



Étude de l'impact des changements climatiques sur les lacs et les rivières du Nunavik :

**Indicateurs biologiques proposés pour le touladi (*Salvelinus namaycush*)
et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*)**

par

**Valérie Ouellet¹, Claude Bélanger², André St-Hilaire², Victor Duchesne²,
Véronique Dubos² et Yves Gratton²**

¹ Institute of Global Innovation, University of Birmingham, Birmingham, UK

² INRS-Eau, terre et environnement, Québec, Canada

Version finale déposée le 1^{er} mai 2020



**Institut national
de la recherche
scientifique**

Ce rapport doit être cité comme suit.

Ouellet, V., C. Bélanger, A. St-Hilaire, V. Duchesne, V. Dubos et Y. Gratton, 2020. Étude de l'impact des changements climatiques sur les lacs et les rivières du Nunavik : Indicateurs biologiques proposés pour le touladi (*Salvelinus namaycush*) et l'omble chevalier (*Salvelinus Alpinus*). Rapport R1932, INRS-Eau, terre et environnement, Québec, Qc, 25 p.

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2022
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-958-6 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2022

Table des matières

Liste des tableaux.....	4
Liste des figures	5
1. Introduction	6
2. Métriques (indices thermiques) utilisées	7
3. Justifications des métriques	10
4. Indicateurs biologiques proposés.....	12
5. Exemples de représentations graphiques possibles	14
6. Sommaire et Conclusions	21
Postface	22
Références.....	23

Liste des tableaux

Tableau 1. Métriques thermiques pour trois stades de vie du touladi et de l'omble chevalier.....	7
Tableau 2. Seuils thermiques en °C pour chaque métrique du Tableau 1. Tous les seuils sont tirés de la littérature scientifique.....	8

Liste des figures

- Figure 1. Courbes des préférences thermiques pour l'incubation des œufs (en haut), la croissance des juvéniles (au centre) et les stress thermiques chez l'adulte (en bas) pour le touladi (à gauche) et l'omble chevalier (à droite). 9
- Figure 2. Température moyenne de la couche 0-5 m pour les mois de juin, juillet et août pour le lac-type LC4 et pour la période 2041-2070. Les pixels utilisés pour les sections nord-sud des prochaines figures sont identifiés par des astérisques. 14
- Figure 3. Profils du nombre de jours où la température est ≥ 18 °C pour le lac-type LC5 pour les cinq latitudes identifiées sur la Figure 2. La période 1981-2010 est représentée en bleue, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge. Si les seuils ne sont pas atteints pendant une période donnée, la couleur correspondante n'apparaîtra pas. 16
- Figure 4. Fraction du volume du lac-type LC5 entre 10 et 16 °C, soit la température favorable à la croissance des juvéniles (touladi). La période 1981-2010 est représentée en bleue, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge. 17
- Figure 5. Fraction du volume du lac-type LC4 avec une température favorable à la croissance des juvéniles utilisant le calcul avec pondération à cinq latitudes pour le touladi. Les valeurs des seuils de température utilisées sont 0, 10, 16 et 23.5 °C. La période 1981-2010 est représentée en bleue, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge. 18
- Figure 6. Fraction du volume du lac-type LC4 avec une température stressante pour les adultes. Le calcul utilise une pondération linéaire entre la limite de stress et la limite létale. Les seuils utilisés sont ceux du touladi : 18 et 23,5° C. La période 1981-2010 est représentée en bleue, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge. Si les seuils ne sont pas atteints pendant une période donnée, la couleur correspondante n'apparaîtra pas. 19
- Figure 7. Fraction de l'aire de fraie du lac-type LC5 sous les 2,5 m avec une température au fond comprise entre 6 et 14 °C pour le touladi. Les losanges indiquent la date du début de fraie estimée à partir de la température de surface. La période 1981-2010 est représentée en bleu. Pour les très grands lacs, il est possible qu'il n'y a jamais 100% du fond avec température favorable à la fraie. Dans cet exemple-ci, cela se produit au nord (panneau du haut) : il n'y aura alors pas de losange bleu. 20

1. Introduction

À la demande du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), nous avons identifié un certain nombre d'indicateurs physiques et biologiques susceptibles d'aider à l'interprétation des impacts des changements climatiques sur les lacs du Nunavik. Les indicateurs physiques sont décrits dans nos rapports précédents. Seuls les indicateurs biologiques sont considérés ici. Nous avons commencé par mettre à jour la revue de la littérature de Turcotte et al. (2017). Cette étape a conduit aux rapports de Duchesne (2020) sur le touladi et Dubos (2020) sur l'omble chevalier. À partir de ces rapports, nous avons proposé six métriques que nous décrirons plus loin. Ce rapport se veut une proposition de métriques servant à définir des indicateurs biologiques. Nous présentons ensuite des indicateurs biologiques basés sur chacune des métriques.

Les organismes ectothermes, comme les poissons, sont particulièrement sensibles aux changements de températures de leur habitat (e.g. Eaton and Scheller, 1996; Ficke et al., 2007). La température de l'eau influence non seulement la répartition et les déplacements des espèces (Isaak and Rieman, 2013; Keefer et al., 2009), mais aussi leur survie (Ayllón et al., 2013; Ouellet et al., 2010). En effet, la température de l'eau influence chaque étape du cycle de vie des poissons (reproduction, développement embryonnaire, date d'éclosion des œufs, croissance et comportement) (Breau et al., 2011; Corey et al., 2020; Elliott and Elliott, 2010; Frechette et al., 2018; Gaston et al., 2017; Hartman and Porto, 2014; Marten, 1992). Des conditions thermiques défavorables entraînent différentes conséquences allant d'un changement dans le comportement (recherche de refuge thermique, diminution du temps d'alimentation, etc.) (Dugdale et al., 2015; Fullerton et al., 2018), jusqu'au stress thermique qui affecte plutôt les fonctions métaboliques et cause ultimement la mort des individus lorsque les limites létales sont atteintes (Barton, 2002; Chadwick et al., 2015).

Comme chaque stade de vie peut être associé à des tolérances thermiques particulières (Chadwick et al., 2015; Whitney et al., 2016), l'utilisation d'indicateurs thermiques pour déterminer les changements dans les conditions d'habitats des poissons est une méthode souvent utilisée en écologie aquatique (Daigle et al., 2017; Imholt et al., 2013; Picard et al., 2003).

