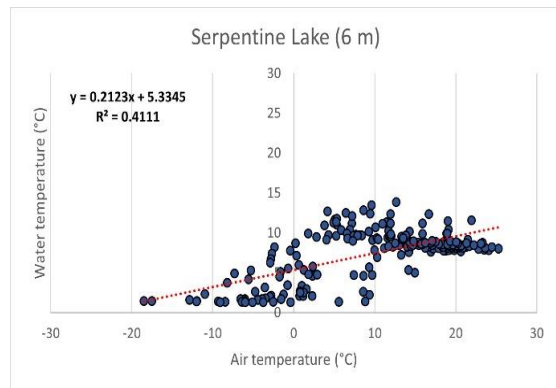
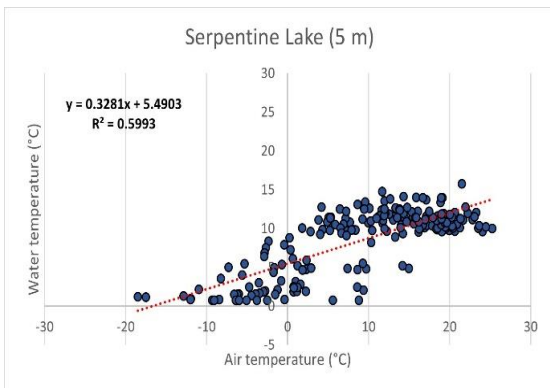
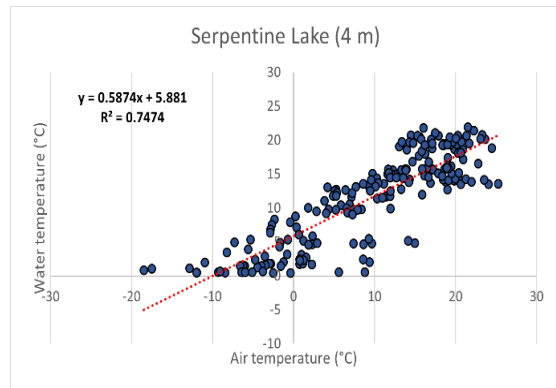
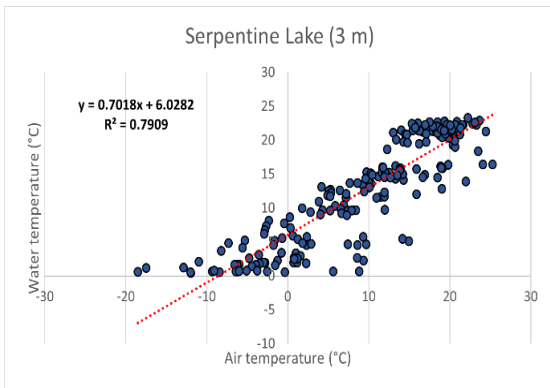
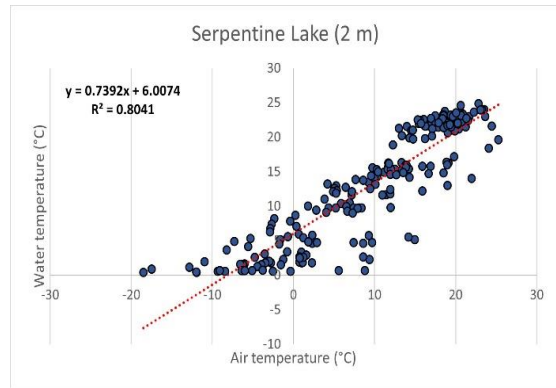
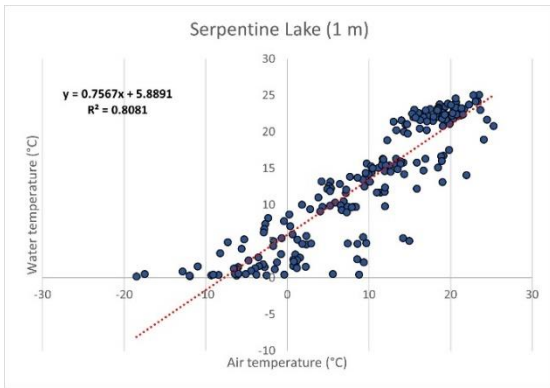
carried out from 1997-2020 using the coefficients computed from calibration. As illustrated in Figure 4-3, due to the lower correlation between air temperature and water temperature in deeper layers, the regression coefficients (between water and air residuals) are small and hardly affect the trend of the sinusoidal curve.

Figure 4-4 shows the water temperature trend (simulated temperature) at selected depths of the Serpentine Lake compared to the measured temperature from 2020-06-09 to 2021-04-29. Water temperatures at 1 to 4 m depth change significantly in response to air temperature variation. However, at a depth of 2 and 3 m, the water temperature in winter is underestimated. Water temperature in the lower part of the reservoir varies less due to the thermal stratification of the lakes (Fang and Stefan 1996) and the model is less accurate in representing variations and fluctuations in deep-water temperature.

The model simulated the downstream water temperature of Trousers (Figure 4-5) and Long (Figure 4-6) lakes from the second half of 2020 for which data were available. Results indicate that the model could simulate water temperature adequately with a RMSE of 1.05°C and 1.73°C for Trousers and Long Lake respectively (Table 4-2).

**Table 4-2 The maximum recorded water temperature and the RMSE for varying depths in Serpentine Lake (1997-2020).**

Lake	Depth (m)	Maximum water Temperature (°C)	RMSE(°C)
Serpentine Lake	1	25.05	1.1
Serpentine Lake	2	24.89	1.1
Serpentine Lake	3	23.32	1.7
Serpentine Lake	4	21.90	1.3
Serpentine Lake	5	15.78	1.4
Serpentine Lake	6	13.85	1.3
Serpentine Lake	7	10.39	1.5
Long lake	Surface	23.80	1.7
Trousers Lake	Surface	23.61	1.4



**Figure 4-3 The relationship between mean daily air temperatures and mean daily water temperature of Serpentine Lake at different depths**

