



**Impacts des changements climatiques sur les habitats
thermiques du touladi (*Salvelinus namaycush*) et de
l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*)
dans les lacs du Nunavik**

par

**Claude Bélanger¹, Yves Gratton¹, André St-Hilaire¹, Valérie Ouellet²,
Victor Duchesne¹, Véronique Dubos¹, Travis Logan³
Isabelle Laurion¹ et Reinhard Pienitz⁴**

¹ INRS-Eau, terre et environnement, Québec, Canada

² Institute of Global Innovation, University of Birmingham, Birmingham, UK

³ Ouranos, Montréal, Canada

⁴ Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Canada

Rapport final déposé le 6 novembre 2020



**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 

Ce rapport doit être cité comme suit.

Bélanger, C., Y. Gratton, A. St-Hilaire, V. Ouellet, V. Duchesne, V. Dubos, T. Logan, I. Laurion et R. Pienitz, 2020. Impacts des changements climatiques sur les habitats thermiques du touladi (*Salvelinus namaycush*) et de l'omble chevalier (*Salvelinus Alpinus*) dans les lacs du Nunavik. Rapport R1953, INRS-Eau, terre et environnement, Québec, Qc, xxxiii + 185 p.

DISTRIBUTION DES RÔLES

Cette étude a été financée par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) à partir des contributions du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020). Plusieurs personnes ont contribué, de près ou de loin, à la production de ce rapport et nous désirons souligner leurs contributions. Nous remercions le personnel du MFFP : Jean-François Bergeron, Laurie Beaupré, Jean-Nicolas Bujold, Véronique Leclerc et leur groupe de techniciens de terrain pour les données des lacs du Québec et du Nunavik. Ils ont conçu les plans d'échantillonnage, déployé les appareils de mesure et effectué le contrôle de qualité des données. Ils ont aussi contribué en temps et en suggestions au design de l'étude. Daniel Blais et Danielle Leclerc du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) ont obtenu et calculé pour nous les données du Réseau Hydrographique National (RHN) : superficie, développement du rivage et profondeur moyenne. Les techniciens du Centre d'études nordiques (CEN), en particulier Denis Sarrazin, ont déployé et récupéré les ancrages du Lac-du-camp sur l'île Bylot. Frédéric Bouchard du Centre Eau, terre et environnement (ETE) a aussi participé aux opérations de terrain et a effectué les relevés bathymétriques du Lac-du-camp. Ces opérations de terrain sur l'île Bylot ont été financées par les professeurs Isabelle Laurion et Reinhard Pienitz du CEN. Les deltas ont été calculés par Travis Logan d'Ouranos. Valérie Ouellet a défini et validé les indicateurs biologiques en se basant sur les revues de la littérature de Victor Duchesne et de Véronique Dubos. Les professeurs Bernard Giroux et Erwan Gloaguen du Centre ETE nous ont donné accès à leur ordinateur de modélisation pour effectuer la classification des lacs. M. Paul Drevnick du Ministère de l'Environnement et des Parcs de l'Alberta nous a autorisé à utiliser les bathymétries et calibrations que nous avons précédemment dérivées pour quatre lacs albertains afin de d'en dériver la bathymétrie de nos lacs-types. Merci à tous.

MOTS CLÉS

Modélisation de la thermie des lacs,
Impacts des changements climatiques sur lacs du Nunavik,
Habitats thermiques du touladi,
Habitats thermiques de l'omble chevalier,
Indicateurs physiques de la qualité des habitats thermiques,
Indicateurs biologiques de la qualité des habitats thermiques.

COMITÉ DE SUIVI

Nom	Organisation	Poste	Rôle dans le projet
Jean-François Bergeron	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs	Coordonnateur	Coordination
Mark O'Connor	Makivik	Gestionnaire des ressources	Coordination
Laurie Beaupré	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs	Biologiste	Membre du comité de suivi
Patrice Couture	INRS-Eau, terre et environnement	Professeur	Membre du comité de suivi

RÉSUMÉ POUR LE GRAND PUBLIC

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact du réchauffement climatique appréhendé d'ici la fin du 21^{ème} siècle sur les habitats du touladi et de l'omble chevalier dans les lacs du Nunavik. Une analyse statistique a réparti les 95 395 lacs recensés au Nunavik en sept classes. Le comportement de la thermie de chacune des sept classes a été simulé à l'aide d'un modèle numérique simple pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 à partir des projections climatiques les plus pessimistes. Nous proposons huit indicateurs de la qualité des habitats basés sur la température de l'eau. Les quatre indicateurs physiques sont : le contenu maximal en chaleur, la température estivale moyenne pour la couche 0-5 m, la température maximale en surface et la température maximale en profondeur. Les quatre indicateurs biologiques ont été choisis afin de caractériser les habitats thermiques lors de quatre des stades de vie du touladi et de l'omble chevalier: la fraie, l'incubation des œufs, la croissance des juvéniles et le stress thermique chez les adultes. Les températures létales pour le touladi et l'omble chevalier ne devraient jamais être atteintes à l'horizon 2071-2100, selon le scénario envisagé, même au sud du domaine. Les changements projetés relativement à la fraie, la survie des œufs et la croissance des juvéniles apparaissent en général plutôt bénéfiques en supposant que les espèces s'adapteront aux changements. Par contre l'exposition à des températures stressantes au cœur de l'été apparaît plus potentiellement préjudiciable à ces espèces, particulièrement au touladi.

SUMMARY FOR THE GENERAL PUBLIC

The objective of this study is to determine the impact of the anticipated global warming by the end of the 21st century on the habitats of lake trout and arctic char in Nunavik lakes. A statistical analysis sorted the 95,395 lakes identified in Nunavik into seven classes. The thermal behavior of each of the seven classes was simulated using a simple numerical model for the periods 1981-2010, 2041-2070 and 2071-2100 using the most pessimistic climate projections. We offer eight indicators of habitat quality based on water temperature. The four physical indicators are: the maximum heat content, the average summer temperature for the 0-5 m layer, the maximum surface temperature and the maximum depth temperature. The four biological indicators were chosen to represent thermal habitats during four of the lake trout and arctic char life stages: spawning, egg incubation, juvenile growth and adult heat stress. Lethal temperatures for lake trout and arctic char should never be reached by 2071-2100, with the climate warming scenario considered, even south of the domain. The projected changes in spawning, egg survival, and juvenile growth generally appear to be quite beneficial assuming the species will adapt to the changes. On the other hand, exposure to stressful temperatures in the heart of summer appears more potentially detrimental to these species, particularly lake trout.

RÉSUMÉ DU RAPPORT

Cette étude se concentre sur le problème de l'impact des changements climatiques sur la thermie des lacs du Nunavik. Nous avons produit une cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques en lacs de deux espèces de salmonidés, le touladi et l'omble chevalier, aux horizons 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour sept « lacs-types » du Nunavik. Pour définir les caractéristiques de ces lacs-types, nous avons réparti les 95 395 lacs de plus de 1 m de profondeur et de plus de 10 ha de surface recensés au Nunavik en sept classes de lacs-types à l'aide d'une analyse en composantes principales suivie d'une classification ascendante hiérarchique. Ces lacs-types ont été définis à partir de trois paramètres : la surface du lac, le développement du rivage et la profondeur moyenne. Les trois lacs-types les plus nombreux représentent à eux trois plus de 90% des lacs du Nunavik.

Le modèle numérique unidimensionnel MyLake, nourri par les scénarios de variables climatiques simulées par le modèle régional canadien du climat (MRCC), des données bathymétriques et météorologiques pour trois lacs réels et des données de la réanalyse CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) ont été utilisés afin de dériver les cycles climatiques annuels sur trente ans des températures passées (1981-2010) et futures (2041-2070 et 2071-2100). Les projections climatiques utilisent le scénario de concentration en gaz à effet de serre RCP 8.5. Pour fin de modélisation, le territoire du Nunavik a été divisé en 410 pixels de 0,5° de latitude par 0,5° de longitude. Les résultats de la modélisation ont permis de dériver des cycles annuels de températures climatologiques (pour chaque pixel et chaque horizon) à partir desquels des indicateurs physiques et biologiques de la qualité des habitats thermiques du touladi et de l'omble chevalier ont été calculés. Les quatre indicateurs physiques sont : le contenu maximal en chaleur, la température estivale moyenne pour la couche 0-5 m, la température maximale en surface et la température maximale en profondeur. Les quatre indicateurs biologiques ont été choisis afin de caractériser les habitats thermiques lors de quatre des stades de vie du touladi et de l'omble chevalier: la fraie et l'incubation des œufs, la croissance des juvéniles et le stress thermique chez les adultes.

Les changements projetés indiquent une augmentation du contenu en chaleur et de la température partout sur le domaine au cours du 21^{ème} siècle. Considérant la moyenne sur le domaine pour les sept lacs-types, 1) le contenu en chaleur maximal augmente de ~48,7 % entre 1981-2010 et 2071-2100, 2) la température moyenne de la couche 0-5 m entre le 1^{er} juin et le 31 août passe de ~9,0 °C à ~17,1 °C entre 1981-2010 et 2071-2100, 3) la température maximale à 1,5 m passe de ~13,8 °C à ~19,6 °C entre 1981-2010 et 2071-2100, 4) la température maximale à 8,5/9,5 m pour les lacs types de faible profondeur moyenne passe de ~10,0 °C à ~15,9 °C entre 1981-2010 et 2071-2100, et 5) la température maximale à 20,5 m pour les lacs types de grande profondeur moyenne passe de ~5,8 °C à ~8,5 °C entre 1981-2010 et 2071-2100.

Le retard projeté pour le début de la fraie à l'horizon 2071-2100 par rapport à 1981-2010 est d'environ 27,9 jours pour le touladi et 27,5 jours pour l'omble chevalier (moyenne sur le domaine pour les sept lacs-types). Les températures propices à l'incubation des œufs devraient arriver plus tard dans le futur. Le décalage projeté pour un lac de grande

profondeur moyenne est d'environ 18,5 jours entre 1981-2010 et 2041-2070 et 11,0 jours entre 2041-2070 et 2071-2100. Le décalage projeté pour un lac de faible profondeur moyenne est d'environ 17,0 jours entre 1981-2010 et 2041-2070 et 10,9 jours entre 2041-2070 et 2071-2100. De manière générale, les résultats pour les indicateurs biologiques « incubation » ne laissent présager aucun problème particulier à venir quant à la survie des œufs. Ceci suppose cependant que la fraie soit retardée dans le futur, sinon les œufs pourraient se retrouver en eaux trop chaudes dans les premiers jours suivant la fraie. En effet, une éclosion aux dates habituelles deviendrait alors hâtive due au nombre accru de degrés-jours et pourrait exposer les alevins à des conditions d'habitat suboptimales.

Les résultats projettent que la fraction du volume avec température favorable à la croissance des juvéniles devrait augmenter au printemps et à l'automne. La partie de l'année avec conditions thermiques favorables à la croissance s'en trouverait substantiellement allongée. L'augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles n'est pas constante au cours des neuf décennies allant du passé de référence au futur le plus éloigné.

En raison d'une température seuil plus élevée, la part du volume du lac avec température stressante est beaucoup plus petite pour l'omble chevalier que pour le touladi. La part du volume des lacs avec température stressante est nulle en passé de référence et devient substantielle à l'horizon 2071-2100. Il est plus probable que les températures stressantes deviendront plus problématiques pour le touladi que pour l'omble chevalier, et ce plutôt au sud qu'au nord du domaine, et pour les lacs de faible profondeur moyenne plutôt que pour ceux de grande profondeur moyenne. Avec des volumes habitables réduits à aussi peu que 38 % du volume du lac à l'horizon 2071-2100, des préjudices sérieux semblent quasi-certains si le réchauffement se poursuivait au-delà de cet horizon. Par exemple, une réduction des volumes habitables pourrait rendre indisponibles les frayères habituelles. Cela pourrait entraîner une exposition des œufs à des températures défavorables pouvant compromettre leur survie ou, possiblement, à un asynchronisme entre l'éclosion et la disponibilité de la nourriture, affectant ainsi la croissance et la survie des alevins.

Les températures létales pour le touladi et l'omble chevalier ne devraient jamais être atteintes à l'horizon 2071-2100, même au sud du domaine. Si les changements projetés relativement à la fraie, la survie des œufs et la croissance des juvéniles apparaissent en général plutôt bénéfiques, par contre l'exposition à des températures stressantes au cœur de l'été apparaît plus potentiellement préjudiciable à ces espèces, particulièrement au touladi.

REPORT SUMMARY

This study addresses the problem of the impact of climate change on the thermal conditions of Nunavik lakes. We produced a two-dimensional mapping of thermal lake habitats for two species of salmonids, lake trout and arctic char, at the 1981-2010, 2041-2070 and 2071-2100 horizons for seven "typical lakes" in Nunavik. To define the characteristics of these typical lakes, we sorted the 95,395 lakes deeper than 1 m and with a surface larger than 10 ha identified in Nunavik into seven classes of lakes using principal component analysis followed by a hierarchical cluster analysis. These typical lakes were defined on the basis of three parameters: the surface of the lake, the development of the shore and the average depth. The three most numerous type lakes together represent more than 90% of the lakes in Nunavik.