Les préférences thermiques pour les différents stades de vie du touladi et de l'omble chevalier ont été établies à partir des valeurs obtenues dans la littérature (Dubos, 2020; Duchesne, 2020). Autant que possible, les valeurs observées en milieu naturel ont été utilisées, mais pour certains stades, comme la survie des œufs, les valeurs trouvées dans la littérature ont principalement été déterminées lors d'expériences en laboratoire. Bien qu'établies sous des conditions optimales, il n'en demeure pas moins que ces préférences thermiques permettent de déterminer les conditions limites pour ces stades de vie. Les indices thermiques permettent d'étudier le potentiel de survie des poissons dans un contexte de changement climatique.

2. Métriques utilisées

Des métriques ont été définies pour les stades de vie du touladi et de l'omble chevalier. Les stades de vie considérés sont : 1) la reproduction (la période de fraie et la survie des œufs), 2) les juvéniles (croissance) et 3) les adultes (stress thermique, qui en retour influence la ponte et le recrutement). Les différentes métriques et leurs seuils thermiques associés sont présentés dans les Tableaux 1 et 2. Les courbes des préférences thermiques associées à chaque espèce sont présentées à la Figure 1.

Tableau 1. Métriques thermiques pour trois stades de vie du touladi et de l'omble chevalier.

Période critique	Description	Métrique
Reproduction	<ul style="list-style-type: none"> Indice de potentiel de fraie : aire du lac disponible (a) et date de début de la fraie (b) 	R1a R1b
	<ul style="list-style-type: none"> Indice de survie des œufs : aire pondérée du lac disponible pour l'incubation des œufs (incluant la température d'incubation optimale) 	R2
Juvenile (0+, 1+)	<ul style="list-style-type: none"> Indice de croissance du juvénile : fraction pondérée du lac potentiel pour la croissance (incluant la température de croissance optimale) 	J1
Adulte	<ul style="list-style-type: none"> Indice de mortalité : fraction du volume du lac qui atteint la température létale 	A1
	<ul style="list-style-type: none"> Indice de stress thermique : fraction pondérée du volume du lac avec des températures stressantes. 	A2

Tableau 2. Seuils thermiques en °C pour chaque métrique du Tableau 1. Tous les seuils sont tirés de la littérature scientifique.

Métrique	Touladi	Ombre Chevalier
R1	déclenchement < 11 habitat thermique: 6-15	déclenchement < 8 habitat thermique: 0,5-7
R2	0-3 = fonction croissante 3-5 = optimal de température 5-10 = fonction décroissante	0-3 = fonction croissante 3-6 = optimal de température 6-8 = fonction décroissante
J1	0-10 = fonction croissante 10-16 = optimal de température 16-23,5 = fonction décroissante	0-12 = fonction croissante 12-16 = optimal de température 16-21 = fonction décroissante
A1	23,5	24
A2	18-23,5 = fonction croissante 23,5 = limite létale	21-24 = fonction croissante 24 = limite létale

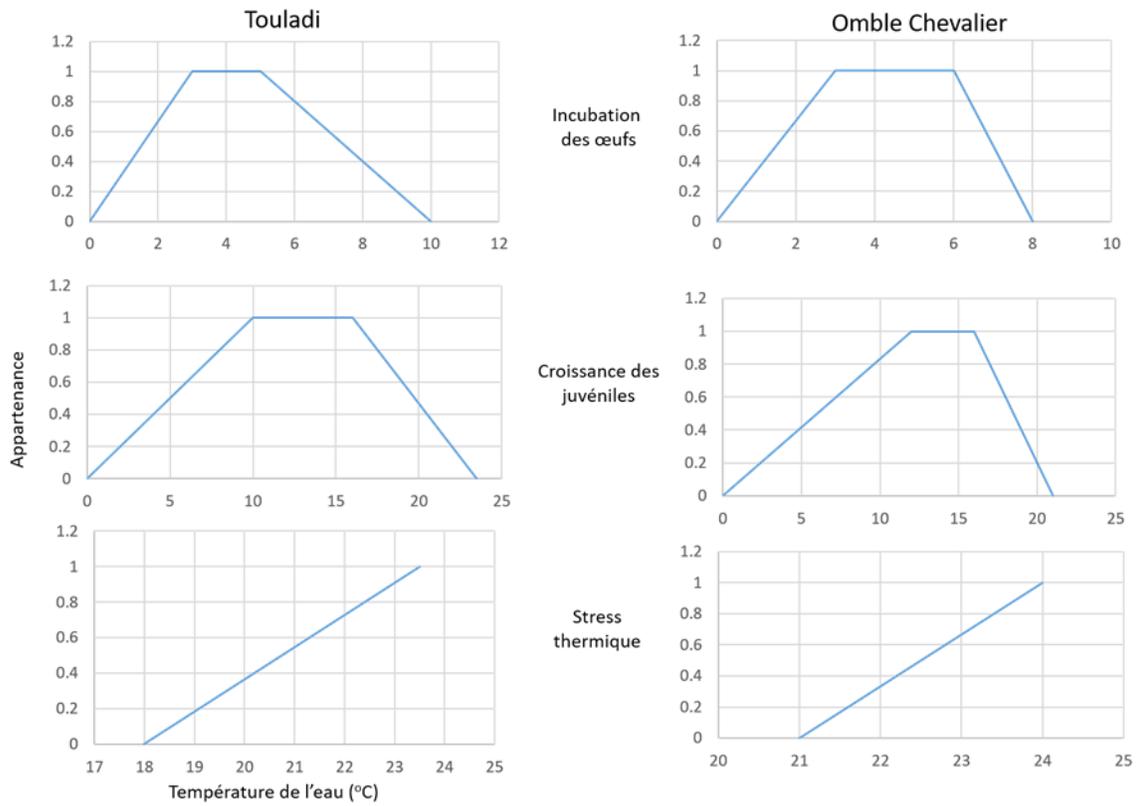


Figure 1. Courbes des préférences thermiques pour l'incubation des œufs (en haut), la croissance des juvéniles (au centre) et les stress thermiques chez l'adulte (en bas) pour le touladi (à gauche) et l'omble chevalier (à droite).

3. Justifications des métriques

Nous présentons ici une justification du choix de chacune des métriques présentées dans les Tableaux 1 et 2.