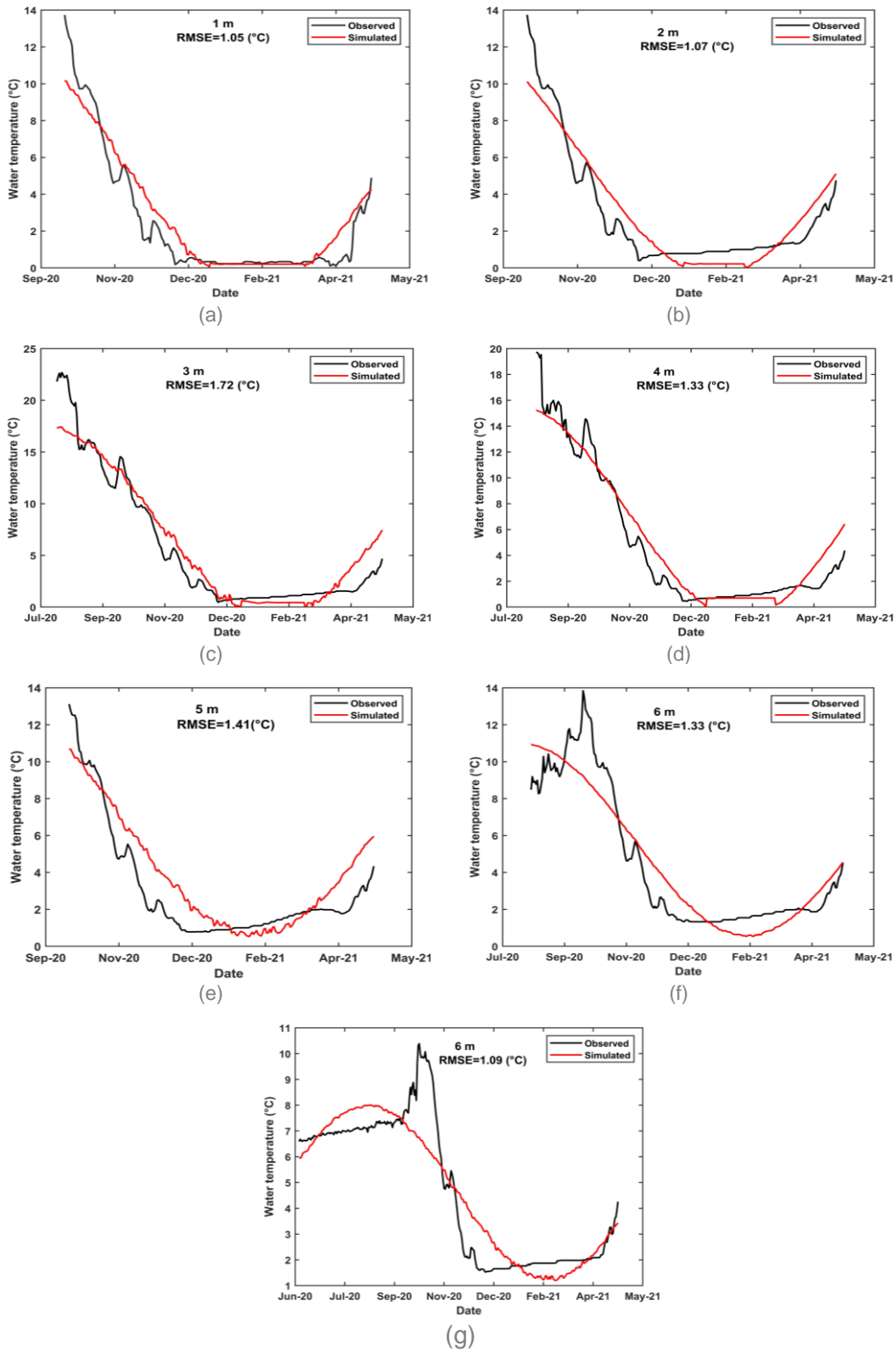


Figure 4-4 Simulated and measured water temperatures in Serpentine Lake at 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 m below the water surface (or ice water interface)

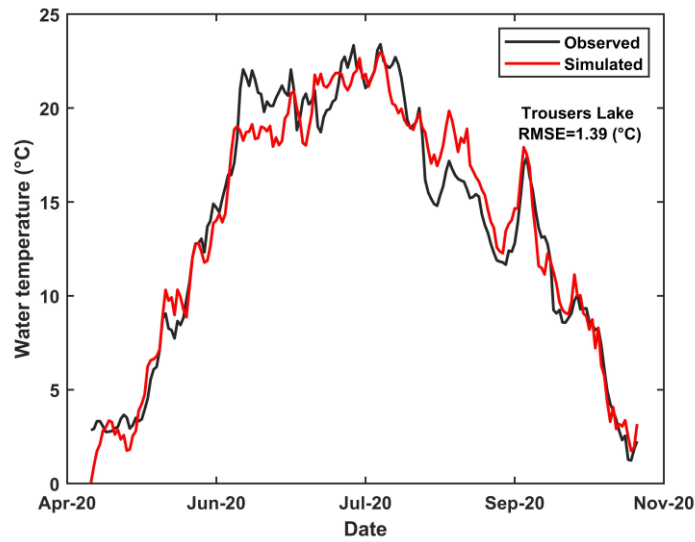


Figure 4-5 Comparison between simulated and measured water temperature downstream of the Trousers Lake

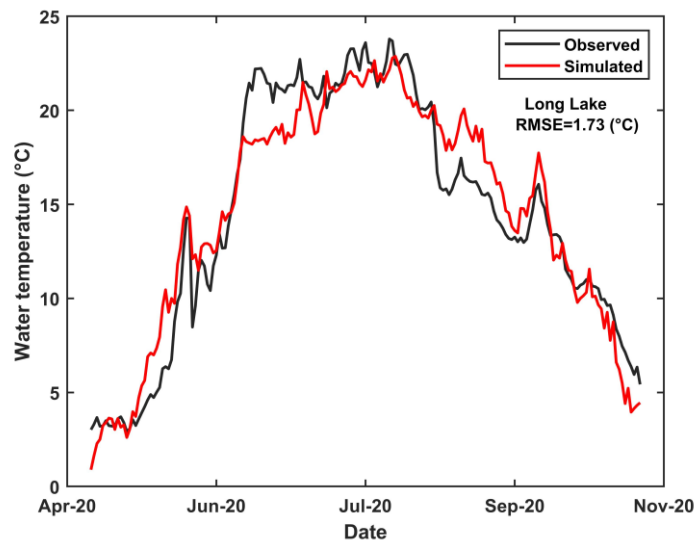


Figure 4-6 Comparison between simulated and measured water temperature downstream of the Long Lake

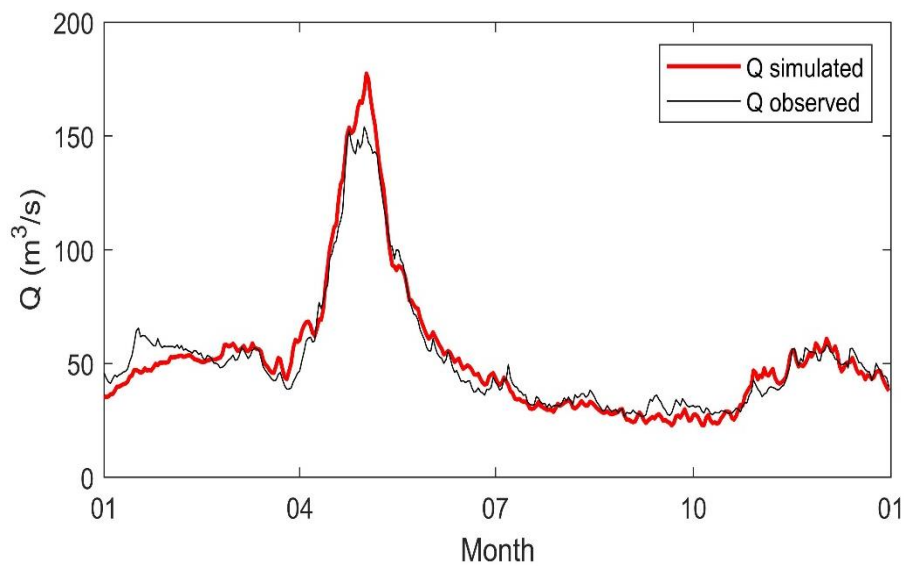
#### 4.4.2 River thermal and hydrological calibration and validation

Calibration of the hydrological model generated NSE and KGE for daily discharge for the entire calibration period (2005-2012) of 0.70 and 0.85 respectively. Validation against the hydrometric station showed that the model can generate the daily discharge of the Tobique River with NSE and KGE of 0.72 and 0.86, respectively (Table 4-3). The interannual discharge time series in

Figure 4-7 demonstrates that the spring flood is slightly overestimated, and winter flow discharge is slightly underestimated.

**Table 4-3 Calibration and validation results for the hydrological and thermal models. KGE is the Kling-Gupta Efficiency criterion (Eq. 12). NSE is the Nash-Sutcliffe criterion (Eq. 11). RMSE is the Root Mean Square Error (Eq. 13)**