The MyLake one-dimensional numerical model, fed by climate scenarios simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM), bathymetric and meteorological data for three real lakes and reanalysis data from the CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) have been used to derive annual climate cycles over thirty years for past (1981-2010) and future (2041-2070 and 2071-2100) temperatures. The climate projections use the greenhouse gas concentration scenario RCP 8.5. The Nunavik territory was divided into 410 pixels of 0.5° latitude by 0.5° longitude. The results of the modeling made it possible to derive annual cycles of climatological water temperatures (for each pixel and each horizon) from which physical and biological indicators of the thermal habitat quality for lake trout and arctic char were calculated. The four physical indicators are: the maximum heat content, the average summer temperature for the 0-5 m layer, the maximum surface temperature and the maximum depth temperature. The four biological indicators were chosen to characterize thermal habitats during four of the life stages of lake trout and Arctic char: spawning, egg incubation, juvenile growth and heat stress for adults.

The projected changes suggest an increase in heat content and temperature throughout the domain during the 21st century. Considering the average on the domain for the seven typical lakes, 1) the maximum heat content increases by ~48.7% between 1981-2010 and 2071-2100, 2) the average temperature of the 0-5 m layer between June 1 and August 31 goes from ~9.0 °C to ~17.1 °C between 1981-2010 and 2071-2100, 3) the maximum temperature at 1.5 m goes from ~13.8 °C to ~19.6 °C between 1981-2010 and 2071-2100, 4) the maximum temperature at 8.5 / 9.5 m for typical shallow-to-average lakes goes from ~10.0 °C to ~15.9 °C between 1981-2010 and 2071-2100, and 5) the maximum temperature at 20.5 m for type lakes of great mean depth increases from ~5.8 °C to ~8.5 °C between 1981-2010 and 2071-2100.

The projected delay for the start of the spawning period by 2071-2100 compared to 1981-2010 is approximately 27.9 days for lake trout and 27.5 days for Arctic char (average on the domain for the seven typical lakes). Temperatures suitable for incubating eggs are expected to arrive later in the future. The projected lag for a medium-deep lake is approximately 18.5 days between 1981-2010 and 2041-2070 and 11.0 days between 2041-2070 and 2071-2100. The projected lag for an average shallow lake is approximately 17.0

days between 1981-2010 and 2041-2070 and 10.9 days between 2041-2070 and 2071-2100. In general, the results for the biological indicators "egg incubation" do not suggest any particular problem to come for egg survival. However, this assumes that spawning is delayed in the future, otherwise the eggs could end up in water that is too warm during the first days after spawning. Hatching at the usual dates could expose the fry to suboptimal habitat conditions because of the larger degree-days.

The results project that the fraction of the volume with temperature favorable to juvenile growth is expected to increase in the spring and fall. The part of the year with favorable thermal conditions for growth would be substantially lengthened. The projected increase in the number of m³-days with favorable temperature for juvenile growth is not constant over the nine decades from the past baseline period to the most distant future.

Due to a higher threshold temperature, the share of the lake volume with stressful temperature is much smaller for Arctic char than for lake trout. The share of the volume of lakes with stressful temperatures is zero in the reference past and becomes substantial by 2071-2100. It is more likely that the stressful temperatures will become more problematic for lake trout than for Arctic char, and this more in the south of the domain than in the north of the domain, and for the lakes of average shallow depth rather than for the large average depth lakes. With living volumes reduced to as little as 38% of the lake's volume by 2071-2100, serious damage seems almost certain if warming continues beyond this horizon. For example, a reduction in habitable volumes could make the usual spawning grounds unavailable. This could cause the eggs to be exposed to unfavorable temperatures that could compromise their survival or possibly generate an asynchrony between hatching and food availability, thus affecting the growth and survival of the fry.

Lethal temperatures for lake trout and Arctic char are never expected to be reached by 2071-2100, even in the southern portion of the domain. While the projected changes in spawning, egg survival and juvenile growth generally appear to be rather beneficial, exposure to stressful temperatures in midsummer appears to be more potentially detrimental to these species, particularly lake trout.

SOMMAIRE DE GESTION

L'objectif de ce projet était de déterminer l'impact des changements climatiques sur les habitats thermiques des salmonidés des lacs du Nunavik (au nord de 55° N). Plus particulièrement nous devons produire une cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques des salmonidés aux horizons 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100.

1. Classification : les lacs-types

Nous avons produit une cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques en lacs de deux espèces de salmonidés, le touladi et l'omble chevalier, aux horizons 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour sept « lacs-types » du Nunavik. Pour définir les caractéristiques de ces lacs-types, nous avons réparti les 95 395 lacs de plus de 1 m de profondeur et de plus de 10 ha de surface recensés au Nunavik en sept classes de lacs-types à l'aide d'une analyse en composantes principales suivie d'une classification ascendante hiérarchique. Ces lacs-types ont été définis à partir de trois paramètres : la surface du lac, le développement du rivage et la profondeur moyenne. Ils sont identifiés par les acronymes LC1, LC2, LC3, LC4, LC5, LC6 et LC7 (voir le Tableau 1 en page 8). Les lacs-types les plus représentatifs sont LC1 (37,71% des lacs), LC3 (25,92% des lacs) et LC5 (27,08% des lacs) qui représentent à eux trois plus de 90% des lacs du Nunavik.

2. Modélisation des lacs-types

Le modèle de lac MyLake, nourri par les scénarios de variables climatiques simulées par le modèle régional canadien du climat (MRCC), des données bathymétriques et météorologiques pour quatre lacs réels et des données de la réanalyse CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) ont été utilisés afin de dériver les cycles climatiques annuels sur trente ans des températures passées (1981-2010) et futures (2041-2070 et 2071-2100) pour sept lacs-types conceptuellement placés sur tout le territoire du Nunavik. Les projections climatiques (une contribution d'Ouranos) utilisent le scénario de concentration en gaz à effet de serre RCP 8.5. Pour fin de modélisation, le territoire du Nunavik a été divisé en 410 pixels de 0,5° de latitude par 0,5° de longitude. Les résultats de la modélisation ont permis de dériver des cycles annuels de températures climatologiques (pour chaque pixel et chaque horizon) à partir desquels divers indicateurs physiques et biologiques ont été calculés. Les résultats sont présentés sous forme de cartes ou de séries temporelles pour ces indicateurs. Des cartes de changements projetés entre deux horizons ont aussi été produites.

3. Indicateurs

Par la suite, nous avons déterminé un ensemble de quatre indicateurs physiques et de quatre indicateurs biologiques des habitats du touladi et de l'omble chevalier basés sur la thermie des lacs. Ce sont ces indicateurs qui sont cartographiés au Chapitre 9.

3.1 Indicateurs physiques

Les quatre indicateurs physiques sont : le contenu maximal en chaleur, la température estivale moyenne pour la couche 0-5 m la température maximale en surface et la température maximale en profondeur.

Les changements projetés indiquent une augmentation du contenu en chaleur et de la température partout sur le domaine au cours du 21^{ème} siècle. Considérant la moyenne des moyennes sur le domaine, 1) le contenu en chaleur maximal augmente de ~48,7 % entre 1981-2010 et 2071-2100, 2) la température moyenne de la couche 0-5 m entre le 1^{er} juin et le 31 août passe de ~9,0 °C à ~17,1 °C entre 1981-2010 et 2071-2100, 3) la température maximale à 1,5 m passe de ~13,8 °C à ~19,6 °C entre 1981-2010 et 2071-2100, 4) la température maximale à 8,5/9,5 m pour les lacs types de faible profondeur moyenne passe de ~10,0 °C à ~15,9 °C entre 1981-2010 et 2071-2100, et 5) la température maximale à 20,5 m pour les lacs types de grande profondeur moyenne passe de ~5,8 °C à ~8,5 °C entre 1981-2010 et 2071-2100.

À l'horizon 2071-2100, les températures maximales sur le domaine sont : 1) ~19,9 °C pour la température moyenne de la couche 0-5 m entre le 1^{er} juin et le 31 août, 2) ~23,0 °C pour la température maximale à 1,5 m, 3) ~17,9 °C pour la température maximale à 9,5 m pour les lacs types de faible profondeur moyenne, et 4) ~14,0 °C pour la température maximale à 20,5 m pour les lacs types de grande profondeur moyenne.

La comparaison entre les changements projetés pour les six premières décennies et pour les trois suivantes (1981-2010 à 2041-2070 et 2041-2070 à 2071-2100) indique que les changements devraient s'accélérer au cours du 21^{ème} siècle. Pour le contenu en chaleur maximal, l'augmentation moyenne projetée passe de ~4,5 à ~7,3 % par décennie (par rapport au maximum de 1981-2010). Pour la moyenne de température de la couche 0-5 m entre le 1^{er} juin et le 31 août, l'augmentation moyenne projetée passe de ~0,83 à ~1,03 °C par décennie. Pour la température maximale à 1,5 m, l'augmentation moyenne projetée passe de ~0,53 à ~0,89 °C par décennie. Pour la température maximale à 9,5 m (lacs types de faible profondeur moyenne), l'augmentation moyenne projetée passe de ~0,56 à ~0,84 °C par décennie. Pour la température maximale à 20,5 m (lacs types de grande profondeur moyenne), l'augmentation moyenne projetée passe de ~0,21 °C à ~0,47 °C par décennie.

Les résultats pour le contenu en chaleur maximal et la température maximale en profondeur présentent des variations spatiales contre-intuitives : les plus grandes valeurs ne surviennent pas au sud du domaine mais au nord-ouest au-delà de ~58 °N. Ce phénomène apparaît être relié aux forts vents CFSR dans cette région et au mélange qui en résulterait. La variation spatiale des vents CFSR sur le domaine de même que leur représentativité mériteraient d'être davantage investiguées.

L'occurrence très hâtive du contenu en chaleur maximal, de la température maximale à 1,5 m et de la température maximale à 9,5 m (pour les lacs types de faible profondeur moyenne) dans une région au nord-ouest du domaine semble associée à une

diminution des deltas pour la température de l'air entre juin et juillet. Une même diminution mais survenant à un autre moment (par exemple des deltas mensuels calculés à partir du 15 de chaque mois) aurait probablement entraîné des conséquences différentes (avances moins grandes). La variation spatiale des différences de deltas mensuels entre juin et juillet pourrait être investiguée pour fin de comparaison avec la région d'occurrence hâtive. L'utilisation de deltas calculés sur une plus courte période pourrait possiblement aider à minimiser le problème de décalages exagérés sur une partie du domaine.

3.2 Indicateurs biologiques

Les indicateurs biologiques ont été choisis afin de caractériser les habitats thermiques lors de quatre des stades de vie du touladi et de l'omble chevalier (Tableaux 4 et 5) : la fraie et l'incubation des œufs, la croissance des juvéniles et le stress thermique chez les adultes.

3.2.1 Fraie

Pour un lac de grande profondeur moyenne (tel le lac-type LC4), la disponibilité des fonds avec température favorable à la fraie pour le touladi augmente entre 1981-2100 et 2071-2100 alors que l'occurrence des fractions maximales avec température favorable est retardée. Pour un lac de faible profondeur moyenne (tel le lac-type LC5), il existe toujours à l'automne une période où tout le fond sous 2,5 m présente une température favorable à la fraie pour le touladi. Cette période survient de plus en plus tard dans le futur alors que sa durée tend à diminuer. La durée de cette période demeurerait quand même d'environ 42 jours à l'horizon 2071-2100.

Pour l'omble chevalier, la fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie atteint rapidement 100 % à l'automne et demeure à 100 % jusqu'à tard au printemps suivant. Les conditions thermiques propices à la fraie devraient arriver plus tard dans le futur. Le retard projeté entre 1981-2010 et 2071-2100 est d'environ 30,4 jours pour le lac-type LC4 et 25,8 jours pour le lac-type LC5. Le décalage de l'arrivée des conditions favorables à la fraie devrait s'accélérer au cours des neuf décennies entre le passé de référence 1981-2010 et l'horizon 2071-2100.

Le retard projeté pour le début de la fraie à l'horizon 2071-2100 par rapport à 1981-2010 est d'environ 27,9 jours pour le touladi et 27,5 jours pour l'omble chevalier (moyenne des moyennes sur le domaine).

La profondeur moyenne a une légère influence sur les retards projetés, le retard pour les lacs-types de faible profondeur moyenne étant un peu plus petit que le retard pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. Entre 1981-2010 et 2071-2100, le retard projeté pour le touladi est environ 4,1 jours plus court pour les lacs de faible profondeur moyenne et il est environ 7,1 jours plus court pour l'omble chevalier.

Le décalage du début de la fraie devrait s'accélérer au cours des neuf décennies entre le passé de référence 1981-2010 et l'horizon 2071-2100. Pour le touladi, le taux de changement projeté passe de 2,8 à 3,2 jours par décennie pour les lacs-types de faible

profondeur moyenne et de 3,2 à 3,8 jours par décennie pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. Pour l'omble chevalier, le taux de changement projeté passe de 2,4 à 3,3 jours par décennie pour les lacs-types de faible profondeur moyenne et de 3,0 à 4,3 jours par décennie pour les lacs-types de grande profondeur moyenne.