- Reproduction R1a et R1b - Indice de potentiel de fraie : aire du lac disponible (m^2 par lac) (a) et date de début de la fraie (b).
Cette métrique permet d'établir les changements dans la superficie des aires avec une température favorable à la fraie ainsi que le changement de saisonnalité dans le début de la période de fraie. Une réduction drastique des aires de fraie peut entraîner une augmentation de la compétition pour celles-ci, de même qu'une réduction du succès de la reproduction. En ce qui a trait à la saisonnalité, elle permet de déterminer s'il y a un possible déplacement de la saison de reproduction dans le temps. Un changement dans la saisonnalité et de la durée de la période de reproduction peut avoir un impact sur la survie des œufs durant l'incubation ou encore sur la survie des 0+ si l'émergence est retardée ou devancée.
- Reproduction R2 - Indice de survie des œufs : fraction de l'aire disponible pour l'incubation des œufs (% ou m^2).
La mortalité des œufs augmente lorsque les températures se situent sous ou au-dessus des valeurs optimales. Les limites inférieures et supérieures sont basées majoritairement sur des études en laboratoire pour lesquelles un taux de mortalité de plus 80% a été observé. L'aire pondérée de l'habitat du lac disponible pour l'incubation des œufs permet donc de déterminer le potentiel de survie de ces derniers. La pondération permet de tenir compte du fait qu'il y a une plage de températures pour lesquelles la probabilité de survie de œufs passe de nulle à optimale, ou d'optimale à nulle.
- Juvénile J1 - Indice de croissance du juvénile : fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles et m^3 -jours avec température favorable accumulés sur une année.
Bien que d'autres facteurs comme l'abondance des proies, le risque de prédation, la compétition et la densité-dépendance puissent influencer la croissance des juvéniles, il est possible de déterminer des valeurs thermiques optimales pour la croissance en fonction de l'activité métabolique. La croissance des juvéniles est critique puisqu'elle peut permettre aux plus gros individus d'occuper les meilleurs habitats et d'éviter la prédation. Cette métrique permet d'évaluer le potentiel de survie pour les juvéniles en établissant la fraction pondérée du lac disponible pour leur croissance. Encore une fois, les volumes disponibles sont pondérés en fonction des valeurs optimales et valeurs limites.

- Adulte A1 - Indice de mortalité : nombre de jours consécutifs où la température maximale de l'eau est au-dessus de la limite létale.
Bien que cette métrique ne tienne pas compte du stress cumulatif (ex. diminution de l'oxygène dissous, etc.), elle permet d'établir une limite au-delà de laquelle une mortalité massive est normalement observée (plus de 80%). C'est d'ailleurs une variable communément utilisée pour évaluer la répartition potentielle des habitats et les effets des changements climatiques sur les populations de salmonidés qui ne sont généralement pas observés dans des habitats thermiques qui dépassent les valeurs létales établies, et ce qu'elles aient été déterminées par des observations en milieu naturel ou en laboratoire.
- Adulte A2 - Indice de stress thermique : fraction du lac avec des températures stressantes (m³ ou part du volume du lac).
Cette métrique permet d'établir la fraction du lac où les températures causent un stress thermique suffisant pour avoir des impacts métabiologiques (ex. arrêt de l'alimentation, réduction de l'efficacité du système immunitaire, augmentation de la production de corticostéroïdes, activation de gènes associés au stress thermiques et oxydatif, etc.), sans toutefois provoquer une mortalité massive. La valeur maximale est basée sur le seuil léthal, alors que la valeur inférieure a été déterminée en se basant sur des études qui observent soit un changement de comportement chez le poisson et des études qui ont mesuré des changements au niveau physiologique. Le volume est pondéré par une fonction croissante de stress thermique entre les valeurs limites.

4. Indicateurs biologiques proposés

Il existe plusieurs représentations graphiques possibles pour chacune des métriques proposées. Les représentations graphiques pour les aspects physiques ont été identifiées par le terme « indicateur physique » dans nos rapports précédents. Ici, elles seront identifiées par le terme « indicateur biologique », par analogie. Quelques exemples de représentations possibles sont illustrés à la section suivante (Section 5) : un exemple de cartographie (Figure 2) et cinq exemples de sections nord-sud (Figures 3, 4, 5, 6 et 7). Les cartes géographiques sont utilisées lorsqu'il est possible de produire un seul nombre par pixel pour chacun des lacs-types. Dans le présent contexte, l'indice de qualité de l'habitat thermique (IQHT) réfère à une méthode de calcul basée sur quatre seuils de température afin de déterminer la part du volume ou de l'aire avec une température favorable, comme sur la Figure 1. Il y a pondération linéaire des contributions pour les couches ayant une température entre les limites 1 et 2 et entre les limites 3 et 4 (température sous-optimale). L'utilisation de cartes géographiques n'est malheureusement pas toujours possible pour les indicateurs basés sur des IQHT pour lesquels plus d'une valeur seuil doit être utilisée. L'alternative proposée est de produire une section nord-sud. Dans les paragraphes suivants, nous proposons au moins un indicateur biologique par métrique. Lorsqu'il y en a plus d'un indicateur par métrique, les représentants du MFFP devront en choisir un ou les prioriser. Lorsque nous proposons plus d'un indicateur, l'indicateur que nous suggérons d'utiliser est toujours le premier de la liste.

Indicateur du potentiel de fraie : l'aire disponible (R1a)

Il y a au moins deux possibilités; il est possible d'en utiliser d'autres.

- a) Nous proposons de tracer une carte du nombre de jours à l'automne où 100 % de l'aire du fond sous 2,5 m atteint une température favorable à la fraie : 6-15 °C pour le touladi et 0,5-7 °C pour l'omble chevalier.
- b) Une autre possibilité est de tracer une section nord-sud en utilisant des séries temporelles du pourcentage de l'aire du lac avec une température près du fond favorable à la fraie, c'est-à-dire entre 6 et 15 °C pour le touladi et entre 0,5 et 7 °C pour l'omble chevalier.

Indicateur du potentiel de fraie : la date de début de la fraie (R1b)

Nous proposons de tracer une carte de la première occurrence automnale de la température de surface associée au déclenchement de la fraie : 11 °C pour le touladi et 8 °C pour l'omble chevalier.

Indicateur de la survie des œufs (R2)

Nous proposons deux indicateurs. Il y en a d'autres.

- a) Tracer une section nord-sud à cinq latitudes à partir des séries temporelles du pourcentage de l'aire du lac avec une température au fond favorable à la fraie.

Les valeurs seuils pour le touladi seraient 0, 3, 5 et 10 °C. Les valeurs seuils pour l'omble chevalier seraient 0, 3, 6 et 8 °C.

- b) Cartographier le pourcentage moyen en hiver de l'aire du fond du lac avec des températures favorables à l'incubation proposée en a) (moyenne entre le 1^{er} décembre et le 15 avril).

Indicateur de croissance des juvéniles (J1)

Nous proposons deux possibilités.