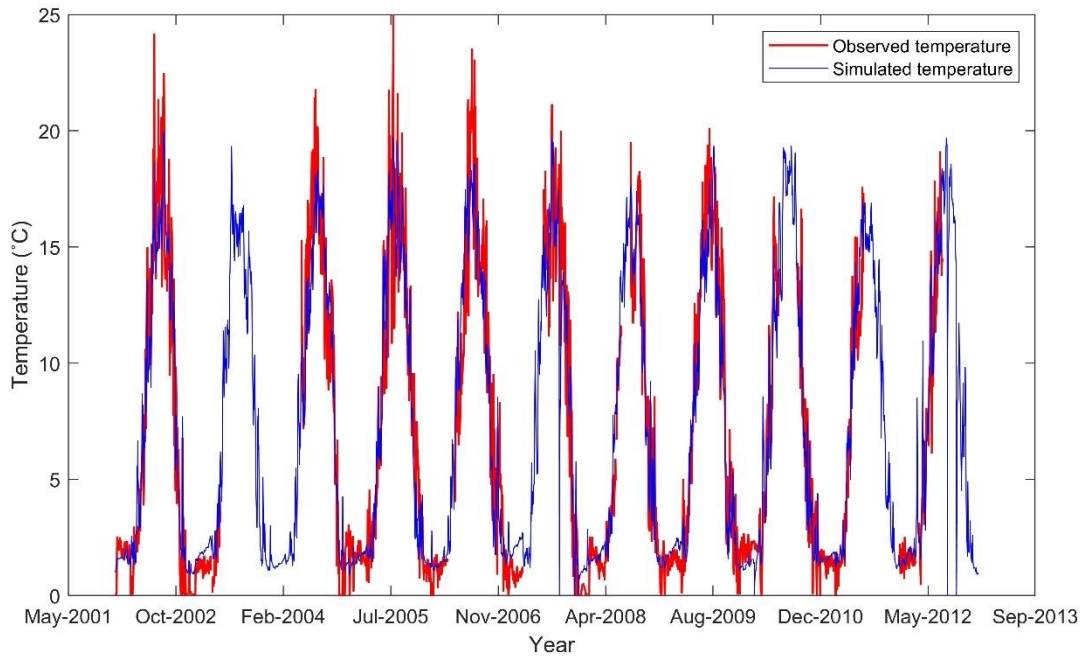
		Discharge		Water Temperature	
	Period	KGE	NSE	Period	RMSE (°C)
<b>Calibration</b>	1997-2013	0.85	0.75	2002-2007	1.73
<b>Validation</b>	2014-2020	0.86	0.72	2008-2012	1.41



**Figure 4-7 Simulated interannual flow compared to observed flow at Riley Brook hydrometric from 1997 to 2020**

Calibration and validation against measured temperature collected from temperature loggers installed at CP562 (Table 4-3) indicate that the model predicts the mean daily temperature of the main stem of the Tobique River adequately. Results of the simulated water temperature of the Tobique River (Figure 4-8) demonstrate the accuracy of predicting the seasonal water temperature. The RMSE values for the calibrated and validated water temperature against the observed temperature demonstrate a satisfactory performance for the CEQUEAU model. Moreover, the RMSE in the winter period is  $< 1^{\circ}\text{C}$  and similar to the precision of thermographs

that were deployed ( $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ). Table 4-4 represents water temperature metrics from simulations for the Tobique River at CP562. The maximum summer simulated temperature is underestimated by approximately  $2^{\circ}\text{C}$  for some years and winter temperature results show an overestimation up to approximately  $1^{\circ}\text{C}$ , although the bias is not systematic. Annual degree days vary from 2658 to 3006.



**Figure 4-8 Simulated water temperature of the Tobique River at location CP 562 (See Figure 4-2) based on the CEQUEAU model.**

**Table 4-4 Water temperature metrics for the Tobique River at CP562 for the reference period (2002-2011).**

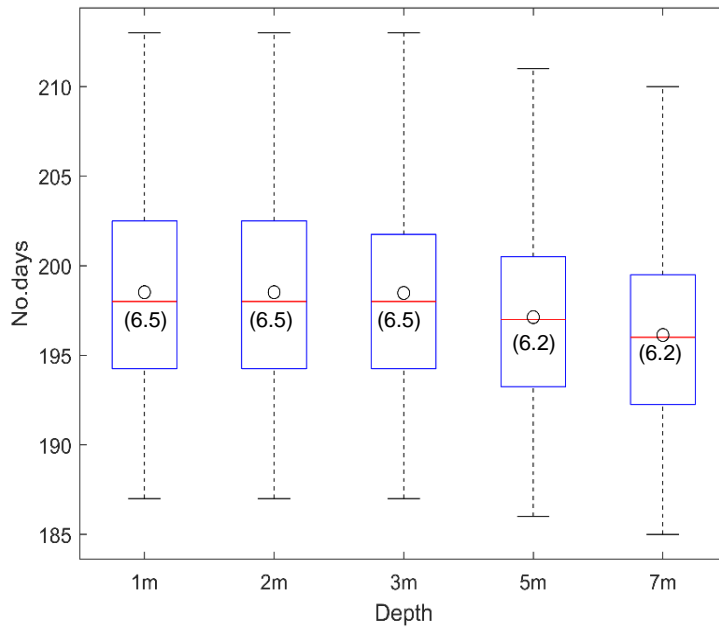
<b>Year</b>	<b>Annual mean temperature (°C)</b>	<b>Annual maximum temperature (°C)</b>	<b>River temperature annual standard deviation (°C)</b>	<b>Degree days</b>	<b>Maximum January to March temperature (°C)</b>
2002	7.51	20.70	6.30	2746	4.81
2003	7.32	19.71	5.90	2658	3.72
2004	7.43	18.82	6.01	2691	3.61
2005	7.51	20.11	6.21	2721	2.50
2006	7.80	19.11	6.12	2848	3.73
2007	7.41	20.50	6.11	2704	3.23
2008	7.10	17.83	5.70	2606	3.60
2009	7.12	19.70	5.71	2597	5.42
2010	8.24	20.50	6.61	3006	4.20
2011	8.01	20.71	6.40	2932	8.71

### **4.4.3 Incubation Periods**

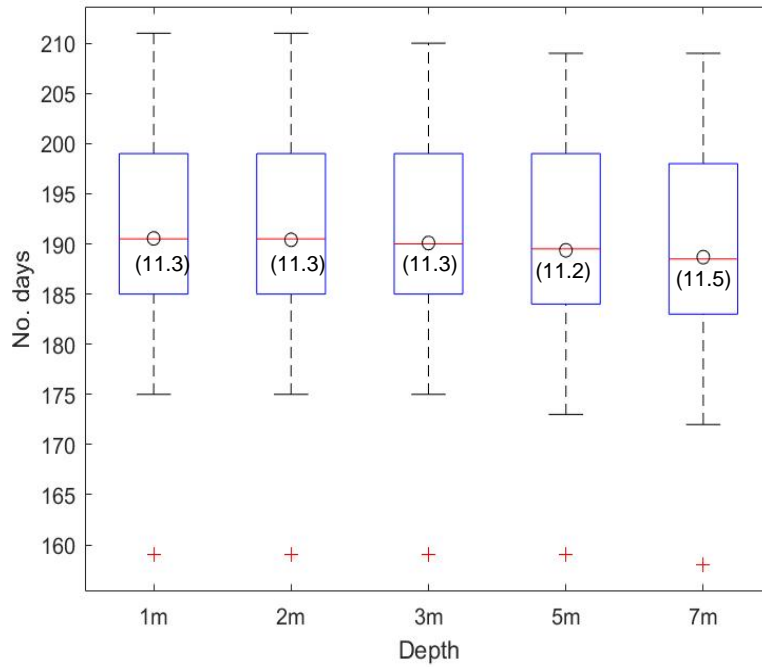
For Serpentine Lake, the variation in the reservoir’s temperature regimes with depth resulted in variable degree-days (DD) for the standardized incubation period. The temperatures increased with depth of reservoir water used in the model and as a result, the DD decrease from 1 m (199 DD) to 7 m depth (196 DD) and differences were not significant (Chi-sq=1.06, P = 0.79, Df = 3; Figure 4-9a).

The predicted incubation period for Brook trout also declined with modelled output from declining reservoir depth (Figure 4-9b). The range was between 187 and 214 days, and there was no significant difference (Chi-sq = 0.53, P = 0.9, Df = 3; Figure 4-9b). The predicted date of hatch for trout ranged from April 1 to May 15.





(a)



(b)

Figure 4-9 Comparison of predicted number of days for incubation to hatching for a) Atlantic Salmon and b) Brook trout downstream of Serpentine Lake. Median values are the red lines, means are black

circles, outliers are the red plus signs, standard deviation in parentheses, and the lower and upper limits of boxes are the 25th and 75th percentiles. Whiskers are values between the first and 3rd quartiles.