Il est difficile de prédire les conséquences d'un décalage de la fraie avec exactitude. Cependant, ce décalage en début de cycle de vie a le potentiel d'affecter tous les stades suivants et éventuellement le recrutement global. En effet, ce décalage peut occasionner une exposition à des conditions thermiques suboptimales, ce qui peut entraîner une diminution de la survie des œufs ou une croissance ralentie des alevins et juvénile.

3.2.2 Incubation (survie des œufs)

La fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver varie avec la profondeur moyenne. Elle est plus petite pour les lacs-types de faible profondeur moyenne que pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. Pour le passé de référence, la moyenne sur le domaine varie de 40 % à 90 % sur la gamme de profondeur moyenne des sept lacs-types considérés.

Les températures propices à l'incubation devraient arriver plus tard dans le futur. Le décalage projeté pour un lac de grande profondeur moyenne (LC4) est d'environ 18,5 jours entre 1981-2010 et 2041-2070 et 11,0 jours entre 2041-2070 et 2071-2100. Le décalage projeté pour un lac de faible profondeur moyenne (LC5) est d'environ 17,0 jours entre 1981-2010 et 2041-2070 et 10,9 jours entre 2041-2070 et 2071-2100.

Les résultats indiquent que la fraction du fond sous 2,5 m en hiver avec température favorable à l'incubation devrait augmenter dans le futur. L'augmentation projetée est beaucoup plus marquée pour les lacs-types de faible profondeur moyenne que pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. L'augmentation projetée entre 1981-2010 et 2071-2100 varie de 52 % (LC1) à 4 % (LC6) par rapport à l'aire favorable en passé de référence. À l'horizon 2071-2100, la plus petite fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver sur le domaine est de 39 % (LC5).

Le nombre de degrés-jours avec température favorable à la survie des œufs accumulés en hiver devrait augmenter dans le futur. Pour les lacs-types de faible profondeur moyenne, les résultats indiquent notamment une augmentation entre un horizon et le suivant à toutes les profondeurs. On peut présumer que l'augmentation projetée pourrait être bénéfique quant à la survie des œufs.

De manière générale, les résultats pour les indicateurs biologiques « incubation » ne laissent présager aucun problème particulier à venir quant à la survie des œufs. Ceci suppose cependant que la fraie soit retardée dans le futur, sinon les œufs pourraient se retrouver en eaux trop chaude dans les premiers jours suivant la fraie. Une éclosion hâtive pourrait aussi exposer les alevins à des conditions d'habitat suboptimales.

3.2.3 Croissance des juvéniles

Les résultats projettent que la fraction du volume avec température favorable à la croissance des juvéniles devrait augmenter au printemps et à l'automne. La partie de l'année avec conditions thermiques favorables à la croissance s'en trouverait substantiellement allongée. Pour un lac de faible profondeur moyenne situé au sud du domaine, la part du volume du lac avec température favorable à la croissance des touladis juvéniles pourrait diminuer jusqu'à ~34 % au cœur de l'été à l'horizon 2071-2100. Dans le contexte d'une période de croissance allongée, les éventuelles répercussions d'une telle baisse estivale restent spéculatives mais elle pourrait potentiellement être préjudiciable, surtout si elle s'accroît au-delà de 2071-2100.

Le nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles devrait augmenter substantiellement dans le futur, et ce tant pour le touladi que pour l'omble chevalier. Le changement projeté peut être considéré comme probablement positif quant à la pérennité de ces espèces. L'augmentation du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance de juvéniles devrait être plus importante pour les lacs de faible profondeur moyenne. L'augmentation projetée pour les lacs-types de faible profondeur moyenne est d'environ 52,5 % entre 1981-2010 et 2071-2100 (touladi et omble chevalier), et la plus petite augmentation projetée est pour le plus profond des lacs-types (LC7), soit 27,5 % pour le touladi et 29,2 % pour l'omble chevalier. La diminution de l'augmentation avec la profondeur moyenne s'explique par un réchauffement projeté en profondeur plus faible et de plus courte durée sur une grande partie de la colonne d'eau.

L'augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles n'est pas constante au cours des neuf décennies allant du passé de référence au futur le plus éloigné. L'augmentation ralentit pour les lacs-types de faible profondeur moyenne et accélère pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. La perte de m³-jours favorables découlant du réchauffement marqué au cœur de l'été jouerait un rôle dans le développement de cette différence.

3.2.4 Stress thermique chez les adultes

En raison d'une température seuil plus élevée, la part du volume du lac avec une température stressante est beaucoup plus petite pour l'omble chevalier que pour le touladi. La part du volume des lacs avec température stressante est nulle en passé de référence et devient substantielle à l'horizon 2071-2100.

Le volume maximal du lac avec température stressante (exprimé en % du volume du lac) est plus important pour les lacs-types de faible profondeur moyenne que pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. À titre indicatif, la moyenne sur le domaine à l'horizon 2071-2100 est d'environ 22,4 % du volume du lac pour les lacs-types de faible profondeur moyenne et de 5,5 % du volume du lac pour le lac-type le plus profond (LC7). Le volume maximal du lac avec des conditions de température stressante pour le touladi

pourrait atteindre 62 % du volume du lac pour les lacs de faible profondeur moyenne lorsqu'ils sont situés au sud du domaine.

Les températures stressantes sont confinées aux cinq ou six premiers mètres sous la surface, même à l'horizon 2071-2100. La durée de la période avec température stressante est peu influencée par la profondeur moyenne. La durée maximale de la période avec température stressante pour le touladi en surface à l'horizon 2071-2100 est de 94 jours (lacs-types LC1 et LC5).

Il est plus probable que les températures stressantes deviendront plus problématiques pour le touladi que pour l'omble chevalier, et ce plutôt au sud du domaine qu'au nord du domaine, et pour les lacs de faible profondeur moyenne plutôt que pour les lacs de grande profondeur moyenne. Avec des volumes habitables réduits à aussi peu que 38 % du volume du lac à l'horizon 2071-2100, des préjudices sérieux semblent quasi-certains si le réchauffement se poursuivait au-delà de cet horizon. Par exemple, une réduction des volumes habitables pourrait rendre indisponibles les frayères habituelles. Cela pourrait entraîner une exposition des œufs à des températures défavorables pouvant compromettre leur survie ou, possiblement, à un asynchronisme entre l'éclosion et la disponibilité de la nourriture, affectent ainsi la croissance et la survie des alevins.

4. Conclusion

Les conditions thermiques propices à la fraie devraient arriver plus tard dans le futur et le déclenchement de la fraie devrait aussi survenir plus tard. La disponibilité des fonds avec température favorable à la fraie devrait augmenter dans le futur pour le touladi alors qu'elle est toujours excellente pour l'omble chevalier en raison d'une gamme de températures adéquates beaucoup plus basse. Les températures propices à l'incubation devraient aussi arriver plus tard dans le futur et la disponibilité des fonds thermiquement favorables à l'incubation devraient aussi augmenter, plus spécialement pour les lacs de faible profondeur moyenne. Le nombre de degrés-jours avec température favorables à la survie des œufs accumulés en hiver devrait aussi augmenter dans le futur. Les changements projetés n'annoncent donc aucun préjudice direct particulier quant à la fraie et l'incubation des œufs, le tout se déroulant simplement plus tard. S'il y a préjudice, ce pourrait être d'ordre phénologique, l'occurrence de l'éclosion des œufs étant décalé sur le cycle annuel (i.e. match / mismatch avec divers facteurs biologiques et abiotiques). Ce décalage découlerait du retard de la fraie modulé par un éventuel raccourcissement de la période d'incubation.

La disponibilité d'un habitat thermique favorable à la croissance des juvéniles devrait augmenter dans le futur, principalement à cause de l'allongement de la période avec une thermie favorable au printemps et à l'automne. Cependant, pour les lacs de faible profondeur moyenne, la part du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles pourrait diminuer considérablement au cœur de l'été au sud du domaine à l'horizon 2071-2100, soit jusqu'à ~34 % pour le touladi et ~16 % pour l'omble chevalier. Cette baisse estivale pourrait potentiellement être préjudiciable, surtout si elle continue de

s'accroître au-delà de 2071-2100. On peut spéculer sur les conséquences d'une saison de croissance en deux parties entrecoupées d'une période défavorable.

Les températures létales pour le touladi et l'omble chevalier ne devraient jamais être atteintes à l'horizon 2071-2100, même au sud du domaine. Le touladi adulte apparaît davantage exposé aux températures stressantes que l'omble chevalier adulte puisque son seuil de stress thermique est plus bas (18 vs 21 °C). Les températures stressantes pour le touladi devraient devenir plus fréquentes à l'horizon 2071-2100. Elles devraient par contre restées confinées aux cinq ou six premiers mètres sous la surface. Le volume maximal du lac avec température stressante (exprimé en % du volume du lac) pourrait atteindre 62 % pour les lacs de faible profondeur moyenne lorsque situés au sud du domaine. En comparaison, le volume maximal pour l'omble chevalier n'est que de 39 %.

Si les changements projetés relativement à la fraie, la survie des œufs et la croissance des juvéniles apparaissent en général plutôt bénéfiques, par contre l'exposition à des températures stressantes au cœur de l'été apparaît plus potentiellement préjudiciable à ces espèces, particulièrement au touladi. Les situations problématiques devraient d'abord se développer dans les lacs de faible profondeur moyenne au sud du domaine et puis progresser par la suite vers le nord. Cela semble d'autant plus inquiétant si on considère 1) que les volumes projetés avec température stressante sont des valeurs pondérées entre les limites de stress et létale, 2) que les projections sont pour un cycle annuel moyen et que les poissons seront exposés à des conditions encore plus préjudiciables certaines années, 3) que certaines études proposent pour le touladi des limites de confort et de tolérance pour une occupation à long terme plus basses que le seuil de stress considéré (respectivement 12 et 15 °C; Plumb and Blanchfield, 2009), et 4) que les changements projetés tendent à s'accroître au cours des neuf décennies entre 1981-2010 et 2071-2100 et qu'il semble peu probable qu'ils s'arrêtent à la fin du siècle. Cependant, il n'est heureusement pas encore certain que les concentrations en gaz à effet de serre finissent par suivre le scénario RCP 8.5.

TABLE DES MATIÈRES

DISTRIBUTION DES RÔLES	iii
MOTS CLÉS.....	iv
COMITÉ DE SUIVI	iv
RÉSUMÉ POUR LE GRAND PUBLIC	v
SUMMARY FOR THE GENERAL PUBLIC	v
RÉSUMÉ DU RAPPORT.....	vi
REPORT SUMMARY.....	viii
SOMMAIRE DE GESTION.....	x
TABLE DES MATIÈRES	xvii
LISTE DES FIGURES	xxii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxix
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xxxiii
1. Introduction.....	1
2. Détermination des lacs-types	3
2.1 Méthodologie	3
2.2 Résultats	7
3. Présentation du modèle MyLake	13
4. Données climatiques : météorologiques et limnologiques.....	15
4.1 Climatologie météorologique : NARR versus CFSR	16
4.2 Climatologie limnologique (lacs)	24
4.3 Climatologie future : les deltas	25
5. Modélisation de lacs réels.....	27
5.1 Ensemble des lacs déjà modélisés.....	27
5.2 Le Lac-du-Camp (Île Bylot) : modélisation et calibration.....	27

6.	Modélisation des lacs-types	32
7.	Impact de la profondeur moyenne	40
8.	Choix des indicateurs de l'état des habitats thermiques	45
8.1	Indicateurs physiques	45
8.2	Indicateurs biologiques	51
9.	Analyse des résultats	56
9.1	Indicateurs physiques	56
9.1.1	Contenu en chaleur maximal	56
9.1.2	Température moyenne estivale de la couche 0-5 m	68
9.1.3	Température maximale en surface	75
9.1.4	Température maximale en profondeur	85
9.2	Indicateurs biologiques	98
9.2.1	Fraie	98
9.2.2	Incubation (survie des œufs)	108
9.2.3	Croissance des juvéniles	117
9.2.4	Stress thermique chez les adultes	125
9.3	Oxygène dissous	133
10.	Sommaire et Conclusion	139
	Références	141
	Annexe I: Bathymétrie des lacs-types	145
A1.1	Dérivation des bathymétries	145
A1.2	Modélisation du lac Ethel	146
A1.3	Modélisation du lac Baptiste South	146
	Annexe II : Liste des figures des indicateurs physiques	158
1a	Contenu en chaleur maximal	158
1b	Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur	159
1c	Occurrence du maximum de contenu en chaleur	159
1d	Évolution projetée de l'occurrence du maximum de contenu en chaleur	160
2a	Température moyenne de la couche 0-5 m pour JJA	160