- a) Tracer une section nord-sud du pourcentage du volume du lac avec une température favorable à la croissance des juvéniles. L'indicateur utilisé pour le touladi serait basé sur les seuils 0, 10, 16, 23,5 °C, tandis que l'indicateur pour l'omble chevalier serait basé sur les seuils de températures 0, 12, 16, 21 °C.
- b) Tracer une carte du nombre de m³-jours avec une température favorable à la croissance des juvéniles (indicateur pour le touladi : 0, 10, 16, 23,5 °C; indicateur pour l'omble chevalier : 0, 12, 16, 21 °C).

Indicateur de mortalité (A1)

Nous avons tenté de tracer le nombre de jours consécutifs où la température maximale de l'eau est au-dessus de la limite létale. Il s'avère que notre modèle ne prévoit aucune journée où la température maximale des lacs sera au-dessus de 23,5 °C ni en 2041-2070 ni en 2071-2100.

Indicateur de stress thermique (A2)

Nous voyons ici trois possibilités.

- a) Tracer une section nord-sud du nombre de jours avec une température au-dessus de la limite de stress (profils), soit 18 °C pour le touladi et 21 °C pour l'omble chevalier.
- b) Tracer une section nord-sud du pourcentage du volume avec des températures au-dessus des seuils de stress (séries temporelles) en utilisant la fourchette 18-23,5 °C pour le touladi et la fourchette 21-24 °C pour l'omble chevalier. Les volumes cumulés sont pondérés linéairement entre la limite inférieure (x 0) et la limite supérieure (x 1).
- c) Tracer une carte de la maximale du volume du lac avec des températures stressantes pour le touladi (18-23,5 °C) et pour l'omble chevalier (21-24 °C). Les volumes cumulés sont pondérés linéairement entre la limite inférieure (x 0) et la limite supérieure (x 1).

5. Exemples de représentations graphiques possibles

À titre indicatif nous présentons dans cette section quelques exemples de représentations graphiques possibles sans toutefois tenter d'illustrer chacun des indicateurs biologiques. La distribution et la variabilité de certains indicateurs peuvent facilement être représentées à l'aide de cartes du Nunavik comme la température moyenne de la couche 0-5 m pour les mois de juin, juillet et août (Figure 2). D'autres indicateurs basés sur les courbes de croissance et les indices de l'habitat thermique sont plus difficilement représentables à l'aide de cartes comme celle de la Figure 2.

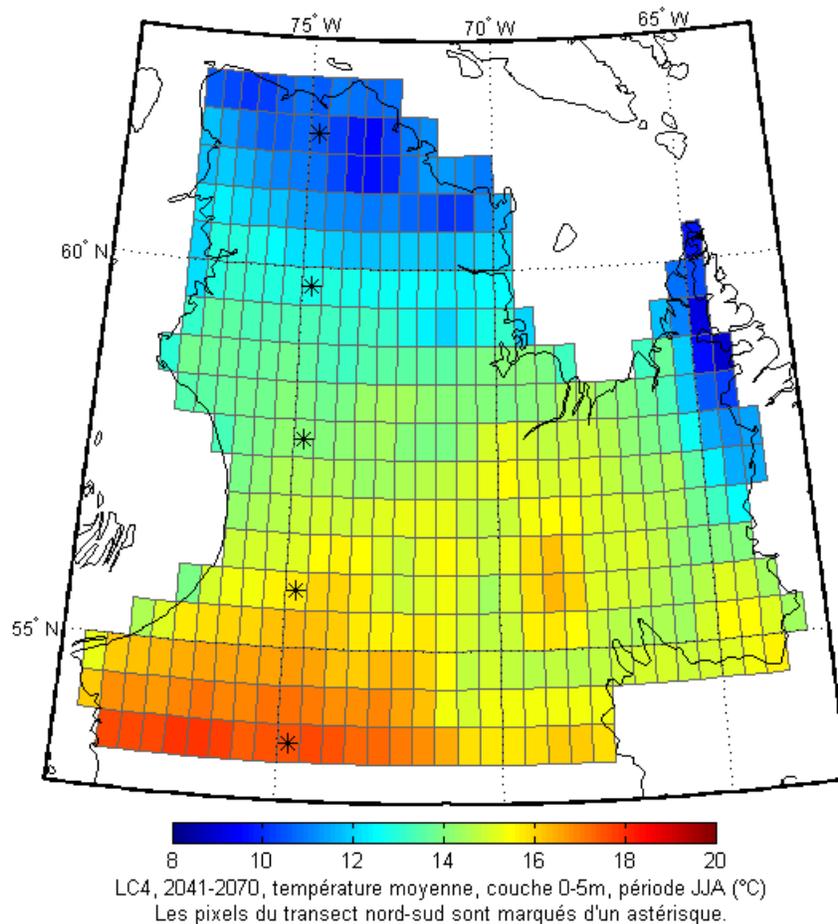


Figure 2. Température moyenne de la couche 0-5 m pour les mois de juin, juillet et août pour le lac-type LC4 et pour la période 2041-2070. Les pixels utilisés pour les sections nord-sud des prochaines figures sont identifiés par des astérisques.

Certaines autres représentations peuvent être utilisées dans le deuxième cas. Par exemple, il est possible de représenter le nombre de jours avec une température plus grande ou égale à 18°C à l'aide de sections le long d'une même longitude comme sur la Figure 3.