#### **4.4.4 Long, Trousers and Sisson Lake Degree Days**

The predicted DD immediately downstream of Long and Trousers lakes were greater than downstream control points. The mean Number of days (No Days) for Atlantic salmon at the CP immediately downstream of Long Lake and Trousers Lake are 178 and 177, respectively with standard deviation of 25.1 and 27, while the mean NOD of the CPs further downstream (3 km downstream) are 197 and 194, respectively with standard deviation of 7.4 and 9.9. According to the results, in the case of the presence of the Atlantic salmon redds immediately downstream of dams located in the Tobique watershed, the hatching is likely to occur 20 days earlier than further downstream. As a result, a 10% and 9% reduction in the incubation period is predicted for eggs directly exposed to the outlet of Long and Trousers dams, respectively.

#### **4.5 Discussion**

In this paper, we simulated the water temperature of the Tobique River with special emphasis towards the impact of dams on the thermal regime of the river. A major outcome of this study is the feasibility of coupling CEQUEAU to a relatively simple statistical model. The winter RMSE was less than 1°C, which is the same order of magnitude as actual thermistors in the river (0.5°C).

The findings of the current study regarding the statistical simulation, which has been conducted to simulate the downstream surface water temperature of three reaches, are consistent with performances found in the literature (Ahmadi-Nedushan et al. 2007; Caissie et al. 1998). The RMSE values for the current study (Long Lake: 1.73°C and Trousers Lake: 1.39°C) were relatively close to those found for the same model used by these authors i.e., between 0.5 and 1.7°C. Results demonstrate an overestimation in mean stream water temperature in spring (around 1.5°C). The model successfully calculated the Serpentine Lake water temperature (from 1m to 7m) with the RMSE value spanning from 1.05 to 1.7°C. Despite the higher RMSE at depth associated with a weaker correlation between deep reservoir temperatures and air temperature, the statistical model used is a simple alternative to classic deterministic reservoir thermal models such as CE-QUAL-W2 that require reservoir bathymetry and numerous meteorological variables as inputs (Larabi et al., 2022).

Results of this study are consistent with those of Maheu et al. (2016) who compared water temperatures in shallow reservoirs and storage dams in Eastern Canada and concluded that the

latter typically produce a warming between 1 and 2°C downstream of the dam during the ice-cover season. In contrast, Zaidel et al. (2021) compared temperatures downstream of impoundments with temperature upstream of the reservoirs for 30 different surface-release systems in Massachusetts (U.S.) and found no statistical differences between upstream and downstream sites during winter months. Surveys such as those conducted by (Richards et al. 1996; Trépanier et al. 1996; Yi et al. 2010) investigated the thermal habitats of fish using a wide variety of water temperature models. But like many other researchers, they focused on warmer seasons. Because of the high vulnerability of fish eggs to water temperature alterations, modelling the thermal spawning habitat is of importance.

Mooij et al. (2008) and Morales-Marín et al. (2019) have partly addressed this issue. Mooij et al. (2008) reported early hatching due to temperature warming. The Tobique River system is complex, with numerous reservoirs of different sizes and our results highlight the usefulness of distributed temperature models to investigate the impact of thermal disturbances on spawning thermal habitat. The CEQUEAU simulation results indicate that water temperature downstream of the four reservoirs located in the watershed increased ~1°C - 1.5°C for a downstream distance approximately 3 km away from the dam. The farther from the reservoirs, the smaller the temperature changes. Gunnes (1979) demonstrated that Atlantic salmon egg mortality has a direct relationship with incubation temperature, and the mortality rate varies at different stages (eggs before the eyed stage, from eyed stage to hatching). On the other hand, not only do dams alter reach temperature, but also, they could change other parameters of rivers, such as sediment flux and nutrient distribution (Gunnes 1979). Therefore, the life cycle of water organisms could be negatively affected by factors other than temperature during the winter. However, regarding the slight change in water temperature further (i.e., > 3 km) downstream of the reservoirs, it could be concluded that in case of the presence of the Atlantic salmon and Brook trout redds farther than the first 3km downstream, the adverse impact of dams on the incubation period of these species is negligible in the Tobique River system.

An obvious criticism of the results discussed in this paper would be that data collected to calibrate the statistical model is small. It created obstacles in the calibration process, and no separate validation was conducted for the statistical models. Also, the limits of the statistical model, especially for deeper water layers in the reservoir, is another major source of uncertainty in simulating water temperature and providing thermal boundary conditions for the river model. The statistical model does not take explicitly into account various physiographic and meteorological characteristics of the reservoirs. Incorporating physiographic and meteorological information

regarding the lake or reservoir, such as the volume of inflows, wind, and solar radiation penetrating the lake (with and without ice cover), especially in northern climates, improves the accuracy of the simulation in lentic ecosystems. However, despite all the potential uncertainties, the results obtained from the exogenous autoregressive model calibration are close enough to the observed temperatures, especially above 6 m, to represent the thermal state of the lake.

## **4.6 Conclusion**

Coupling the CEQUEAU model with the statistical model enabled a clear evaluation of the thermal regime of the impounded river system, highlighting different possible outcomes under the influence of the Serpentine dam water withdrawal scenario. The results summarized in this paper provide insight into how the thermal regime of the Tobique River may be altered by dams. Results suggest that water temperatures downstream of dams increase in winter and decrease in summer. A major finding was that changing the depth of water drawn from the Serpentine Lake affects its downstream temperature in the reaches immediately downstream of the dam. Results indicate that if water is drawn from the deep parts of Serpentine Lake, the downstream temperature will increase slightly in winter, although this change is not statistically significant. With the limitations of the statistical model, some factors that have an impact on the lake temperature could not be considered in this study. Therefore, further research is needed to account for the modelling of lake temperature and regarding native fish thermal spawning habitat.

## **Acknowledgement**

This work is a part of the Serpentine dam study funded by Natural Science and Engineering Research Council CRDPJ 543387-19 in partnership with NB Power/Énergie NB.

## **Data Availability Statement**

All meteorological data used in this project are freely available and accessible. The daily meteorological data used are retrieved through the ERA5 reanalysis from 1 m above the earth for 31 \*31 km grids (<https://www.ecmwf.int>). Physiographic data in this project were assembled from certain range of GIS databases. Water bodies and wetlands obtained from New Brunswick's GeoNB geospatial data portal (<http://www.snb.ca/geonb1/e/index-E.asp>). forest and bare soil cover extracted from North American Land-Change Monitoring System.

## **Credit author statement**

Negin Rahmati: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Visualization, Writing-original draft; André St-Hilaire: Conceptualization, Supervision, Writing-review and editing; Allen Curry: Conceptualization, Supervision, Writing-review and editing; Eisenhower Rincon: Data collection.

## **5 DISCUSSION GÉNÉRAL ET CONCLUSION**

---

### **5.1 STRUCTURE DU CHAPITRE**

Le chapitre décrit le but de l'étude concernant le développement de méthodologies fonctionnelles pour fournir des données fiables sur la température et le débit de la rivière Tobique. Ce chapitre traite brièvement de l'utilisation d'une approche de modélisation couplée, combinant le modèle conceptuel CEQUEAU pour la portion fluviale avec un modèle statistique pour la température de l'eau du réservoir. Le document fait également référence à des études similaires menées sur différents bassins versants

Les implications des changements de température sur l'écologie de la rivière, en particulier sur la reproduction et l'éclosion des poissons, sont discutées.

Les limites de l'étude et les suggestions de travaux futurs sont également abordées, y compris les défis du couplage des modèles déterministes et statistiques et la nécessité de séries de données d'entrée plus longues pour un étalonnage plus précis.

### **5.2 Couplage du modèle conceptuel CEQUEAU à un modèle statistique**

Cette étude a été conçue pour développer des méthodologies fonctionnelles afin de fournir des données fiables concernant la température et le débit de l'eau des écosystèmes lotiques affectés par des facteurs naturels et anthropiques. Comme les modèles déterministes nécessitent plus d'intrants que les modèles statistiques, le manque de données sur les lacs et les barrages en aval nous a incités à coupler un modèle déterministe avec un modèle statistique dans ce projet.