2b	Évolution projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m pour JJA .	161
3a	Température maximale à 1,5 m.....	162
3b	Évolution projetée de la température maximale à 1,5 m.....	162
3c	Occurrence de la température maximale à 1,5 m.....	163
3d	Évolution projetée de l'occurrence la température maximale à 1,5 m.....	163
4a	Température maximale en profondeur	164
4b	Évolution projetée de la température maximale en profondeur	165
4c	Occurrence de la température maximale en profondeur	165
4d	Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale en profondeur	166
Annexe III	liste des figures des indicateurs biologiques pour le touladi	167
1.1	Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température près du fond favorable à la fraie	167
1.2	Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie.....	167
1.3	Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie et occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie.....	168
2.1	Cartes 2D : Occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie.....	168
2.2	Cartes 2D : Retard projeté du déclenchement de la fraie.....	169
3.1	Cartes 2D : Durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m présente une température favorable à la fraie.....	170
3.2	Cartes 2D : Changement projeté de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m a une température favorable à la fraie	170
4.1	Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température au fond favorable à la survie des œufs	171
4.2	Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température au fond favorable à la survie des œufs	171
5.	Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Degrés-jours pondérés (incubation) au fond du lac accumulés entre le 1er décembre et le 15 avril	172
6.1	Cartes 2D : Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril).....	172
6.2	Cartes 2D : Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril).....	173

7. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles	173
8.1 Cartes 2D : Nombre de m ³ -jours avec température favorable à la croissance des juvéniles	174
8.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du nombre de m ³ -jours avec température favorable à la croissance des juvéniles	174
9. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Nombre de jours avec température au-dessus de la limite de stress pour les adultes	175
10. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température stressante pour les adultes	175
11.1 Cartes 2D : Volume maximal avec température stressante pour les adultes	176
11.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du volume maximal avec température stressante pour les adultes	176
 Annexe IV : liste des figures des indicateurs biologiques pour l'omble chevalier.....	 177
1.1 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température près du fond favorable à la fraie	177
1.2 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie.....	177
1.3 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie et occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie	178
2.1 Cartes 2D : Occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie.....	178
2.2 Cartes 2D : Retard projeté du déclenchement de la fraie.....	179
3.1 Cartes 2D : Durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m a une température favorable à la fraie	180
3.2 Cartes 2D : Changement projeté de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m a une température favorable à la fraie	180
4.1 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température au fond favorable à la survie des œufs	180
4.2 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température au fond favorable à la survie des œufs	180
5. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Degrés-jours pondérés (incubation) au fond du lac accumulés entre le 1er décembre et le 15 avril	180
Répertoire « 5_NS_weighted_degdays_okT_eggs »	180
6.1 Cartes 2D : Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril).....	181

6.2 Cartes 2D : Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril)	181
7. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles	182
8.1 Cartes 2D : Nombre de m ³ -jours avec température favorable à la croissance des juvéniles	182
8.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du nombre de m ³ -jours avec température favorable à la croissance des juvéniles	183
9. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Nombre de jours avec température au-dessus de la limite de stress pour les adultes	184
10. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température stressante pour les adultes	184
11.1 Cartes 2D : Volume maximal avec température stressante pour les adultes	184
11.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du volume maximal avec température stressante pour les adultes	185

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Nombre de lacs par pixel au Nunavik pour les pixels ayant au moins un lac. Chaque pixel ou tuile représente une région de 0,5° de latitude par 0,5° de longitude. Le nombre total de lacs retenus pour les analyses est de 95 395,	2
Figure 2. Évolution des inerties intra-classes (en haut à gauche) et inter-classes (en haut à droite), des critères Q (en bas à droite) et SPRSQ (en bas à gauche) en fonction du nombre de classes sélectionnées.	5
Figure 3. Dendrogramme. Les abscisses sont les numéros des classes tandis que les ordonnées sont les distances entre les classes basées sur la méthode de Ward (1963).	6
Figure 4. Pourcentage des lacs dans chacune des sept classes.....	7
Figure 5. Distribution des 35 971 lacs de la Classe 1.	9
Figure 6. Distribution des 7 471 lacs de la Classe 2.	9
Figure 7. Distribution des 24 730 lacs de la Classe 3.	10
Figure 8. Distribution des 462 lacs de la Classe 4.	10
Figure 9. Distribution des 25 830 lacs de la Classe 5.	11
Figure 10. Distribution des 898 lacs de la Classe 6.	11
Figure 11. Distribution des 33 lacs de la Classe 7.	12
Figure 12. Grilles utilisées pour les simulations à l'aide du modèle MyLake. À gauche, la grille utilisée dans les rapports précédents et qui couvre tout le Québec et le Labrador; à droite, la grille utilisée pour le Nunavik. Les astérisques indiquent les positions des cinq pixels choisis pour les études de la variabilité nord-sud des sections 4.2, 9.1 et 9.2.....	13
Figure 13. Évolution de la différence entre températures de l'air (°C) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) sur une période de cinq ans (1981-1985) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Les valeurs considérées pour la soustraction sont celles des pixels à ces latitudes, i.e. une moyenne de tous les points de grille inclus dans le pixel lorsqu'il y en a plus d'un.	17
Figure 14. Évolution de la différence entre radiations globales (MJ/m ²) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) sur une période de cinq ans (1981-1985) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Les valeurs considérées pour la soustraction sont celles des pixels à ces latitudes, i.e. une moyenne de tous les points de grille inclus dans le pixel lorsqu'il y en a plus d'un.	18

Figure 15. Évolution de la différence entre vitesses du vent (m/s) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) sur une période de cinq ans (1981-1985) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Les valeurs considérées pour la soustraction sont celles des pixels à ces latitudes, i.e. une moyenne de tous les points de grille inclus dans le pixel lorsqu'il y en a plus d'un. 19

Figure 16. Cartes des différences moyennes mensuelles sur la période 1981-2010 entre les températures de l'air (°C) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) : différences moyennes en janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite). 21

Figure 17. Cartes des différences moyennes mensuelles sur la période 1981-2010 entre les radiations globales (MJ m⁻²) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) : différences moyennes en janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite). 22

Figure 18. Cartes des différences moyennes mensuelles sur la période 1981-2010 entre les vitesses de vent (m s⁻¹) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) : différences moyennes en janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite). 23

Figure 19. Deltas mensuels pour la température de l'air (°C) (à gauche), la radiation globale (MJ/m²) (au centre), et la vitesse du vent (ratio) (à droite) entre la période de référence 1981-2010 et l'horizon 2071-2100 pour la simulation climatique MRCC5_NAM-22_CCCma_CanESM2-run1 (RCP 8,5). Les deltas présentés sont pour les mois de janvier (ligne du haut) et de juillet (ligne du bas). 26

Figure 20. Lacs hors-Québec mentionnés dans le Tableau 2. Le fond de la carte est tiré du site d'ArcticNet. Les positions sont approximatives. 30

Figure 21. Comparaison entre les températures simulées (en vert) et observées (en bleu) pour le Lac-du-camp à cinq profondeurs pour la simulation retenue. 31

Figure 22. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et 35

Figure 23. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et 36

Figure 24. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et 37

Figure 25. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et 38

Figure 26. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC3 (vert) et LC5 (bleu) à cinq.....	39
Figure 27. Différence entre les cycles annuels de température climatologique (°C) 1981-2010 des lacs types LC1	41
Figure 28. Rapports LC1/LC3 de contenu en chaleur maximum (%), à gauche, et de contenu en chaleur volumique maximum (%), à droite.....	42
Figure 29. Différences entre LC1 et LC3 (LC1-LC3) pour la température moyenne (°C) 1981-2010 de la couche 0-5 m pour la période du 1 ^{er} juin au 31 août.....	44
Figure 30. Ligne du haut : cartes de la température moyenne (°C) de la couche 0-5 m pour la période du 1 ^{er} juin au 31 août pour les lacs LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite). Ligne du bas : changements entre 1981-2010 et 2071-2100 pour les mêmes lacs-types.	47
Figure 31. Cartes de l'épaisseur de glace maximum (cm) période 1981-2010 pour les lacs LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite). Les épaisseurs de glace simulées n'ont pas fait l'objet d'une comparaison avec des épaisseurs observées.	48
Figure 32. Cartes du volume minimum avec température sous 15 °C (% du volume du lac) pour la période 1981-2010, pour les lacs LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite).....	49
Figure 33. Cartes du nombre de m ³ -jours avec température entre 5 et 20 °C (avec coefficient décroissant de 1 à 0 entre 15 et 20 °C) (m ³ -jours), pour la période 1981-2010, pour le lac LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite).....	50
Figure 34. 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). Tiré de Ouellet et al. (2020).	53
Figure 35. Lac-type LC3, maximum de contenu en chaleur à l'horizon 2041-2070 en tera-joules (TJ).....	60
Figure 36. Lac-type LC6, maximum de contenu en chaleur à l'horizon 2071-2100 en tera-joules (TJ).....	60
Figure 37. Lac type LC6, période 1981-2010, comparaison des cycles annuels climatologiques à deux pixels pour cinq variables : (a) température à 1,5 m (°C), (b) température à 20,5 m (°C), (c) contenu en chaleur (TJ), (d) température de l'air (°C), et (e) vitesse du vent (m s ⁻¹). Les pixels comparés sont indiqués à la Figure 36. Les coordonnées du pixel nord sont 58,75 °N, -75,75 °O (en bleu) et les coordonnées du pixel sud sont 55,75 °N, -75,75 °O (en rouge). Les points bleu pâle et orange indiquent l'occurrence du maximum sur cycle annuel.	61

Figure 38. Lac type LC6, période 2041-2070, comparaison des cycles annuels climatologiques à deux pixels pour cinq variables : (a) température à 1,5 m (°C), (b) température à 20,5 m (°C), (c) contenu en chaleur (TJ), (d) température de l'air (°C), et (e) vitesse du vent (m s ⁻¹). Les pixels comparés sont indiqués à la Figure 36. Les coordonnées du pixel nord sont 58,75 °N, -75,75 °O (en bleu) et les coordonnées du pixel sud sont 55,75 °N, -75,75 °O (en rouge). Les points bleu pâle et orange indiquent l'occurrence du maximum sur le cycle annuel.	62
Figure 39. Lac type LC6, période 2071-2100, comparaison des cycles annuels climatologiques à deux pixels pour cinq variables : (a) température à 1,5 m (°C), (b) température à 20,5 m (°C), (c) contenu en chaleur (TJ), (d) température de l'air (°C), et (e) vitesse du vent (m s ⁻¹). Les pixels comparés sont indiqués à la Figure 36. Les coordonnées du pixel nord sont 58,75 °N, -75,75 °O (en bleu) et les coordonnées du pixel sud sont 55,75 °N, -75,75 °O (en rouge). Les points bleu pâle et orange indiquent l'occurrence du maximum sur le cycle annuel.	63
Figure 40. Lac type LC3, décalage projeté pour le contenu	65
Figure 41. Lac type LC6, décalage projeté pour le contenu en chaleur maximal entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).	65
Figure 42. Lac-type LC4, période 2041-2070, température moyenne de la couche 0-5m en été (du 1 ^{er} juin au 31 août) (°C).....	69
Figure 43. Lac-type LC3, augmentation projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m en été (du 1 ^{er} juin au 31 août) entre les périodes 1981-2010 et 2041-2070 (°C décennie ⁻¹).....	70
Figure 44. Lac-type LC3, augmentation projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m en été (du 1 ^{er} juin au 31 août) entre les périodes 2041-2070 et 2071-2100 (°C décennie ⁻¹).....	71
Figure 45. Lac-type LC5, période 1981-2010, température maximale à 1,5 m (°C).....	77
Figure 46. Lac-type LC5, augmentation projetée de la température maximale à 1,5 m entre les périodes 1981-2010 et 2041-2070 (°C par décennie).....	78
Figure 47. Lac-type LC5, augmentation projetée de la température maximale à 1,5 m entre les périodes 2041-2070 et 2071-2100 (°C par décennie).....	79
Figure 48. Lac-type LC5, décalage projeté pour la température maximale à 1,5 m entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).	80
Figure 49. Lac-type LC5, période 1981-2010, température maximale à 9,5 m (°C).....	86
Figure 50. Lac-type LC6, période 2071-2100, température maximale à 20,5 m (°C).....	87

Figure 51. Lac-type LC5, augmentation projetée de la température maximale à 9,5 m entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 (°C par décennie).....	88
Figure 52. Lac-type LC6, augmentation projetée de la température maximale à 20,5 m entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 (°C par décennie).....	89
Figure 53. Lac-type LC5, décalage projeté pour la température maximale à 9,5 m entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).	90
Figure 54. Lac-type LC6, décalage projeté pour la température maximale à 20,5 m entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).	91
Figure 55. Lac-type LC4, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour le touladi ($6 \leq T \leq 14$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 11$ °C).	99
Figure 56. Lac-type LC5, fraction de l'aire sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour le touladi $6 \leq T \leq 14$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 11$ °C).	100
Figure 57. Lac type LC4, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour l'omble chevalier ($0,5 \leq T \leq 7$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 8$ °C).	101
Figure 58. Lac type LC5, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour l'omble chevalier ($0,5 \leq T \leq 7$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 8$ °C).	102
Figure 59. Lac type LC4, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la survie des œufs pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.....	109
Figure 60. Lac type LC5, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la survie des œufs pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu),	