La distance entre les pixels choisis pour tracer cette section est de deux degrés de latitude, soit 222 km. On veut que les pixels choisis couvrent tout le domaine, du nord au sud, pour avoir une idée des variations sur tout le domaine. Il est possible de déplacer la section un peu à gauche (à l'ouest) ou à droite (à l'est). Une autre représentation possible est proposée à la Figure 4. On y présente ici la fraction du volume du lac entre 10 et 16 °C pour les périodes 1981-2010 (en bleu), 2041-2070 (en orange) et 2071-2100 (en rouge). Cette représentation possède l'avantage de présenter non seulement la fraction du volume mais aussi sa variabilité dans le temps. Les deux graphiques suivants (Figures 5 et 6), pour le touladi, présentent un IQHT (Figure 5) pour des valeurs seuils de 0, 10, 16 et 23,5 °C, ainsi que les seuils de stress thermique (Figure 6) basé sur des valeurs de 18 et 23,5 °C. Le dernier graphique (Figure 7) présente la fraction de l'aire de fraie du lac-type LC5 sous les 2,5 m avec une température au fond comprise entre 6 et 14 °C. Le jour du déclenchement de la fraie est estimé via la température de surface. Il s'agit en quelque sorte d'un genre de proxy pour la température dans la frayère. On considère que la fraie débute lorsque la température de surface passe sous le seuil trouvé dans la littérature (11 °C pour le touladi, 8 °C pour l'omble chevalier). Puisqu'il s'agit d'un proxy, il se peut que ces seuils conduisent à un certain écart avec la réalité sur le terrain, ces valeurs seuils ayant été dérivées d'observations de cas particuliers (emplacement du lac, bathymétrie, profondeur de la frayère, ...). Nous conserverons cette possibilité en tête lors de l'analyse des résultats. Ceux-ci donnent quand même une bonne idée des retards du début de la fraie dans le futur et on pourra en présumer certaines conséquences sur le recrutement. Dans la Figure 7, on a ajouté le jour du début de la fraie estimé à partir de la température de surface T_{start} (les losanges). On voit que le début de la fraie ainsi estimé survient toujours quelques jours après que 100% du fond a atteint une température favorable à la fraie. Donc, la température de surface est un peu plus élevée que T_{start} lorsque les conditions deviennent favorables sur 100% du fond. Pour les très grands lacs, il se peut qu'il n'y a jamais 100% du fond avec température favorable à la fraie, comme sur la Figure 7.

Les cartes ont l'avantage de présenter un portrait géographique d'un indicateur. Elles nécessitent cependant six figures pour chacun des sept lacs-types : trois horizons et trois figures pour présenter les différences entre les horizons. Les sections nord-sud ont donc un avantage sur les cartes : elles permettent de tracer les trois horizons (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100) sur la même figure : une économie de cinq figures.

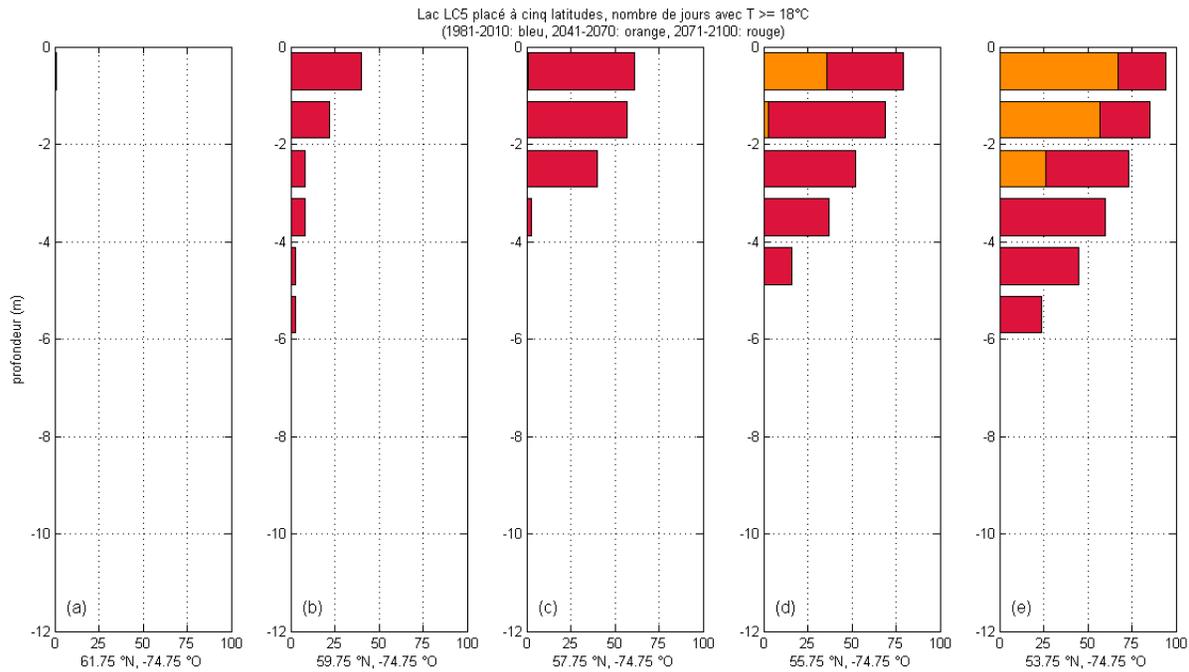


Figure 3. Profils du nombre de jours où la température est $\geq 18^\circ\text{C}$ pour le lac-type LC5 pour les cinq latitudes identifiées sur la Figure 2. La période 1981-2010 est représentée en bleu, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge. Si les seuils ne sont pas atteints pendant une période donnée, la couleur correspondante n'apparaîtra pas.

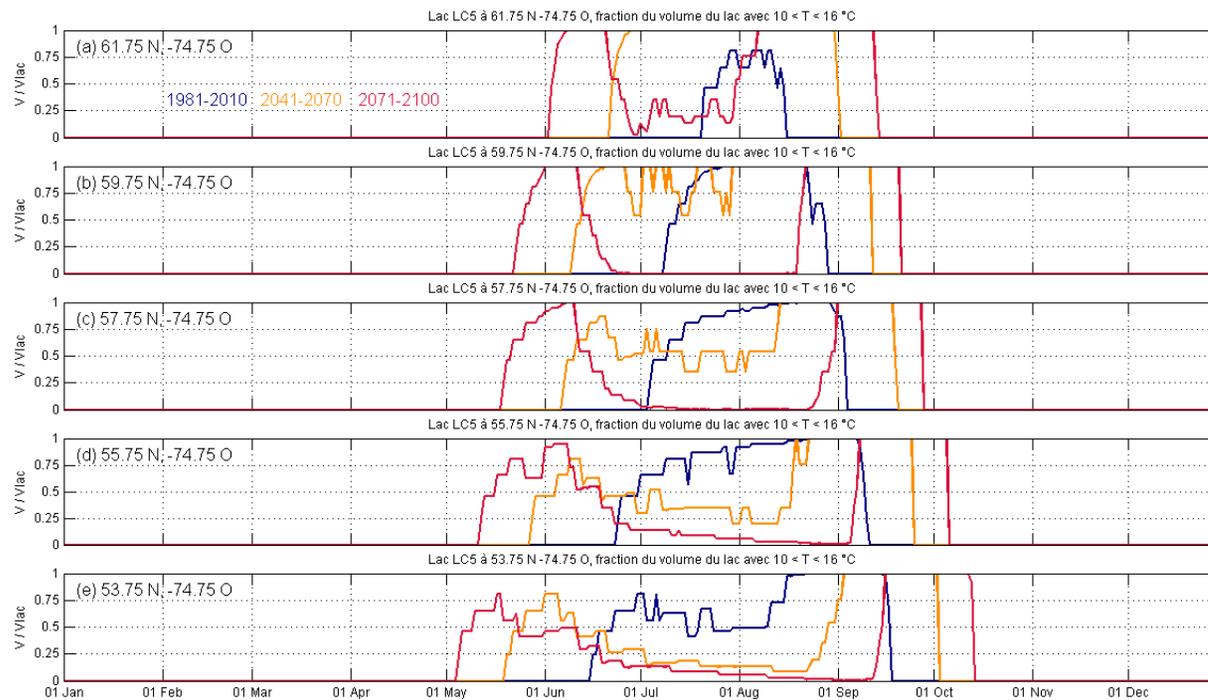


Figure 4. Fraction du volume du lac-type LC5 entre 10 et 16 °C, soit la température favorable à la croissance des juvéniles (touladi). La période 1981-2010 est représentée en bleu, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge.