Compte tenu de la complexité des caractéristiques des rivières et de leur interaction avec les environnements environnants, il est de plus en plus nécessaire de développer des méthodes plus complètes pour intégrer des facteurs influents sophistiqués contribuant à modifier le régime hydrologique et thermique des rivières. La rivière Tobique, en tant que rivière aménagée avec des barrages, a subi plusieurs impacts anthropiques. De telles actions ont entraîné une altération du système fluvial et, ont possiblement eu des impacts sur certain stades de vie de nombreux organismes. Ainsi, le besoin d'obtention de résultats plus précis concernant le régime thermique

de la rivière Tobique affectée par quatre barrages nous a conduit à coupler le modèle CEQUEAU, un modèle conceptuel pour la portion fluviale du système, avec un modèle statistique relativement simple pour la température de l'eau des réservoirs. Ces modèles couplés permettent de prendre en compte l'impact des barrages et des changements climatiques sur les débits et sur la température de la rivière.

Dugdale (2017) a effectué un travail similaire du fleuve Saint-Jean au Nouveau-Brunswick pour étudier l'impact des changements climatiques futurs sur la température de l'eau et l'habitat thermique de certaines espèces clés de poissons du fleuve St-Jean qui est une rivière retenue à plusieurs endroits. Il a alors couplé le modèle CEQUEAU et un modèle de régression non linéaire pour simuler la température de l'eau. Il a simulé les températures de sortie du barrage à l'aide du modèle statistique et l'a utilisé comme condition aux limites dans le module thermique CEQUEAU (Dugdale et al. 2018).

Selon Dugdale, qui a utilisé plusieurs scénarios de changements climatiques futurs pour prédire la température de la rivière Saint-Jean, la température de l'eau augmentera d'environ 3,5°C d'ici 2100. Cependant, le système de la rivière Tobique est plus petit que celui du fleuve St-Jean, et l'ampleur des effets des changements climatiques différera entre les petits et les grands bassins versants et les régions.

Cette étude offre des informations précieuses sur la modélisation de la température de l'eau des rivières régulées. Le présent travail prend en compte l'effet de plusieurs relâches de quatre réservoirs sur un système fluvial relativement petit, ce qui a été rarement étudié (Seyedhashemi et al. 2021). Il est intéressant de noter que nous avons réussi à simuler la température de l'eau de la rivière Tobique de manière adéquate en intégrant l'impact de quatre réservoirs sur la rivière à l'aide de deux modèles.

De nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées pour étudier la stratification thermique dans les lacs et réservoirs. Stefan et Ford (1975) et Hondzo et Stefan (1993) ont utilisé des modèles unidimensionnels (1D) pour prédire le profil vertical de température des lacs en tenant compte de l'apport net de chaleur comme le rayonnement solaire, l'évaporation et la convection. Cependant, la méthode échoue en ce qui concerne l'effet de l'advection. Les modèles 2D et 3D ont montré des résultats prometteurs dans la simulation de la dynamique de température des réservoirs. Par exemple, Marcela et al. 2008 ont utilisé une équation tridimensionnelle de conservation de l'énergie pour les écoulements incompressibles pour calculer la température de l'eau du barrage McNary (de la surface à 25 m de profondeur), exploité par le U.S. Army Corps of Engineers (USACE) dans le district de Walla Walla (Politano et al.

2008). Ryan et al. (2014) ont utilisé un modèle à deux couches intégrées dans le River Basin Model (RBM) pour simuler la température du bassin de la rivière Tennessee dans le sud-est des États-Unis avec une bassin versant de 106 000 km<sup>2</sup>. Dans ce modèle, le réservoir est divisé en une couche d'épilimnion et une couche d'hypolimnion. Les bilans thermiques de l'épilimnion et de l'hypolimnion ont été calculés séparément, et la température de l'eau a été calculée sur la base du bilan thermique des deux couches (Hill et al. 2014). Ces approches déterministes nécessitent habituellement plus de données météorologiques en intrants ainsi qu'une information plus détaillée sur la bathymétrie du réservoir.

Le lac Serpentine est un réservoir ayant plus de 7 m de profondeur sur la rivière Tobique. Il pourrait être possible de relâcher l'eau à une profondeur autre que les premiers mètres près de la surface. Les températures mesurées sur le lac indiquent que Serpentine est un lac stratifié sur une base saisonnière et contient différentes couches avec des températures et des densités différentes. Dans ce projet, nous avons pu analyser l'impact de la modification de la profondeur de l'eau relâchée en simulant plusieurs scénarios de relâches d'eau à l'aide du modèle statistique, qui est rarement utilisé pour simuler la température du lac, avec un degré de précision raisonnable. Les résultats de la prévision de la température de l'eau en aval des trois autres réservoirs avec rejet en surface à l'aide du modèle statistique sont cohérents avec ceux de Jason et al. 2015, qui ont utilisé un modèle linéaire généralisé (GLM), un modèle statistique plus avancé, pour prédire les attributs quotidiens de la température de l'eau du fleuve Sacramento, le plus grand cours d'eau de la Californie. Le débit de la rivière Sacramento est contrôlé par le barrage de Shasta. Pour déterminer l'impact du barrage et des variables atmosphériques, ils ont étudié des caractéristiques telles que la plage de température quotidienne, la probabilité de dépassement du seuil et le nombre d'heures de dépassement. Ils ont conclu à une corrélation positive entre les variables atmosphériques et la température de l'eau et à une corrélation négative entre le débit à l'exutoire du barrage et la température de la rivière (Caldwell et al. 2015). Le modèle GLM a donc nécessité plus d'intrants que le modèle statistique utilisé dans le présent projet, sans toutefois permettre une performance nettement supérieure. Le modèle statistique a généré la température de l'eau de surface en aval des lacs Long et Trousers avec des valeurs RMSE acceptables.

### **5.3 Implications écologiques du réchauffement de la température de Tobique**

En raison de l'impact de la température de l'eau sur le stade de reproduction des poissons, l'étude des effets du régime thermique fluvial sur la période de frai et d'éclosion des poissons a une longue histoire (Embody 1934; Gunnes 1979). Les résultats de ce projet sont cohérents avec les conclusions de (Crisp 1981; Pauly et Pullin 1988), qui montrent qu'à des températures élevées, le temps d'éclosion est raccourci. La perturbation de la température est connue comme un facteur essentiel affectant la reproduction et l'éclosion précoce des poissons d'eau froide.

Nous avons conclu que le saumon atlantique et l'omble de fontaine pourraient être affectés par les barrages lorsque les nids de ponte sont situés à proximité des barrages en aval. En effet, les œufs de poisson sont très sensibles à la température de l'eau, et des changements de température inattendus augmenteraient fortement leur vulnérabilité. En s'éloignant des barrages, les effets négatifs sont réduits, et les poissons (en particulier leurs œufs) sont moins menacés par le changement du régime thermique des barrages.

La rivière Tobique devrait subir des changements thermiques relativement élevés selon le scénario de changement climatique RCP8.5, qui est caractérisé comme le scénario d'émissions de gaz à effet de serre le plus pessimiste. En raison de l'augmentation prévue de la température de l'air d'ici 2100, en hiver et au printemps la fonte des neiges devrait commencer plus tôt, ce qui peut non seulement affecter directement le débit (Milner et al. 2009) des rivières et la date de la crue printanière, mais aussi perturber la variabilité et la tendance de la température de l'eau dans le bassin versant (McCabe et Clark 2005; Stewart et al. 2005). On prévoit que les débits d'été dans de nombreux bassins versants diminueront et que la température de l'eau augmentera (Berthot et al. 2021; Morales-Marín et al. 2019; Palmer et al. 2009b). Nos simulations corroborent ces prévisions. Les résultats sont cohérents avec d'autres recherches qui ont suggéré des tendances significatives de réchauffement des rivières dues au changement climatique (Dugdale et al. 2018 ; Durance et Ormerod 2009; Merriam et al. 2017).

Pour le saumon atlantique et l'omble de fontaine, le moment de l'éclosion et de l'émergence dépend de la période de frai et de la température de l'eau pendant l'incubation des œufs. D'après les résultats du calcul des degrés-jours, la température moyenne augmentera en raison du changement climatique, ce qui entraînera des changements dans les facteurs essentiels au moment de l'émergence et pourrait modifier le moment optimal de l'éclosion avec une éclosion précoce. Cela pourrait avoir un effet négatif sur le cycle de vie du saumon atlantique et de l'omble de fontaine, comme augmenter la mortalité au stade de développement embryonnaire (Gunnes 1979; Martin et al. 2017), en particulier près de l'émergence lorsque les alevins commencent à



se nourrir (Jonsson et Jonsson 2009). L'augmentation de la température de l'eau peut décaler la date de frai ou certains individus pourraient réagir en changeant les sites de frai (Jonsson et Jonsson 2009).