2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C..... 110

Figure 61. Lac type LC5, période 2041-2070, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril) avec température près du fond favorable à la survie des œufs pour le touladi (%). La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C... 111

Figure 62. Lac type LC4, profils du nombre de degrés-jours avec température favorable à l'incubation des œufs pour le touladi à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les degrés-jours sont accumulés sur la période allant du 1^{er} décembre au 15 avril. Les contributions journalières à chaque profondeur sont pondérées par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C..... 112

Figure 63. Lac type LC5, profils du nombre de degrés-jours avec température favorable à l'incubation des œufs pour le touladi à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les degrés-jours sont accumulés sur la période allant du 1^{er} décembre au 15 avril. Les contributions journalières à chaque profondeur sont pondérées par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C..... 113

Figure 64. Lac type LC4, fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 10 °C, égale à 1 entre 10 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 23,5 °C..... 119

Figure 65. Lac type LC5, fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 10 °C, égale à 1 entre 10 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 23,5 °C..... 120

Figure 66. Lac type LC4, fraction du volume du lac avec température stressante pour le touladi adulte : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010. La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 18 et 23,5 °C..... 129

Figure 67. Lac type LC5, fraction du volume du lac avec température stressante pour le touladi adulte : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010. La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 18 et 23,5 °C. 130

Figure 68. Lac type LC4, profils du nombre de jours avec température stressante pour le touladi adulte ($T \geq 18$ °C) à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010. 131

Figure 69. Lac type LC5, profils du nombre de jours avec température stressante pour le touladi adulte ($T \geq 18$ °C) à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010. 132

Figure 70. Positions des quatre pixels (les « x ») utilisés dans les comparaisons nord-sud de l'oxygène dissous présentées aux Figures 72 et 73. Tiré de Bélanger et al. (2017b) 135

Figure 71. Comparaison des concentrations en oxygène dissous observées (+ rouges) et simulées (lignes bleues) dans le lac Simoncouche. Tiré de Bélanger et al. (2017b). 136

Figure 72. Différences dans les concentrations en oxygène dissous estimées entre les périodes 2041-2070 et 1981-2010 (futur moins passé) à quatre latitudes : 48.25 °N (en rouge), 51.25 °N (en orange), 55.75 °N (en vert) et 59.25 °N (en bleu). Tiré de Bélanger et al. (2017b). 137

Figure 73. Différences dans les concentrations en oxygène dissous estimées entre les périodes 2071-2100 et 1981-2010 (futur moins passé) à quatre latitudes : 48.25 °N (en rouge), 51.25 °N (en orange), 55.75 °N (en vert) et 59.25 °N (en bleu). Tiré de Bélanger et al. (2017b). 138

Figure 74. Bathymétrie des lacs-types LC1, LC2, LC3 et LC4. Colonne de gauche : l'aire (en ha) en fonction de la profondeur (en m); colonne de droite : rayon (en km) du lac en fonction de la profondeur (en m). 154

Figure 75. Bathymétrie des lacs-types LC5, LC6 et LC7. Colonne de gauche : l'aire (en ha) en fonction de la profondeur (en m); colonne de droite : rayon (en km) du lac en fonction de la profondeur (en m). 155

Figure 76. Lac Ethel (Alberta) : températures observées (points bleus) et températures modélisées (lignes vertes) à six profondeurs. 156

Figure 77. Lac Baptiste-sud (Alberta) : températures observées (points bleus) et températures modélisées (lignes vertes) à six profondeurs. 157

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résultats de la classification : principales statistiques de chacune des sept classes.	8
Tableau 2. Lacs réels simulés au cours des dernières années et disponibles pour la modélisation des lacs-types.....	29
Tableau 3. Lacs réels BLC, BPTS, CHI, ETL, JAC et NKM, ainsi que les sept lacs-types. Les acronymes entre parenthèses dans la colonne 1 indiquent quel lac réel a été utilisé pour les calibrations (intrants du modèle MyLake) du lac-type correspondant lors des simulations.....	34
Tableau 4. Métriques thermiques pour trois stades de vie du touladi et de l'omble chevalier. Tiré de Ouellet et al. (2020).	51
Tableau 5. Seuils thermiques en °C pour chaque métrique du Tableau 4. Tous les seuils sont tirés de la littérature scientifique. Tiré de Ouellet et al. (2020).	52
Tableau 6. Contenu en chaleur maximal : moyenne, plus bas maximum et plus haut maximum sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (TJ)..	57
Tableau 7. Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%).	58
Tableau 8. Occurrence du maximum de contenu en chaleur : occurrence moyenne, la plus hâtive et la plus tardive sur le domaine 1981-2010.....	64
Tableau 9. Évolution projetée de l'occurrence du maximum de contenu en chaleur : changement moyen, plus grande avance.....	67
Tableau 10. Température moyenne de la couche 0-5 m pour la période du 1 ^{er} juin au 31 août : valeur moyenne, la plus basse et la plus élevée sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (°C).	72
Tableau 11. Évolution projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m du 1 ^{er} juin au 31 août : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs-types et trois intervalles (%).	73
Tableau 12. Température maximale à 1,5 m : maximum moyen, plus bas et plus haut maximum sur le domaine pour les sept lacs-types et trois périodes de simulation (°C). .	81

Tableau 13. Évolution projetée de la température maximale à 1,5 m : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs-types et trois intervalles (°C par décennie).	82
Tableau 14. Occurrence de la température maximale à 1,5 m : occurrence moyenne, la plus hâtive et la plus tardive sur le domaine 1981-2010 pour les sept lacs-types et trois périodes de simulation (jour de l'année).....	83
Tableau 15. Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale à 1,5 m : changement moyen, plus grande avance et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs-types et trois intervalles (jours).	84
Tableau 16. Température maximale en profondeur : maximum moyen, plus bas et plus haut maximum sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (°C).....	92
Tableau 17. Évolution projetée de la température maximale en profondeur : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (°C par décennie).	93
Tableau 18. Occurrence de la température maximale en profondeur : occurrence moyenne, la plus hâtive et la plus tardive sur le domaine 1981-2010 pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (jour de l'année).	94
Tableau 19. Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale en profondeur : changement moyen, plus grande avance et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours).	95
Tableau 20. Évolution projetée de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m sera à une température favorable à la fraie pour le touladi ($6 \leq T \leq 14$ °C) : changement moyen, plus petit changement et plus grand changement sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours).....	105
Tableau 21. Retard projeté du déclenchement de la fraie pour le touladi : retard moyen, plus petit retard et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours). La date du déclenchement de la fraie est estimée via la température de surface ($T = 11$ °C).	106
Tableau 22. Retard projeté du déclenchement de la fraie pour l'omble chevalier : retard moyen, plus petit retard et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours). La date du déclenchement de la fraie est estimée via la température de surface ($T = 8$ °C).	107
Tableau 23. Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver pour le touladi : valeur moyenne, plus petite valeur et plus grande valeur sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (%). La moyenne	

hivernale est calculée sur la période du 1er décembre au 15 avril. La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

..... 115

Tableau 24. Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver pour le touladi : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%). La moyenne hivernale est calculée sur la période allant du 1er décembre au 15 avril. La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C. 116

Tableau 25. Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles pour le touladi : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%). La contribution journalière du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 10 °C, égale à 1 entre 10 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 23,5 °C. 123

Tableau 26. Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles pour l'omble chevalier : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%). La contribution journalière du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 12 °C, égale à 1 entre 12 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 21 °C. 124

Tableau 27. Volume maximal avec température stressante pour le touladi adulte : valeur moyenne, plus petite valeur et plus grande valeur sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (% du volume du lac). La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 18 et 23,5 °C. 126

Tableau 28. Volume maximal avec température stressante pour l'omble chevalier adulte : valeur moyenne, plus petite valeur et plus grande valeur sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (% du volume du lac). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour les périodes 1981-2010 et 2041-2070. La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 21 et 24 °C. 127

Tableau 29. Superficie en surface, volume, profondeur maximale et profondeur moyenne des sept lacs types et des lacs réels ayant servi à dériver les bathymétries des lacs types. Le lac réel utilisé est indiqué entre parenthèses à côté du nom du lac type. 147

Tableau 30. Bathymétrie du modèle du lac BLC et bathymétries des modèles des lac-types LC1, LC3 et L5 dérivées à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.	148
Tableau 31. Bathymétrie du modèle du lac NKM et bathymétrie du modèle du lac-type LC2 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.	149
Tableau 32. Bathymétrie du modèle du lac CHI et bathymétrie du modèle du lac-type LC4 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.	150
Tableau 33. Bathymétrie du modèle du lac Baptiste-sud et bathymétrie du modèle du lac-type LC6 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.	151
Tableau 34. Bathymétrie du modèle du lac Jacques-Cartier et bathymétrie du modèle du lac-type LC7 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.	152

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Sigles des lacs réels utilisés pour les étalonnages des lacs-types et des bathymétries

BLC	lac du Camp sur l'Île Bylot (Nunavut)
BPTS	lac Baptiste South (Alberta)
CHI	lac Chibougamau (Québec)
ETL	lac Ethel (Alberta)
JAC	lac Jacques-Cartier (Québec)
NKM	lac Nakamun (Alberta)

LC1 à LC7 lacs-types des classes 1 à 7

Périodes de 30 ans simulées

past	la période passée 1981-2010
fut2	la période future 2041-2070
fut3	la période future 2071-2100

OCH omble chevalier

okT température favorable

RCP85 le scénario *Representative Concentration Pathways* RCP 8.5

sim4 la simulation MRCC5_NAM-22_CCCma_CanESM2-run1 pilotée par le modèle global CanESM2

TLD touladi

THQI_A Thermal Habitat Quality Index – Area. Il s'agit en fait de la somme de plusieurs aires où la contribution de chaque élément est pondérée suivant quatre limites de température, soit critique froide, optimale froide, optimale chaude et critique chaude. Le coefficient pondérateur varie linéairement de 0 à 1 entre les limites critique et optimale froides, est constant à 1 entre les limites optimales, et varie linéairement de 1 à 0 entre les limites optimales et critique chaudes.

THQI_V Thermal Habitat Quality Index – Volume. Il s'agit en fait de la somme de plusieurs volumes où la contribution de chaque élément est pondérée suivant quatre limites, soit critique froide, optimale froide, optimale chaude et critique chaude. Le coefficient pondérateur varie linéairement de 0 à 1 entre les limites critiques et optimale froides, est constant à 1 entre les limites optimales, et varie linéairement de 1 à 0 entre les limites optimales et critiques chaudes.

1. Introduction

L'objectif du projet de recherche est de déterminer l'impact potentiel des changements climatiques sur les habitats thermiques des salmonidés des lacs et rivières du Nunavik. Plus particulièrement nous proposons de

- Produire une cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques des salmonidés en lacs aux horizons 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour des lacs-types du nord du Québec, basés sur au moins un scénario de changement climatique.
- Produire les premiers modèles statistiques permettant de générer des scénarios thermiques pour certaines rivières du Nord du Québec et du Nunavik sur les horizons 2041-2070 et 2071-2100 à partir des séries chronologiques récemment récoltées par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP).
- Concevoir et valider des indicateurs biologiques basés sur la thermie de l'état des lacs pour le touladi et l'omble chevalier.

Le troisième objectif a été ajouté lors de la signature d'un avenant avec le MFFP en novembre 2019.

Ce rapport traite seulement du volet du projet portant sur les lacs. Nos travaux sont basés sur le modèle unidimensionnel MyLake (Saloranta et Andersen, 2007) que nous avons utilisé en 2010-2013 (Bélanger et al. 2013) afin de modéliser l'évolution saisonnière des habitats thermiques des salmonidés dans les lacs du Québec le long d'une section entre 45 °N et 60 °N. Lors d'un deuxième projet (Bélanger et al., 2017a; Bélanger et al., 2017b), nous avons ajouté le traitement de l'oxygène dissous et nous avons produit une cartographie des habitats thermiques à l'ensemble du Québec à partir de trois lacs : un petit (Simoncouche), un moyen (Stewart) et un grand (Jacques-Cartier). Le MFFP désirait cependant être en mesure de mieux comprendre les impacts des changements climatiques pour les différents secteurs du Nord québécois en incorporant des données sur la caractérisation des lacs s'y trouvant. Pour ce faire, les données du Cadre de référence hydrique du Québec (CRHQ) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) ainsi que les données du Réseau Hydrographique National (RHN) du Ministère des ressources naturelles du Canada (MRNC) ont été utilisées. Une des variables les plus importants pour la modélisation des habitats thermiques est la bathymétrie du lac considéré. Nous utilisons la profondeur moyenne estimée indirectement dans les bases de données du MRNC, du MFFP et du MELCC.

La région considérée est le Nunavik (Figure 1). La banque de données du RHN contient de l'information sur 2 419 279 lacs répartis en 73 sous-régions distinctes localisées entre 53,5 °N et 63,5 °N en latitude, et entre 080 °O et 063 °O en longitude. Afin de produire les graphiques, la région est ensuite divisée en 646 tuiles (19 par 34) de 0,5° de latitude par 0,5° de longitude. Après avoir éliminé les valeurs extrêmes, les doublons, les

lacs et de moins de 10 ha et les lacs d'un mètre ou moins de profondeur moyenne, il reste 95 395 lacs disponibles pour une analyse de classification multivariée. C'est la distribution de ces 95 395 lacs (nombre de lacs par pixel) qui est présentée à la Figure 1.