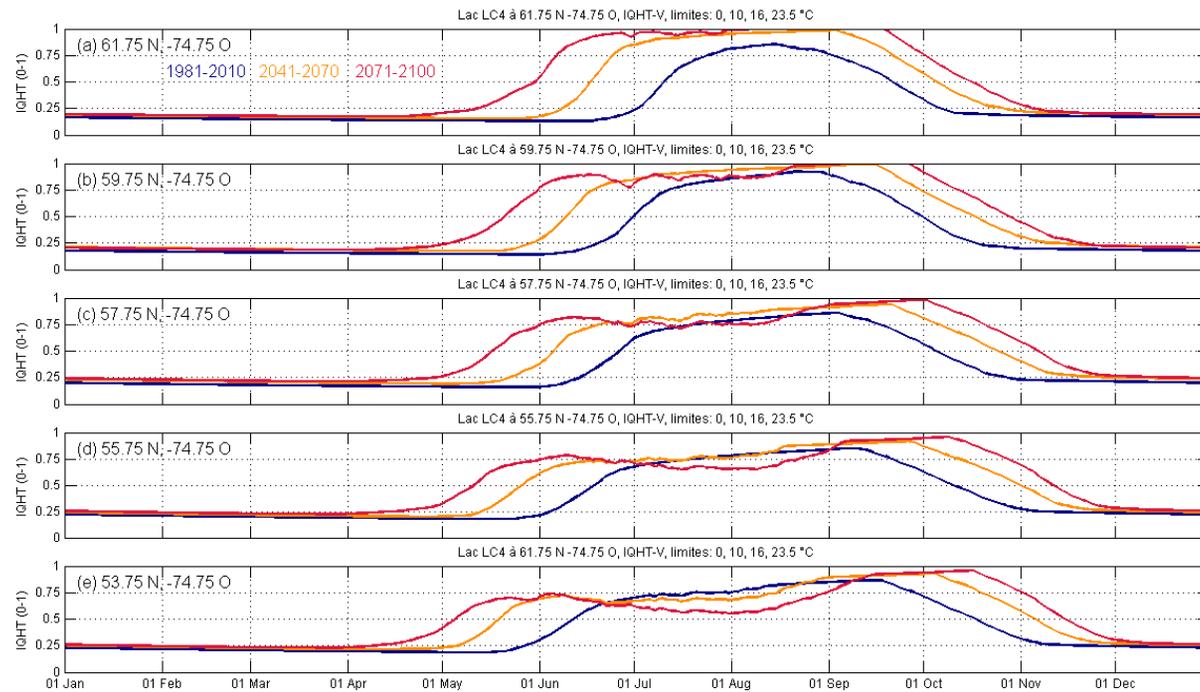


Figure 5. Fraction du volume du lac-type LC4 avec une température favorable à la croissance des juvéniles utilisant le calcul avec pondération à cinq latitudes pour le touladi. Les valeurs des seuils de température utilisées sont 0, 10, 16 et 23.5 °C. La période 1981-2010 est représentée en bleu, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge.

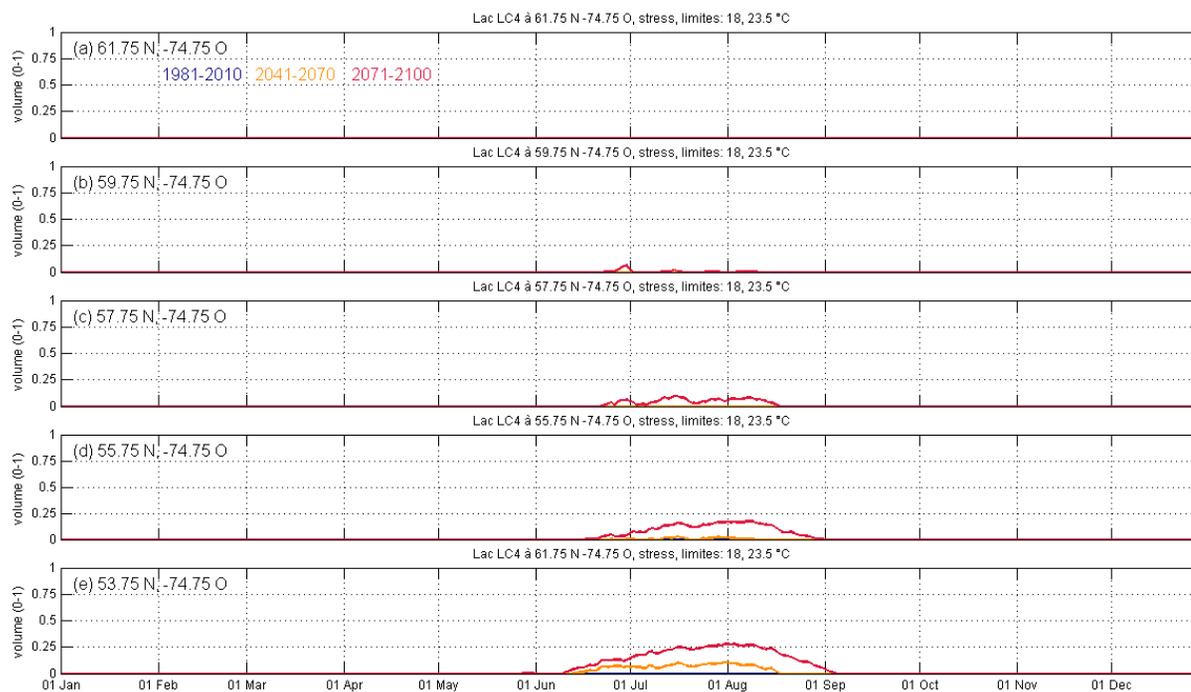


Figure 6. Fraction du volume du lac-type LC4 avec une température stressante pour les adultes. Le calcul utilise une pondération linéaire entre la limite de stress et la limite létale. Les seuils utilisés sont ceux du touladi : 18 et 23,5° C. La période 1981-2010 est représentée en bleu, la période 2041-2070 en orange et la période 2071-2100 en rouge. Si les seuils ne sont pas atteints pendant une période donnée, la couleur correspondante n'apparaîtra pas.