#### **5.4 Limites et travaux futurs**

Cette étude a permis d'identifier les conditions thermiques de la rivière régulée. Bien que les résultats de température des modèles couplés indiquent une performance adéquate, la précision du modèle n'est pas garantie (De Kok et Booij 2009). Par exemple, dans l'étude de De Kok et Booij (2009) ils ont couplé un modèle déterministe pluie-débit à un modèle statistique pour la végétation des plaines inondables. La précision des deux modèles était différente en raison de la différence de nature des deux modèles, et le modélisateur a dû relever des défis pour adapter les deux modèles afin qu'ils soient utilisables. En outre, l'application d'analyses de sensibilité et d'incertitude n'a pas été concluante pour déterminer si la précision du modèle déterministe pluie-débit correspond à la précision d'entrée requise pour le modèle statistique de végétation. Cette ambiguïté provient du fait que les résultats déterministes du modèle pluie-débit ont été transformés en paramètres statistiques avant leur utilisation dans le modèle de végétation. En plus de la propagation de l'erreur associée au couplage des modèles, la limitation des données d'entrée (i.e., des séries chronologiques de température en réservoir relativement courtes) utilisées pour l'étalonnage du modèle statistique est considérée comme une source d'erreur susceptible d'augmenter l'incertitude.

Outre l'incertitude concernant le scénario de changement climatique RCP8.5, qui est une prédiction basée sur divers facteurs à l'origine du changement climatique, tels que l'industrialisation et les gaz à effet de serre, d'autres erreurs peuvent augmenter l'erreur de projection. Par exemple, les débits sortants du barrage ont été utilisés comme condition aux limites. Il est possible que le régime d'écoulement des barrages change également sous l'effet des réglementations futures sur les barrages et des conditions climatiques. Les scénarios futurs, basés sur les règles de gestion actuelles de ces barrages ont donc une certaine limite dans leur interprétation.

Étudier la longévité de la couverture de glace sur chaque réservoir et sa susceptibilité au changement climatique présente un sujet d'étude intéressant. Malheureusement, les informations disponibles n'ont pas été suffisantes pour entreprendre une étude approfondie sur ce sujet. De plus, CEQUEAU ne rend pas explicitement compte d'une couverture de glace sur les lacs et réservoirs. Leur contribution aux débits fluviaux est simplement basée sur les niveaux dans les

réservoirs respectifs. Dans le modèle de température, les flux de chaleur commencent à être calculés lorsque la température de l'air dépasse 0 °C. Auparavant, la température de la rivière est supposée être nulle.

Les perspectives de travaux futurs liés à cette étude sont :

- Utiliser un modèle déterministe pour simuler le lac Serpentine à différentes profondeurs et comparer les résultats à ceux du modèle statistique.
- Fournir des données sur la température de l'eau des débits sortant du barrage et des réservoirs pendant une période plus longue pour augmenter la fiabilité du modèle en le calibrant sur de plus longues séries chronologiques.
- Utiliser plusieurs scénarios de changement climatique et de multiples scénarios de relâche d'eau pour estimer divers régimes thermiques possibles de la rivière Tobique dans différentes conditions climatiques futures.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

---

Ahmadi-Nedushan, B, St-Hilaire, A, Ouarda, TBMJ, Bilodeau, L, Robichaud, E, Thiémonge, N and Bobée, B. 2007. Predicting river water temperatures using stochastic models: case study of the Moisie River (Québec, Canada). *Hydrological Processes: An International Journal* 21(1):21-34.

Armitage, PD. 1984. Environmental changes induced by stream regulation and their effect on lotic macroinvertebrate communities. *Regulated Rivers*. Edited by Lillehammer, A and Saltveit, SJ. University of Oslo, Oslo, Norway.

Armstrong, JD, Kemp, PS, GJA Kennedy, Ladle, M, and Milner, NJ. 2003. Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries research* 62(2):143-170.

Audet, C, and John Dennis, EJr. 2002. Analysis of generalized pattern searches. *SIAM Journal on optimization* 13(3):889-903.

Berthot, L, St-Hilaire, A, Caissie, D, El-Jabi, N, Kirby, J, and Ouellet-Proulx, S. 2021. Environmental flow assessment in the context of climate change: a case study in Southern Quebec (Canada). *Journal of Water and Climate Change* 12(8):3617-3633.

Blanchfield, PJ, and Ridgway, MS. 1997. Reproductive timing and use of redd sites by lake-spawning brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54(4):747-756.

Bloomfield, JP, Williams, RJ, Goody, DC, Cape, JN, and Guha, PM. 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater—a UK perspective. *Science of the total Environment* 369(1-3):163-177.

Brännäs, E. 1988. Emergence of Baltic salmon, *Salmo salar* L., in relation to temperature: a laboratory study. *Journal of fish biology* 33(4):589-600.

Caissie, D, El-Jabi, N and Satish, MG. 2001. Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures. *Journal of hydrology* 251(1-2):14-28.

Caissie, D, El-Jabi, N, and St-Hilaire, A. 1998. Stochastic modelling of water temperatures in a small stream using air to water relations. *Canadian Journal of Civil Engineering* 25(2):250-260.

Caissie, D, Satish, MG, and El-Jabi, N. 2007. Predicting water temperatures using a deterministic model: Application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Journal of Hydrology* 336(3-4):303-315.

Caissie, D, Satish, MG, and El-Jabi, N. 2005. Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Hydrological Processes: An International Journal* 19(11):2137-2159.

Calado, R, Mota, VC, Madeira, D, and Leal, MC. 2021. Summer is coming! tackling ocean warming in atlantic salmon cage farming. *Animals* 11(6):1800.

Caldwell, J, Balaji, R, and Danner, E. 2015. Statistical modeling of daily water temperature attributes on the Sacramento River. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(5):04014065.

Charbonneau, R, Fortin, JP, and Morin, G. 1977. The CEQUEAU model : description and examples of its use in problems related to water resource management/Le modèle CEQUEAU : description et exemples d'utilisation dans le cadre de problèmes reliés à l'aménagement. *Hydrological Sciences Journal* 22(1):193-202.

Xiaonan, C, Vanclay, F, and Yu, J. 2021. Evaluating Chinese policy on post-resettlement support for dam-induced displacement and resettlement. *Impact Assessment and Project Appraisal* 39(5):396-404.

Chen, YD, Carsel, RF, McCutcheon, SC, and Nutter, WL. 1998. Stream temperature simulation of forested riparian areas: I. Watershed-scale model development. *Journal of Environmental Engineering* 124(4):304-315.

Chenard, JF, and Caissie, D. 2008. Stream temperature modelling using artificial neural networks: application on Catamaran Brook, New Brunswick, Canada. *Hydrological Processes: An International Journal* 22(17):3361-3372.

Yifan, C, Voisin, N, Yearsley, JR, and Nijssen, B. 2020. Reservoirs modify river thermal regime sensitivity to climate change: a case study in the southeastern United States. *Water Resources Research* 56(6): e2019WR025784.

Couillard, D, Cluis, D, and Morin, G. 1988. An extension of the grid-based hydrological model CEQUEAU to suspended sediment movement through drainage basins. *Water Research* 22(8):991-999.

Crisp, DT. 1981. A desk study of the relationship between temperature and hatching time for the eggs of five species of salmonid fishes. *Freshwater biology* 11(4):361-368.

Cunjak, RA, and Power, G. 1986. Winter habitat utilization by stream resident brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and brown trout (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 43(10):1970-1981.

Curry, RA, David AS, and Keith DC. 2002. The thermal regimes of brook trout incubation habitats and evidence of changes during forestry operations. *Canadian Journal of Forest Research* 32(7):1200-1207.