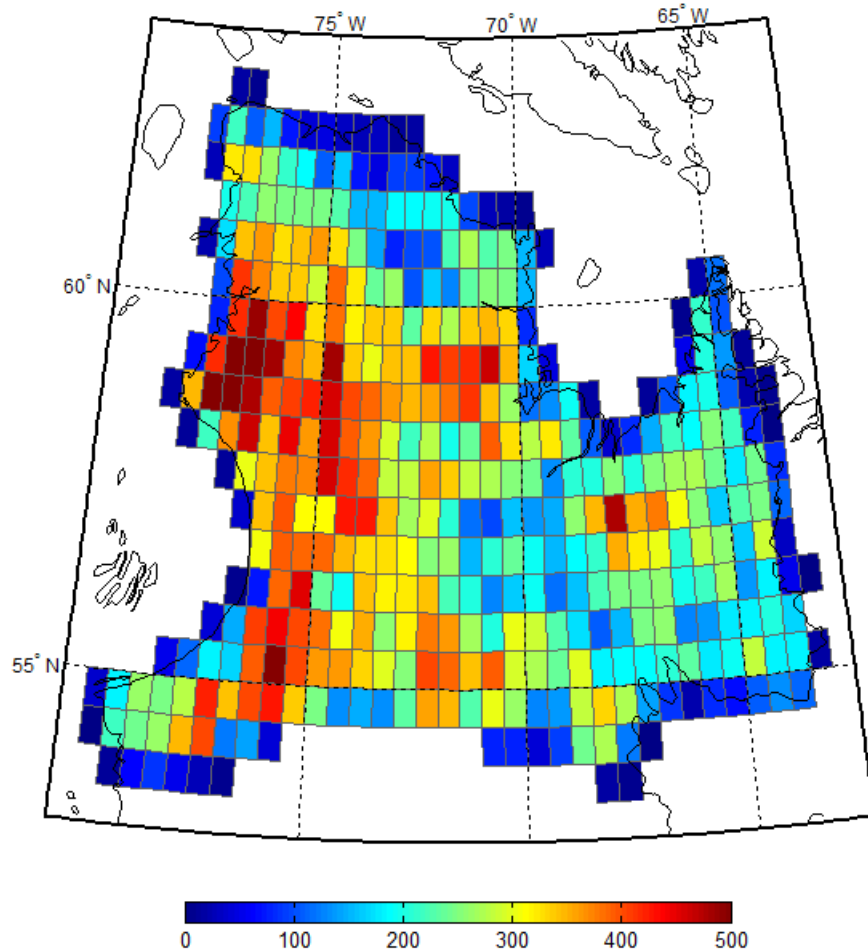


Figure 1. Nombre de lacs par pixel au Nunavik pour les pixels ayant au moins un lac. Chaque pixel ou tuile représente une région de 0,5° de latitude par 0,5° de longitude. Le nombre total de lacs retenus pour les analyses est de 95 395,

Le Chapitre 2 présente la méthode et les résultats de la classification des lacs du Nunavik. Le modèle MyLake est brièvement décrit dans le Chapitre 3. Le Chapitre 4 expose les méthodes à l'aide desquelles les données climatiques atmosphériques et limnologiques sont dérivées. Les Chapitres 5 et 6 présentent les étapes et les résultats de la modélisation des lacs réels et des lacs-types, respectivement. Le Chapitre 7 discute de l'impact de la profondeur moyenne sur les comportements des habitats thermiques. Le Chapitre 8 propose une série d'indicateurs physiques et biologiques des habitats thermiques. Le Chapitre 9 présente les résultats de la cartographie des indicateurs physiques et biologiques. Les conclusions sont présentées dans le Chapitre 10.

2. Détermination des lacs-types

2.1 Méthodologie

Nous avons utilisé l'approche de Chimi Chiadjeu et al. (2016) pour classer les 95 395 lacs répartis entre les 73 régions du Nunavik selon le Réseau Hydrographique National (RHN) du Ministère des ressources naturelles du Canada. Nous n'avons cependant conservé que trois variables explicatives (sur quatre) pour la classification : la superficie du lac (*Sup*), le développement du littoral (*DL*) et la profondeur moyenne estimée (*Zmoy*). Le développement du littoral est le rapport entre le périmètre réel et le périmètre hypothétique du lac s'il était un cercle. Il est défini par :

$$DL = \frac{P}{2\sqrt{\pi * Sup}}$$

où *P* est le périmètre du lac. Quant aux profondeurs moyennes (*Zmoy*), elles proviennent de la Direction de l'expertise de la biodiversité du MELCC. Elles sont estimées à l'aide de modèles régressifs développés à partir de la bathymétrie connue pour les lacs à relief doux (pente moyenne du bassin versant $\leq 10\%$) et à relief fort (pente moyenne du bassin versant $> 10\%$). Les calculs reposent sur la superficie du lac (*Sup*, en km² ou en ha), la pente moyenne du bassin versant du plan d'eau (en %) et l'indice de développement du littoral (*DL*, sans unités) de la manière suivante :

$$Z_{moy} = \begin{cases} 2,718 * (1,431 * (0,238 * \log(Sup)) * (0,104 * S) * (0,177 * DL)) * 1,086 & \text{si } S \leq 10\% \\ 2,718 * (1,431 * (1,789 * \log(Sup)) * (0,049 * S) * (0,214 * DL)) * 1,070 & \text{si } S > 10\% \end{cases}$$

où la valeur utilisée pour la superficie dans les calculs, *S*, est égale à *Sup* * 0,4. La variable de Chimi Chiadjeu et al. (2016) que nous avons ignorée est l'altitude car elle n'entre pas en ligne de compte dans les simulations à l'aide de MyLake. Les effets de l'altitude sont inclus implicitement dans les variables météorologiques locales. En effet, les variables météorologiques comme la température ou la pression atmosphérique, entre autres, dépendent de l'altitude de la station de mesure ou du point de simulation numérique. Même si l'altitude est utile pour simplement classer les lacs du Québec, elle devient inutile pour la modélisation des habitats thermiques car elle ne fait qu'introduire des classes qui ne diffèrent que par l'altitude. Les onze classes identifiées (pour le Québec et le Labrador) par l'approche de Chimi Chiadjeu et al. (2016) se réduisent maintenant à sept.

L'algorithme de classification comprend trois étapes différentes:

1. Une analyse préliminaire.
2. Une analyse en composantes principales (ACP) (Nelitz et al. 2007)

3. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) (Ward 1963)

À la première étape, nous menons une analyse préliminaire afin d'extraire les valeurs extrêmes des paramètres morphologiques. Cette étape nous permet de fixer les seuils pour les différentes variables caractérisant les lacs. La profondeur moyenne minimale a été fixée à 1 m tandis que la surface minimale a été fixée à 10 ha. Les valeurs extrêmes (aberrantes ou « outliers » en anglais) sont retirées à l'aide du test de Grubbs (1969). Le nombre total de lacs passe alors de 2 419 279 à 95 395. La seconde étape (ACP) nous permet non seulement de réduire la dimension des données, mais aussi de définir un sous-espace multivarié cartésien dans lequel nos données seront facilement représentées. En plus de conserver les informations contenues dans l'espace des données initiales, les combinaisons des variables originales qui constituent les composantes principales dans ce sous-espace sont faiblement corrélées. La troisième étape permet d'effectuer la Classification Ascendante Hiérarchique proprement dite. Nous effectuons la CAH sur les variables projetées dans le sous-espace obtenu après l'ACP.

La classification par hiérarchie peut se faire de façon ascendante ou descendante. Dans cette étude nous avons utilisé la Classification Ascendante Hiérarchique (Ward 1963). La CAH appartient au groupe des méthodes issues de l'agrégation. Le principe est le suivant. Initialement, on suppose que chaque individu représente une classe, ensuite on regroupe les individus entre eux en fonction de l'indice de dissimilarité choisi jusqu'à former le nombre de classes souhaité. Bien que coûteux en temps de calcul et en espace mémoire, cette méthode permet, grâce à la lecture de l'arbre (appelé un dendrogramme), de déterminer le nombre optimal de classes (Nopt). Nopt est ici le nombre de classes qui permet statistiquement de mieux différencier les individus de classes différentes et de mieux regrouper les individus d'une même classe. Le choix du nombre de classes se fait généralement visuellement à partir du dendrogramme ou à l'aide de critères statistiques. Il existe plusieurs critères permettant de déterminer de façon automatique le nombre optimal. Dans cette étude, nous avons utilisé la statistique « Semi-partial R-squared » (SPRSQ) et la proportion de la variance expliquée par les classes (Q) définies par :

$$SPRSQ = \frac{\Delta_{Inertie\ inter}}{(Inertie\ inter + Inertie\ intra)}$$

$$Q = \frac{Inertie\ inter}{Inertie\ inter + Inertie\ intra}$$

où $\Delta_{Inertie\ inter}$ est la différence d'inertie inter-classes, i.e. entre les centres de masse de chaque classe et le centre de masse de l'ensemble des données. Les inerties sont définies par :

$$InertIntra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nc} \sum_{j=1}^{n_i} d^2(g_i, x_j)$$

$$InertInter = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nc} n_i * d^2(g_i, G)$$

où N est le nombre d'individu, N_c le nombre de classe, n_i est le nombre d'individus dans une classe i , g_i est le centre de la classe i , G le centre de gravité de l'ensemble des individus et d est une mesure de distance. L'inertie inter-classes représente une mesure de distance entre les classes et l'inertie intra-classe la distance entre les éléments d'une classe et le centre de gravité de la classe. Lorsque le nombre de classes augmente, l'inertie inter-classes augmente et l'inertie intra-classe diminue. Lorsque le nombre de classes augmente, Q augmente et tend vers 1. Quant à la statistique SPRSQ, dans l'ensemble elle décroît quand le nombre de classes augmente. Le nombre optimal de classes est la valeur pour laquelle on observe la dernière plus grande variation de Q . Si on utilise la SPRSQ, le nombre optimal de classes est le maximum qui suit une faible valeur de SPRSQ.

Parmi les méthodes de regroupement de classes utilisées en classification hiérarchique, nous avons utilisé la méthode de Ward (1963). Cette méthode est basée sur la minimisation de la variance intra-classe. Ici, un individu appartient à la classe dont la variance du groupe composé de l'individu et des autres individus de ladite classe est minimale. La méthode de Ward apparaît comme celle qui maximise l'inertie intra-classe. Les résultats sont présentés aux Figures 2 et 3.

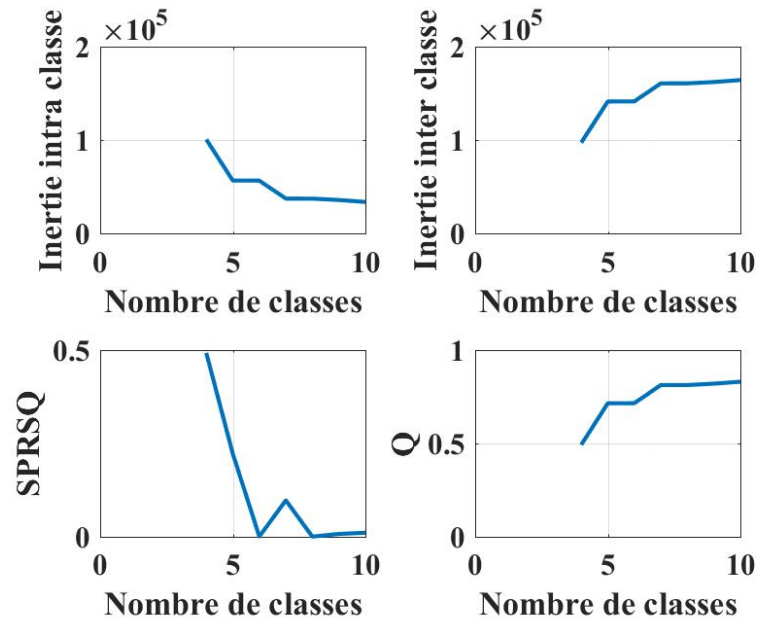


Figure 2. Évolution des inerties intra-classes (en haut à gauche) et inter-classes (en haut à droite), des critères Q (en bas à droite) et SPRSQ (en bas à gauche) en fonction du nombre de classes sélectionnées.

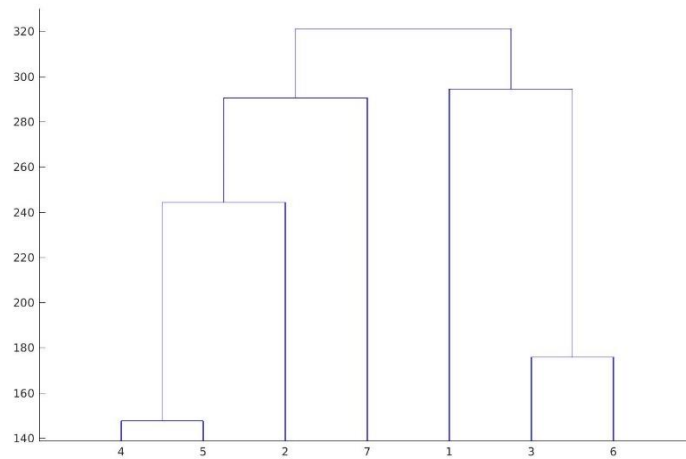


Figure 3. Dendrogramme. Les abscisses sont les numéros des classes tandis que les ordonnées sont les distances entre les classes basées sur la méthode de Ward (1963).