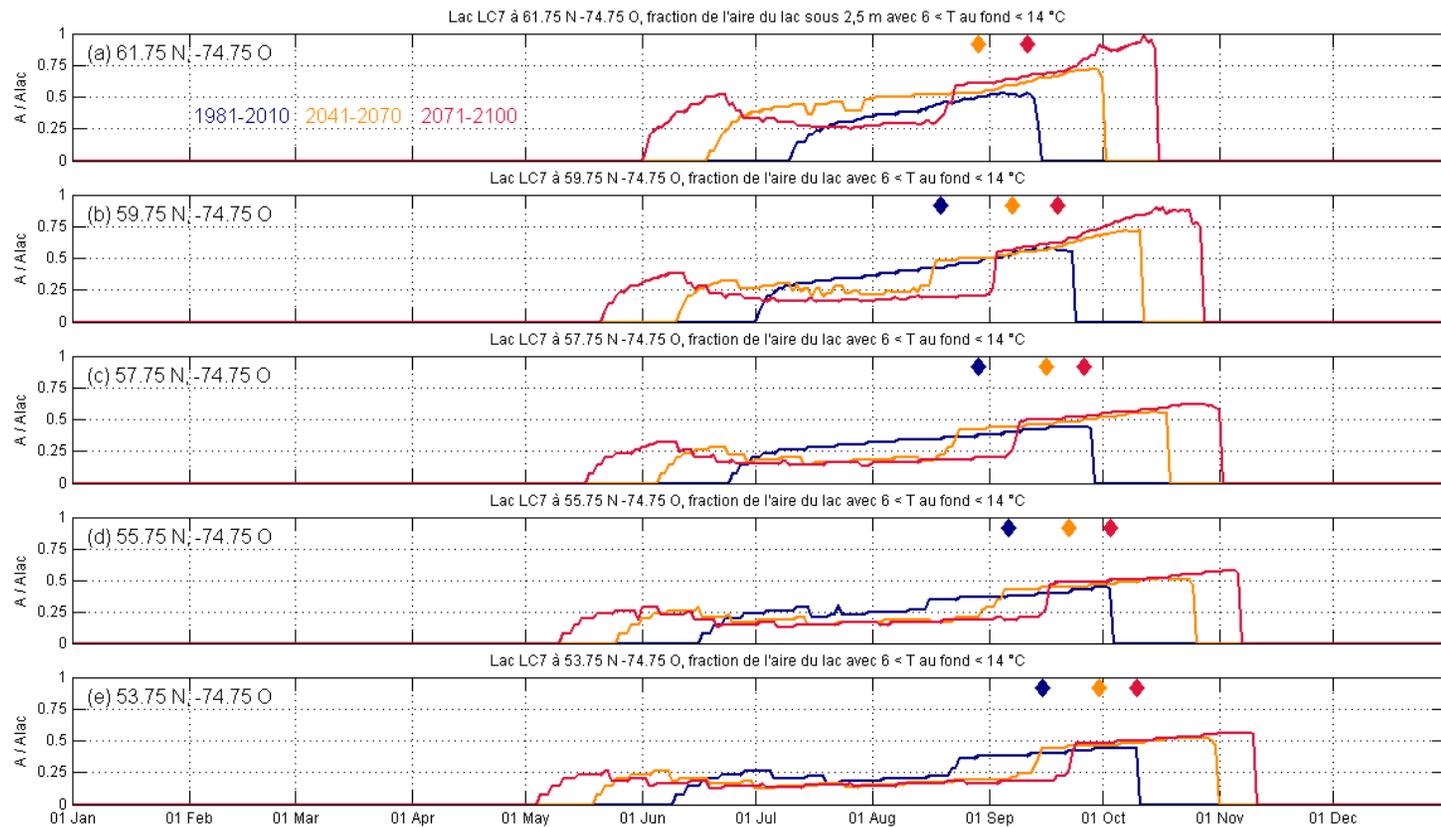


Figure 7. Fraction de l'aire de fraie du lac-type LC5 sous les 2,5 m avec une température au fond comprise entre 6 et 14 °C pour le touladi. Les losanges indiquent la date du début de fraie estimée à partir de la température de surface. La période 1981-2010 est représentée en bleu. Pour les très grands lacs, il est possible qu'il n'y a jamais 100% du fond avec température favorable à la fraie. Dans cet exemple-ci, cela se produit au nord (panneau du haut) : il n'y aura alors pas de losange bleu.

6. Sommaire et Conclusions

Nous avons identifié un certain nombre d'indicateurs physiques et biologiques susceptibles d'aider à la caractérisation des impacts des changements climatiques sur les habitats thermiques du touladi et de l'omble chevalier dans les lacs du Nunavik. Les indicateurs physiques proposés dans le passé sont au nombre de cinq.

- a) Le contenu en chaleur maximal
- b) L'occurrence du maximum de contenu en chaleur
- c) La température moyenne (couche 0-5 m; période juin, juillet et août)
- d) La température maximale en profondeur (soit 9,5 ou 20,5 m selon la profondeur du lac-type)
- e) L'occurrence de la température maximale en profondeur (soit 9,5 ou 20,5 m selon la profondeur du lac-type)

Dans ce rapport, nous proposons d'utiliser cinq indicateurs biologiques, un indicateur pour chacune des cinq métriques retenues.

- a) Un indice du potentiel de fraie : l'aire disponible (R1a)
- b) Un indice du potentiel de fraie : la date de début de la fraie (R1b)
- c) Un indice de la survie des œufs (R2)
- d) Un indice de croissance des juvéniles (J1)
- e) Un indice de stress thermique (A2)

Les indicateurs physiques seront tous représentés sur des cartes du Nunavik. Cela ne sera cependant pas possible pour tous les indicateurs biologiques. Il faut maintenant prioriser les indicateurs biologiques de la section 4, lorsque qu'il y a plus d'un indicateur, et choisir leurs modes de représentations graphiques.