Daufresne, M, Bady, P, and Fruget, JF. 2007. Impacts of Global Changes and Extreme Hydroclimatic Events on Macroinvertebrate Community Structures in the French Rhône River. *Oecologia* 151:544–559

De Kok, JL, and Booij, MJ. 2009. Deterministic-statistical model coupling in a DSS for river-basin management. *Environmental Modeling & Assessment* 14:595-606.

Domisch, S, Jaehnig, SC, and Haase, P. 2011. Climate-change winners and losers: Stream macroinvertebrates of a submontane region in Central Europe. *Freshwater Biology* 56(10):2009-2020.

Dubos, V, and St-Hilaire, A. 2019. Mactaquac Aquatic Ecosystem Study Report Series 2019-064, INTERIM REPORT: Tobique River Temperature Monitoring and Modelling.

Dugdale, SJ, Curry, RA, St-Hilaire, A, and Andrews, SN. 2018. Impact of future climate change on water temperature and thermal habitat for keystone fishes in the lower Saint John River, Canada. *Water Resources Management* 32(15):4853-4878.

Dugdale, SJ, Franssen, J, Corey, E, Bergeron, NE, Lapointe, M, and Cunjak, RA. 2016. Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecology of Freshwater Fish* 25(3):429-445.

Dugdale, SJ, Hannah, DM, and Malcolm, LA. 2017a. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth-Science Reviews* 175:97-113.

Dugdale, SJ, St-Hilaire, A, and Curry, RA. 2017b. Automating drainage direction and physiographic inputs to the CEQUEAU hydrological model: sensitivity testing on the lower Saint John River watershed, Canada. *Journal of Hydro informatics* 19(3):469-492.

Durance, I, and Ormerod, SJ. 2009. Trends in water quality and discharge confound long-term warming effects on river macroinvertebrates. *Freshwater Biology* 54(2):388-405.

Elliott, JM, and Elliott, JA. 1995. The effect of the rate of temperature increase on the critical thermal maximum for parr of Atlantic salmon and brown trout. *Journal of fish biology* 47(5):917-919.

Elliott, JM, and 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.

Embrey, GC. 1934. Relation of temperature to the incubation periods of eggs of four species of trout. *Transactions of the American Fisheries Society* 64(1):281-292.

Xing, F, and Stefan, HG. 1996. Long-term Lake water temperature and ice cover simulations/measurements. *Cold Regions Science and Technology* 24(3):289-304.

Finlay, JC. 2003. Controls of stream water dissolved inorganic carbon dynamics in a forested watershed. *Biogeochemistry* 62(3):231-252.

Gualtieri, C, Gualtieri, P. and Doria, GP. 2002. Dimensional analysis of reaeration rate in streams. *Journal of Environmental Engineering* 128(1):12-18.

Gunnes, K. 1979. Survival and development of Atlantic salmon eggs and fry at three different temperatures. *Aquaculture* 16(3):211-218.

Hannah, DM, and Garner, G. 2015. River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Progress in Physical Geography* 39(1):68-92.

Heggberget, TG. 1988. Timing of spawning in Norwegian Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45(5):845-849.

Hersbach, H, Bell, B, Berrisford, P, Hirahara, S, Horányi, A, Muñoz-Sabater, J, Nicolas, J, Peubey, C, Raluca Radu, and Schepers, D. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730):1999-2049.

Hill, RA, Hawkins, CP, and Jin, J. 2014. Predicting thermal vulnerability of stream and river ecosystems to climate change. *Climatic change* 125(3):399-412.

Midhat, M, and Stefan, HG. 1993. Lake water temperature simulation model. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(11):1251-1273.

Jacob, D, Teichmann, C, Sobolowski, S, Katragkou, E, Anders, I, Belda, M, Benestad, R, Boberg, F, Buonomo, E, and Cardoso, RM. 2020. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional environmental change* 20(2):1-20.

Jeong, DI, Daigle, A, and St-Hilaire, A. 2013. Development of a stochastic water temperature model and projection of future water temperature and extreme events in the Ouelle River basin in Québec, Canada. *River Research and Applications* 29(7):805-821.

Jonsson, B, and 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.

Joss, J, and Resele, G. 1987. Mathematical modelling of the heat exchange between a river and the atmosphere. In *Interactions between Energy Transformations and Atmospheric Phenomena. A Survey of Recent Research*. Pp. 27-40: Springer.

Justice, C, White, SM, McCullough, DA, Graves, and MN, Blanchard. 2017. Can stream and riparian restoration offset climate change impacts to salmon populations? *Journal of Environmental Management* 188:212-227.

Lessard, JL, and Hayes, DB. 2003. Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. *River research and applications* 19(7):721-732.

Li, D, Dorber, M, Barbarossa, V, and Verones, F. 2022. Global characterization factors for quantifying the impacts of increasing water temperature on freshwater fish. *Ecological Indicators* 142:109201.

MacCrimmon, HR, Hugh R, and Gots, BR. 1979. World distribution of Atlantic salmon, *salmo solar*. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 36(4):422-457.

Maheu, A, St-Hilaire, A, Caissie, D, and El-Jabi, N. 2016. Understanding the thermal regime of rivers influenced by small and medium size dams in Eastern Canada. *River Research and Applications* 32(10):2032-2044.

Martin, BT, Pike, A, John, SN, Hamda, N, Roberts, J, Lindley, ST, and Danner, EM. 2017. Phenomenological vs. biophysical models of thermal stress in aquatic eggs. *Ecology Letters* 20(1):50-59.

MathWorks, The. 2015 MATLAB R2015a. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc.

Matsumoto, K, Hashioka, T, and Yamanaka, Y. 2007. Effect of temperature-dependent organic carbon decay on atmospheric pCO<sub>2</sub>. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 112(G2).



McCabe, GJ, and Clark, MP. 2005. Trends and variability in snowmelt runoff in the western United States. *Journal of Hydrometeorology* 6(4):476-482.

McCuen, RH, Knight, Z, and Cutter, AG. 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of hydrologic engineering* 11(6):597-602.

McKnight, PE, and Najab, J. 2010. Mann-Whitney U Test. *The Corsini encyclopedia of psychology*:1-1.

Merriam, ER, Rodrigo F, Petty, JT, and Zegre, N. 2017. Can brook trout survive climate change in large rivers? If it rains. *Science of the Total Environment* 607:1225-1236.

Milner, AM, Brown, LE and Hannah, DM. 2009. Hydroecological response of river systems to shrinking glaciers. *Hydrological Processes: An International Journal* 23(1):62-77.

Mitchell, S. 1999. A Simple Model for Estimating Mean Monthly Stream Temperatures After Riparian Canopy Removal. *Environmental Management* 24(1):77-83.

Mohseni, O, Heinz GS, and Erickson, TR. 1998. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research* 34(10):2685-2692.

Mooij, WM, Domis, LNDS, and Hülsmann, S. 2008. The impact of climate warming on water temperature, timing of hatching and young-of-the-year growth of fish in shallow lakes in the Netherlands. *Journal of Sea Research* 60(1-2):32-43.

Morales-Marín, LA, Rokaya, P, Sanyal, PR, Sereda, J, and 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.

Moriasi, DN, Arnold, JG, Van Liew, MW, Bingner, RL, Harmel, RD, and Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900.

Morin, G, and Couillard, D. 1990. Predicting River temperatures with a hydrological model. *Encyclopedia of Fluid Mechanics: Surface and Groundwater Flow Phenomena*: Volk Gulf Publishing Company, Houston, Tex. PP. 171-209 (Chapter 5).

Morrison, SM, Mackey, TE, Durhack, T, Jeffrey, JD, Wiens, LM, Mochnacz, NJ, Hasler, CT, Enders, EC, Treberg, JR, and Jeffries, KM. 2020. Sub-lethal temperature thresholds indicate acclimation and physiological limits in brook trout *Salvelinus fontinalis*. *Journal of Fish Biology* 97(2):583-587.

Nelson, KC, and Palmer, MA. 2007. Stream temperature surges under urbanization and climate change: data, models, and responses 1. *JAWRA journal of the American water resources association* 43(2):440-452.

O'sullivan, AM, Corey, E, Cunjak, RA, Linnansaari, T, and Curry, RA. 2021. Salmonid thermal habitat contraction in a hydrogeologically complex setting. *Ecosphere* 12(10):e03797.