Sur la Figure 2, les plateaux sont atteints à partir de sept classes, sauf pour le SPRSQ pour lequel le plateau est atteint à partir de six classes. Nous avons donc choisi d'utiliser sept classes et le dendrogramme de la classification hiérarchique des classes est présenté sur la Figure 3 tandis que les statistiques des sept classes sont présentées dans le Tableau 1. Les pourcentages de lacs dans chaque classe sont illustrés à la Figure 4.

La classe 1 contient 35 971 lacs sur 95 395, soit 37,71%, la troisième classe 24 730 (25,92%) et la cinquième classe 25 830 (27,08%); 90,7% des lacs appartiennent donc aux classes 1, 3 et 5. D'un autre côté, si on regroupe les classes identifiées par Chimi Chiadjeu et al. (2016) qui ne se distinguent que par l'altitude (dans leur Tableau 3 et leur Figure 11), les deux regroupements les plus importants représentent environ 43% et 23% de tous les lacs des treize régions étudiées en 2016. Les résultats sont donc semblables. Nos 73 sous-régions incluent les sous-régions du Nunavik de Chimi Chiadjeu et al. (2016).

Nous avons précédemment constaté que, même si les classes étaient semblables, une moitié des lacs pouvaient être répartis en six classes, tandis que la seconde moitié devait être répartie en sept classes. Un des résultats de notre classification est donc qu'il faut utiliser le nombre maximum d'individus pour effectuer une classification représentative de tout l'échantillon.

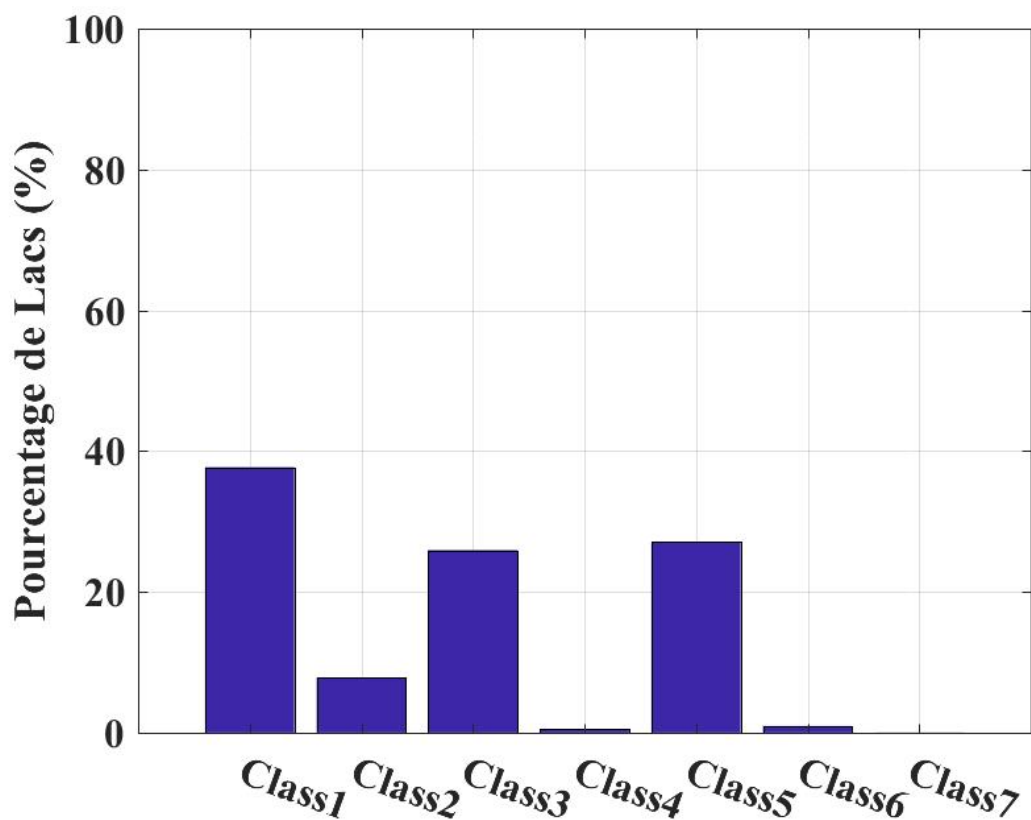


Figure 4. Pourcentage des lacs dans chacune des sept classes.

2.2 Résultats

Les résultats de la classification des lacs du Nunavik sont présentés dans le Tableau 1 et aux Figures 5 à 8. Chimi Chiadjeu et al. (2016) ont montré que la médiane représentait mieux, statistiquement, une classe que la moyenne. Nous utiliserons dorénavant la médiane de chacun des paramètres (S, DL et Zmoy) pour caractériser les sept lacs-types du Nunavik que nous avons retenus.

Tableau 1. Résultats de la classification : principales statistiques de chacune des sept classes.

Classes	Médiane				Nombre lacs	%
	S (ha)	DL	Z moy (m)			
1	15,21	1,64	2,83		35971	37,71
2	185,35	4,07	3,94		7471	7,83
3	26,17	1,69	5,38		24730	25,92
4	2186,13	7,13	8,27		462	0,48
5	29,72	2,51	3,73		25830	27,08
6	41,95	1,78	13,88		898	0,94
7	14176,98	14,19	17,14		33	0,03
				Total	95 395	99,99
Classes	Moyenne				STD	
	S (ha)	DL	Z moy (m)		S (ha)	DL
1	20,14	1,66	2,80	14,28	0,31	0,65
2	290,22	4,40	4,25	293,59	1,08	1,81
3	52,74	1,76	5,82	79,70	0,41	1,64
4	2755,78	7,36	8,48	1762,62	3,32	3,89
5	45,21	2,56	3,60	44,24	0,40	1,30
6	124,31	1,86	16,14	258,03	0,48	6,89
7	17455,49	13,98	17,14	8712,45	5,08	5,83
Classes	Maximum				Minimum	
	S (ha)	DL	Z moy (m)		S (ha)	DL
1	199,92	2,45	4,38	10,00	1,02	1,21
2	1848,38	9,33	12,07	10,01	1,35	1,13
3	1083,55	4,11	13,50	10,00	1,03	3,63
4	9733,99	23,34	21,17	267,73	1,85	2,01
5	463,81	3,65	6,77	10,00	1,79	1,10
6	3412,58	3,96	83,31	10,04	1,01	10,87
7	47493,10	25,16	28,79	8779,94	5,83	6,15

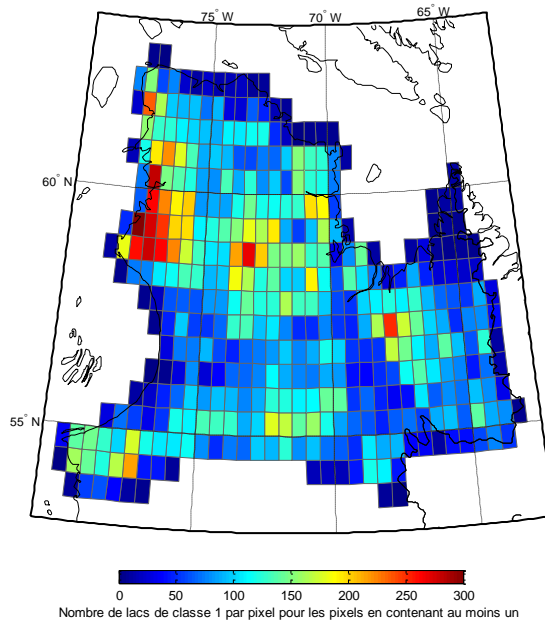


Figure 5. Distribution des 35 971 lacs de la Classe 1.

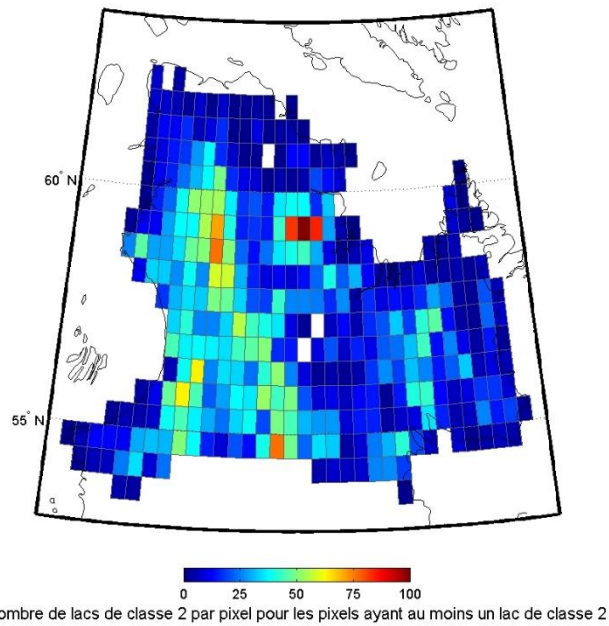


Figure 6. Distribution des 7 471 lacs de la Classe 2.

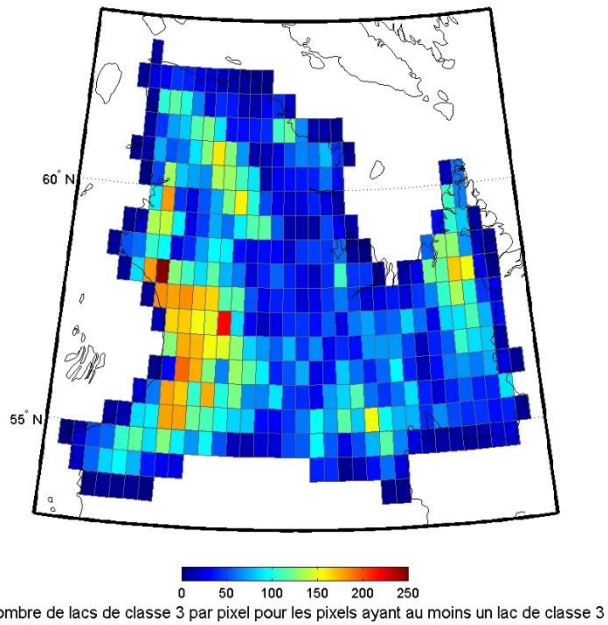


Figure 7. Distribution des 24 730 lacs de la Classe 3.

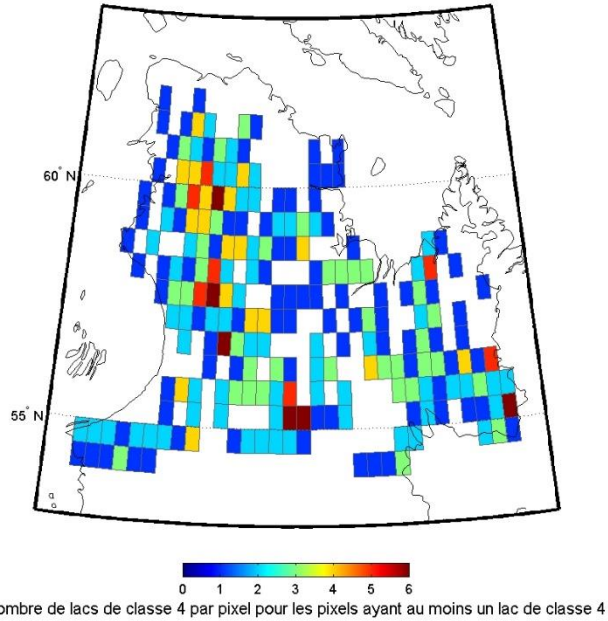


Figure 8. Distribution des 462 lacs de la Classe 4.

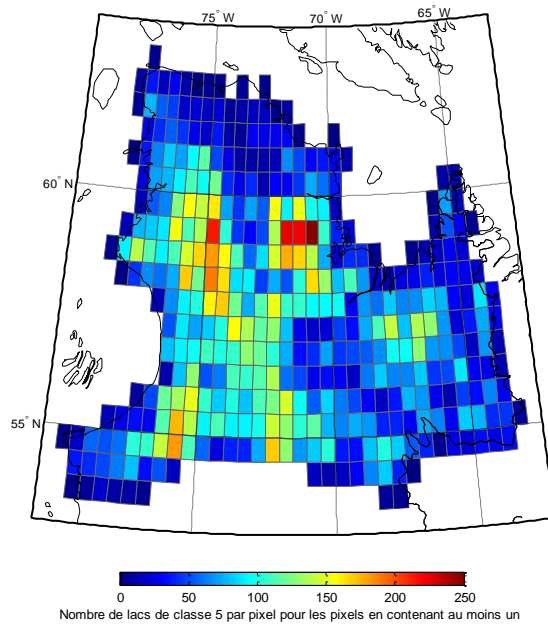


Figure 9. Distribution des 25 830 lacs de la Classe 5.