Postface

Suite à la lecture d'une première version de cette proposition d'indicateurs biologiques, les représentants du MFFP ont approuvé la liste des métriques (Tableau 1) et ont proposé les priorités suivantes pour le traitement des indicateurs biologiques (Tableau 2).

1. R1a – a)
2. R1b
3. R2 – a)
4. J1 – a)
5. A2 – a)
6. A2 – b)
7. R1a – b)
8. A2 – c)
9. R2 – b)
10. J1 – b)

Références

- Ayllón, D., Nicola, G.G., Elvira, B., Parra, I., Almodóvar, A., 2013. Thermal carrying capacity for a thermally-sensitive species at the warmest edge of its range. *PLoS One* 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081354>
- Barton, B.A., 2002. Stress in Fishes: A Diversity of Responses with Particular Reference to Changes in Circulating Corticosteroids. *Integr. Comp. Biol.* 42, 517–525. <https://doi.org/10.1093/icb/42.3.517>
- Breau, C., Cunjak, R.A., Peake, S.J., 2011. Behaviour during elevated water temperatures: Can physiology explain movement of juvenile Atlantic salmon to cool water? *J. Anim. Ecol.* 80, 844–853. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01828.x>
- Chadwick, J.G., Nislow, K.H., McCormick, S.D., 2015. Thermal onset of cellular and endocrine stress responses correspond to ecological limits in brook trout, an iconic cold-water fish. *Conserv. Physiol.* 3, 1–12. <https://doi.org/10.1093/conphys/cov017.Introduction>
- Corey, E., Linnansaari, T., Dugdale, S.J., Bergeron, N., Gendron, J.F., Lapointe, M., Cunjak, R.A., 2020. Comparing the behavioural thermoregulation response to heat stress by Atlantic salmon parr (*Salmo salar*) in two rivers. *Ecol. Freshw. Fish* 29, 50–62. <https://doi.org/10.1111/eff.12487>
- Daigle, A., Caudron, A., Vigier, L., Pella, H., 2017. Optimization methodology for a river temperature monitoring network for the characterization of fish thermal habitat. *Hydrol. Sci. J.* 62, 483–497. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1242869>
- Dubos, V., 2020. Reve de littérature sur les préférences thermique de l’Ombre Chevalier. INRS-Eau, terre et environnement. Québec, 12 p.
- Duchesne, V., 2020. Préférences thermiques et en oxygène du touladi *Salvelinus Namaycush*: Juvéniles-Adults-Oeufs. INRS-Eau, terre et environnement. Québec, 17 p.
- Dugdale, S.J., Franssen, J., Corey, E., Bergeron, N.E., Lapointe, M., Cunjak, R. a., 2015. Main stem movement of Atlantic salmon parr in response to high river temperature. *Ecol. Freshw. Fish* n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/eff.12224>
- Eaton, J.G., Scheller, R.M., 1996. Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. *Limnol. Oceanogr.* 41, 1109–1115. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.5.1109>
- Elliott, J.M.A.M., Elliott, J.M.A.M., 2010. Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *J. Fish Biol.* 77, 1793–1817. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02762.x>
- Ficke, A.D., Myrick, C.A., Hansen, L.J., 2007. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11160-007-9059-5>

- Frechette, D.M., Dugdale, S.J., Dodson, J.J., Bergeron, N.E., 2018. Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring, and acoustic telemetry. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 75, 1999–2010. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0422>
- Fullerton, A.H., Torgersen, C.E., Lawler, J.J., Steel, E.A., Ebersole, J.L., Lee, S.Y., 2018. Longitudinal thermal heterogeneity in rivers and refugia for coldwater species: effects of scale and climate change. *Aquat. Sci.* 80, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00027-017-0557-9>
- Gaston, K.J., Butlin, R.K., Snook, R.R., 2017. Local adaptation of reproductive performance during thermal stress. *J. Evol. Biol.* 30, 422–429. <https://doi.org/10.1111/jeb.13018>
- Hartman, K.J., Porto, M. a., 2014. Thermal Performance of Three Rainbow Trout Strains at Above-Optimal Temperatures. *Trans. Am. Fish. Soc.* 143, 1445–1454. <https://doi.org/10.1080/00028487.2014.945662>
- Imholt, C., Soulsby, C., Malcolm, I.A., Gibbins, C.N., 2013. Influence of contrasting riparian forest cover on stream temperature dynamics in salmonid spawning and nursery streams. *Ecohydrology* 6, 380–392. <https://doi.org/10.1002/eco.1291>
- Isaak, D.J., Rieman, B.E., 2013. Stream isotherm shifts from climate change and implications for distributions of ectothermic organisms. *Glob. Chang. Biol.* 19, 742–751. <https://doi.org/10.1111/gcb.12073>
- Keefer, M.L., Peery, C. a., High, B., 2009. Behavioral thermoregulation and associated mortality trade-offs in migrating adult steelhead (*Oncorhynchus mykiss*): variability among sympatric populations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66, 1734–1747. <https://doi.org/10.1139/F09-131>
- Marten, P.S., 1992. Effect of Temperature Variation on the Incubation and Development of Brook Trout Eggs. *Progress. Fish-Culturist* 54, 1–6. [https://doi.org/10.1577/1548-8640\(1992\)054<0001:EOTVOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8640(1992)054<0001:EOTVOT>2.3.CO;2)
- Ouellet, V., St-hilaire, A., Mingelbier, M., Morin, J., 2010. Temperature duration frequency analysis on the st. lawrence river (canada) – a tool for quantifying adverse conditions during the 2001 massive fish kill. *Water Qual. Res. J. Canada* 45, 47–57.
- Picard, C.R., Bozek, M. a, Momot, W.T., 2003. Effectiveness of Using Summer Thermal Indices to Classify and Protect Brook Trout Streams in Northern Ontario. *North Am. J. Fish. Manag.* 23, 206–215. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2003\)023<0206:EOUSTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2003)023<0206:EOUSTI>2.0.CO;2)
- Turcotte, A., N. Bousquet et D. Garant, 2017. Revue de littérature sur les préférences d'habitat de salmonidés et leurs adaptations face aux changements climatiques. Rapport présenté au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 92 p.
- Whitney, J.E., Al-Chokhachy, R., Bunnell, D.B., Caldwell, C.A., Cooke, S.J., Eliason, E.J., Rogers, M., Lynch, A.J., Paukert, C.P., 2016. Physiological Basis of Climate Change Impacts on North American Inland Fishes. *Fisheries* 41, 332–345.

<https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1186656>

Zalewski, M., 2002. Ecohydrology—the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources. *Hydrol. Sci. J.* 47, 823–832.
<https://doi.org/10.1002/rra>