O'sullivan, AM, Devito, KJ, Ogilvie, J, Linnansaari, T, Pronk, T, Allard, S, and Curry, RA. 2020. Effects of topographic resolution and geologic setting on spatial statistical river temperature models. *Water Resources Research* 56(12):e2020WR028122.

Olden, JD, and Naiman, RJ. 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology* 55(1):86-107.

Ottosson, F, and Abrahamsson, O. 1998. Presentation and analysis of a model simulating epilimnetic and hypolimnetic temperatures in lakes. *Ecological Modelling* 110(3):233-253.

Palmer, MA, Lettenmaier, DP, Poff, NL, Postel, SL, Richter, B, and Warner, R. 2009a. Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options. *Environ Manage* 44(6):1053-68.

Palmer, MA, Lettenmaier, DP, Poff, NL, Postel, SL, Richter, B, and Warner, R. 2009b. Climate change and river ecosystems: protection and adaptation options. *Environmental management* 44(6):1053-1068.

Pauly, D, and Pullin, RSV. 1988. Hatching time in spherical, pelagic, marine fish eggs in response to temperature and egg size. *Environmental biology of fishes* 22:261-271.

Peterson, RH, Spinney, HCE, and Sreedharan, A. 1977. Development of Atlantic salmon (*Salmo salar*) eggs and alevins under varied temperature regimes. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 34(1):31-43.

Politano, M, Haque, MDM, and Weber, LJ. 2008. A numerical study of the temperature dynamics at McNary Dam. *Ecological Modelling* 212(3-4):408-421.

Poole, GC, and 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.

Power, G. 1980. The brook trout, *Salvelinus fontinalis*. In: Balon, E.K. (ed.), *Charrs, Salmonid Fishes of the Genus Salvelinus*. Dr. W. Junk Publishers, The Hague, Netherlands, pp. 141-203.

Preece, RM, and 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.

Qiu, Rujian, Dong Wang, Vijay P Singh, Hui Zhang, Yuwei Tao, Jichun Wu, and Yuankun Wang. 2022. Ecological responses of spawning habitat suitability to changes in flow and thermal regimes influenced by hydropower operation. *Ecohydrology*:e2507.

Qiu, R, Wang, Y, Rhoads, B, Wang, D, Qiu, W, Tao, Y, and Wu, J. 2021. River water temperature forecasting using a deep learning method. *Journal of Hydrology* 595:126016.

Quinn, JM, Steele, GL, Hickey, CW, and Vickers, ML. 1994. Upper thermal tolerances of twelve New Zealand stream invertebrate species. *New Zealand journal of marine and freshwater research* 28(4):391-397.

Riahi, K, Rao, S, Krey, V, Cho, C, Chirkov, V, Fischer, G, Kindermann, G, Nakicenovic, N, and Rafaj, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic change* 109(1):33-57.

Richards, K, Sharp, M, Arnold, N, Gurnell, A, Clark, M, Tranter, M, Nienow, P, Brown, G, Willis, I, and Lawson, W. 1996. An integrated approach to modelling hydrology and water quality in glacierized catchments. *Hydrological Processes* 10(4):479-508.

Robinson, J. 2008. Effects of summer thermal conditions on brook trout (*Salvelinus fontinalis*) in an unstratified Adirondack Lake. Master's thesis. Cornell University, Ithaca, New York.

Santos, L, Thirel, G, and Perrin, C. 2018a. Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(8):4583-4591.

Schwalm, CR, Glendon, S, and Duffy, PB. 2020. RCP8. 5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(33):19656-19657.

Scott, WB, and Crossman, EJ. 1964. Fishes occurring in the fresh waters of insular Newfoundland. Queen's Printer, Ottawa.

Scott, William Beverley, and Mildred Grace Scott. 1988. Atlantic fishes of Canada. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, PP. 219-731.

Seyedhashemi, H, Moatar, F, Vidal, JP, Diamond, JS, Beaufort, A, Chandesris, A, and 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.

Sinokrot, B A, and Heinz GS. 1993. Stream temperature dynamics: measurements and modeling. *Water resources research* 29(7):2299-2312.

St-Hilaire, A, Boucher, MA, Chebana, F, Ouellet-Proulx, S, Xiao Zhou, Q, Larabi, S, Dugdale, S, and Latraverse, M. 2015 Breathing a new life to an older model: The CEQUEAU tool for flow and water temperature simulations and forecasting. *Proceedings of the 22nd Canadian Hydrotechnical Conference*, 2015.

St-Hilaire, A, Morin, G, El-Jabi, N, and Caissie, D. 2000. Water temperature modelling in a small, forested stream: implication of forest canopy and soil temperature. *Canadian Journal of Civil Engineering* 27(6):1095-1108.

Steel, EA, Beechie, TJ, Torgersen, CE, and Fullerton, AE. 2017. Envisioning, quantifying, and managing thermal regimes on river networks. *BioScience* 67(6):506-522.

Steel, EA, and Lange, IA. 2007. Using wavelet analysis to detect changes in water temperature regimes at multiple scales: Effects of multi-purpose dams in the Willamette River basin. *River Research and Applications* 23(4):351-359.

Heinz, S, and Ford, DE. 1975. Temperature dynamics in dimictic lakes. *Journal of the Hydraulics Division* 101(1):97-114.

Stewart, IT, Cayan, DR, and Dettinger, MD. 2005. Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *Journal of climate* 18(8):1136-1155.

Trépanier, S, Rodriguez, MA, and Magnan, P. 1996. Spawning migrations in landlocked Atlantic salmon: time series modelling of river discharge and water temperature effects. *Journal of Fish Biology* 48(5):925-936.

Wallace, JC, and Heggberget, TG. 1988. Incubation of eggs of Atlantic salmon (*Salmo salar*) from different Norwegian streams at temperatures below 1°C. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45(1):193-196.

Wang, DC, Zhang, X, Huang, Y, Wang, X, Zhang, W, Cao, ZJ, Xin, Y, and Qu, M. 2021. Comparative Study on Temperature Response of Hydropower Development in the Dry-Hot Valley. *GeoHealth* 5(7):e2021GH000438.

Webb, BW, and Nobilis, F. 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrological Sciences Journal* 52(1):74-85.

Webb, BW, Hannah, DM, Moore, RD, Brown, LE, and Nobilis, F. 2008. Recent advances in river and stream temperature. *Hydrological Process* 22:902-918.

Wilbur, NM, O'Sullivan, AM, MacQuarrie, KTB, Linnansaari, T, and Curry, AR. 2020. Characterizing physical habitat preferences and thermal refuge occupancy of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) at high river temperatures. *River Research and Applications* 36(5):769-783.

Yang, R, Wu, S, Wu, X, Ptak, M, Li, X, Sojka, M, Graf, R, Dai, J, and Zhu, S. 2022. Quantifying the impacts of climate variation, damming, and flow regulation on river thermal dynamics: a case study of the Włocławek Reservoir in the Vistula River, Poland. *Environmental Sciences Europe* 34(1):1-11.

Yi, Y, Wang, Z, and Yang, Z. 2010. Two-dimensional habitat modeling of Chinese sturgeon spawning sites. *Ecological Modelling* 221(5):864-875.

Zaidel, PA, Roy, AH, Houle, KM, Lambert, B, Letcher, BH, Nislow, KH, and Smith, K. 2021. Impacts of small dams on stream temperature. *Ecological Indicators* 120:106878.

Zarri, LJ, Danner, EM, Daniels, ME, and Palkovacs, EP. 2019. Managing hydropower dam releases for water users and imperiled fishes with contrasting thermal habitat requirements. *Journal of Applied Ecology* 56(11):2423-2430.

Zhang, X, Fang, C, Wang, Y, Lou, X, Su, Y, and Huang, D. 2022. Review of Effects of Dam Construction on the Ecosystems of River Estuary and Nearby Marine Areas. *Sustainability* 14(10):5974.

Zhu, S, and Piotrowski, AP. 2020. River/stream water temperature forecasting using artificial intelligence models: a systematic review. *Acta Geophysica* 68(5):1433-1442.