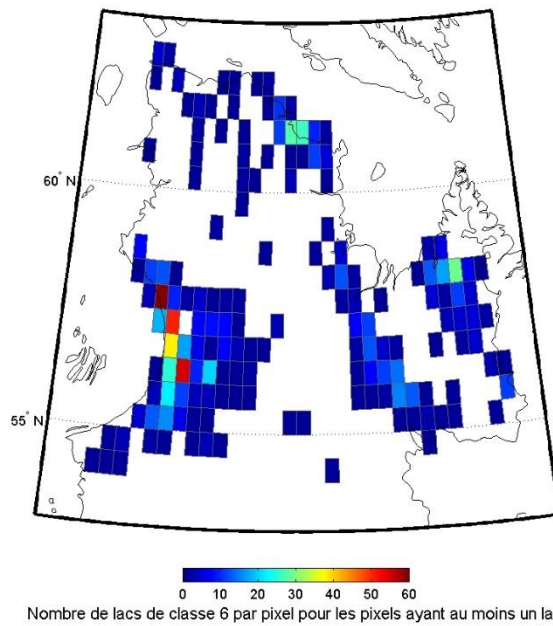


Figure 10. Distribution des 898 lacs de la Classe 6.

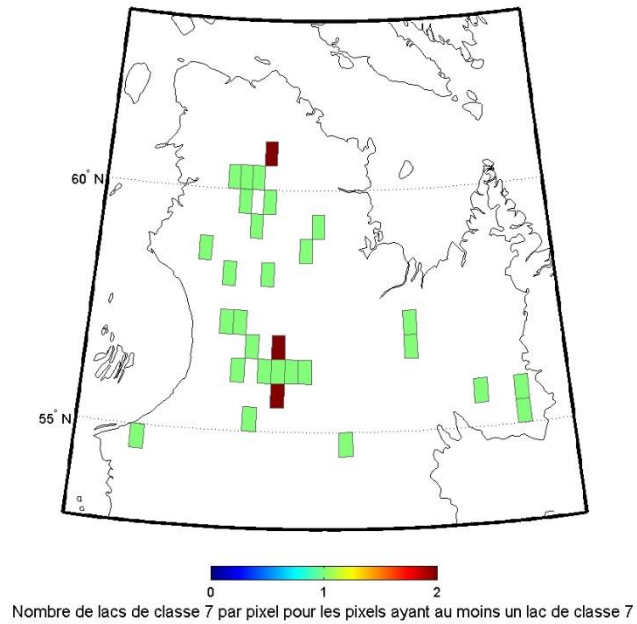


Figure 11. Distribution des 33 lacs de la Classe 7.

Les lacs des classes 1, 2, 3 et 5 représentent 98,54 % des 95 395 lacs du Nunavik considérés pour la classification. Comme les lacs des classes 4, 6 et 7 ne contribuent que 462 (Figure 8), 898 (Figure 10) et 33 (Figure 11) lacs chacun, nous allons concentrer nos exemples dans les chapitres suivants sur les quatre classes de lacs-types les plus fréquentes afin de réduire le volume de ce rapport. Cependant, les sept classes sont traitées de la même façon et toutes les figures sont disponibles sous forme numérique.

3. Présentation du modèle MyLake

Nous utilisons le modèle MyLake (Multi-Year Lake model) développé à l'Institut NIVA (Norwegian Institute for Water Research) par Saloranta et Andersen (2007). Ce modèle unidimensionnel simule l'évolution de la température sur une colonne d'eau dans laquelle chaque couche représente le volume de tout le lac entre deux profondeurs; nous utilisons des couches de 1 m d'épaisseur. Le modèle simule aussi l'évolution de la couverture de glace et de neige. Son pas de temps est de 24 h et il nécessite les données suivantes : la bathymétrie du lac, les conditions thermiques initiales, ainsi que les valeurs météorologiques journalières moyennes de sept variables. Ces variables sont la température de l'air, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, les précipitations, la radiation solaire totale et la couverture nuageuse (Saloranta et Anderson 2005). Il est aussi possible de spécifier la température et le volume des eaux entrant et sortant du lac. (1156 tuiles; Figure 9,

Dans Bélanger et al. (2013 et 2017) nous avons simulé l'évolution de la température de l'eau et la couverture glacielle à partir d'observations de la température de l'eau et d'observations météorologiques locales. Lors de chacune des simulations, les températures modélisées reproduisaient adéquatement les températures observées. Nous avons récemment (Bélanger et al. 2017) produit des cartes de l'impact des changements climatiques pour un certain nombre d'indicateurs (Chapitre 8) des habitats thermiques

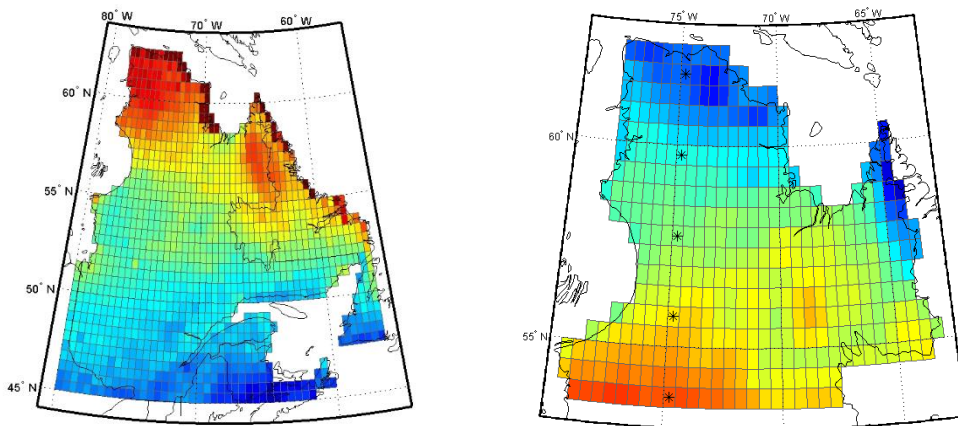


Figure 12. Grilles utilisées pour les simulations à l'aide du modèle MyLake. À gauche, la grille utilisée dans les rapports précédents et qui couvre tout le Québec et le Labrador; à droite, la grille utilisée pour le Nunavik. Les astérisques indiquent les positions des cinq pixels choisis pour les études de la variabilité nord-sud des sections 4.2, 9.1 et 9.2.

pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les trois lacs considérés (un petit, un moyen et un grand) étaient placés à un grand nombre de positions à gauche) sur l'ensemble du territoire québécois résultant en une résolution de 0,5° en latitude et en longitude, allant de 45,25 à 62,25 °N, et de 079,25 à 056,25 °O). Les lacs-types sont positionnés au centre de chacune des 646 tuiles (19 par 34) de la Figure 12 (à droite) et le

modèle est exécuté en utilisant les conditions météorologiques correspondantes (Chapitre 4). La résolution est aussi de $0,5^\circ$ de latitude par $0,5^\circ$ de longitude, couvrant un peu plus que le Nunavik. Les astérisques sur la carte du Nunavik indiquent les positions des cinq pixels choisis pour l'étude pour les études de la variabilité nord-sud des variables météorologiques (section 4.2), des indicateurs physiques (section 9.1) et des indicateurs biologiques (section 9.2).

4. Données climatiques : météorologiques et limnologiques

Le calcul de températures climatologiques (i.e. longues séries chronologiques de température de l'eau simulées) requière l'utilisation de longues séries de données météorologiques pour forcer MyLake, soient généralement des séries de trente ans. Des séries observationnelles aussi longues n'existent pas à résolution de 50 km ou moins sur de grands territoires. On doit donc avoir recours à des données de réanalyse dont l'avantage est de fournir un portrait complet de l'état du système terrestre sur de grands territoires et sur de longues périodes. La réanalyse consiste à combiner un modèle de prévision météorologique et des observations pour produire, généralement pour l'ensemble du globe, des archives d'un grand nombre de variables atmosphériques et océaniques sur des grilles à une résolution temporelle de quelques heures pour plusieurs décennies. On appelle les données ainsi produites des réanalyses, ou données de réanalyse.

Les modèles météorologiques s'améliorent d'année en année autant du point de vue de la résolution spatiale que du point de vue de la justesse des prévisions. Lors de nos premiers travaux en 2010 (Bélanger et al. 2013), les données de réanalyses couramment utilisées en Amérique du Nord étaient les données de la North American Regional Reanalysis (NARR; Mesinger et al. 2006), les mêmes simulations que celles utilisées dans le rapport de Allard et Lemay (2012). Nous avons aussi utilisé les mêmes scénarios climatiques : le scénario A2 (Huard et Chaumont, 2012). Pour ce rapport, nous avons utilisé les données de la réanalyse Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al. 2014) et le scénario Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5; Arora et al., 2011). Même l'identification des scénarios climatiques a changé! En 2017, autant Ouranos que le MFFP nous ont suggéré de passer aux réanalyses CFSR. Aujourd'hui, en juillet 2020, Ouranos utilise les réanalyses ERA5 du European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMRWF; Hersbach et al., 2020).

Nous n'avons identifié aucune étude qui compare systématiquement les réanalyses NARR et CFSR pour tous les paramètres météorologiques que nous utilisons dans nos simulations, et encore moins pour le territoire du Nunavik. Le MFFP, ArcticNet et Ouranos ont financé des études sur les changements climatiques appréhendés au Nunavik comme celles de Allard et Lemay (2012) et celle de Mailhot et Chaumont (2017). Deux études comparent entre elles les réanalyses CFSR, NARR, ERA et MERRA (Rienecker et al., 2011) : celle de Charron (2015) qui compare les résultats de ces simulations pour quelques indicateurs avec des données météorologiques *in situ* du Nunavik, et celle de Rapaić et al. (2015) qui compare les températures et les précipitations au-dessus de l'Arctique canadien entre 1950 et 2010. Chacune des réanalyses possède ses avantages et ses inconvénients, mais ces derniers affirment que les réanalyses NARR semblent présenter un biais « chaud et humide » après 2003. La réanalyse MERRA, l'autre réanalyse citée dans la littérature, utilisent le modèle atmosphérique GEOS-5 basé sur l'utilisation de la méthode des volumes finis (Lin 2004).

Une comparaison systématique de toutes les variables météorologiques calculés par les réanalyses NARR et CFSR pour le Nunavik serait nécessaire. Malheureusement, une

telle comparaison n'est pas dans le mandat de notre étude car elle prendrait beaucoup trop de temps. Dans la prochaine section, nous allons brièvement comparer les résultats de certaines simulations basées sur les réanalyses NARR avec les mêmes simulations basées sur les réanalyses CFSR afin d'illustrer sommairement les différences entre ces deux réanalyses. Cette comparaison n'est pas exhaustive, mais elle permet de comprendre les différences observées avec nos simulations effectuées dans nos rapports précédents (avant 2016). En cas de différences « extrêmes », il faut considérer que les données de la réanalyse CFSR sont plus réalistes que les données de la réanalyse NARR.

4.1 Climatologie météorologique : NARR versus CFSR

Mailhot et Chaumont (2017) ont choisi d'utiliser Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling (GMFD; Sheffield et al., 2006) surtout pour son volet hydrologique et parce qu'il reproduit mieux les moyennes climatiques calculées aux stations du Nunavik. Malheureusement, la couverture nuageuse n'est pas incluse dans les variables disponibles. De plus, nous désirons utiliser les mêmes périodes climatiques de 30 ans que dans nos rapports précédents : 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Les données de la réanalyse North American Regional Reanalysis (NARR; Mesinger et al. 2006) ont été utilisées lors des précédents travaux de modélisation des lacs (Bélanger et al. 2013; Bélanger et al. 2017a et 2017b). Pour le présent travail, nous avons eu recours aux données de la réanalyse Climate Forecast System Reanalysis (CFSR). Ce choix, suggéré par Ouranos, avait été convenu avec nos collègues du MFFP dès la planification du travail à faire. Ceci entraînait évidemment une certaine quantité de travail supplémentaire. NARR est une réanalyse régionale pour l'Amérique du nord contenant les températures, les vents, l'humidité et autres variables à une résolution horizontale de 32 km (Mesinger et al. 2006). Les données NARR vont de janvier 1979 jusqu'au présent ou presque. La base de données est régulièrement mise à jour. CFSR est une réanalyse globale de l'état de l'atmosphère sur la période de janvier 1979 à mars 2011 avec une résolution horizontale de 0,5 ° (Saha et al. 2014).

Les données de réanalyse journalières sont utilisées pour les sept variables météorologiques fournies au modèle MyLake à tous les pas de temps (la température de l'air, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, les précipitations, la radiation globale et la couverture nuageuse). Pour la production de cartes, le lac modélisé est placé au centre de pixels de 0,5 ° × 0,5 ° et il arrive souvent que plus d'un point de grille de la réanalyse soient inclus dans un pixel. On considère alors la moyenne des valeurs de tous les points inclus dans le pixel, soit une valeur plus représentative de l'ensemble du pixel que la seule valeur au point de grille le plus près du centre du pixel.

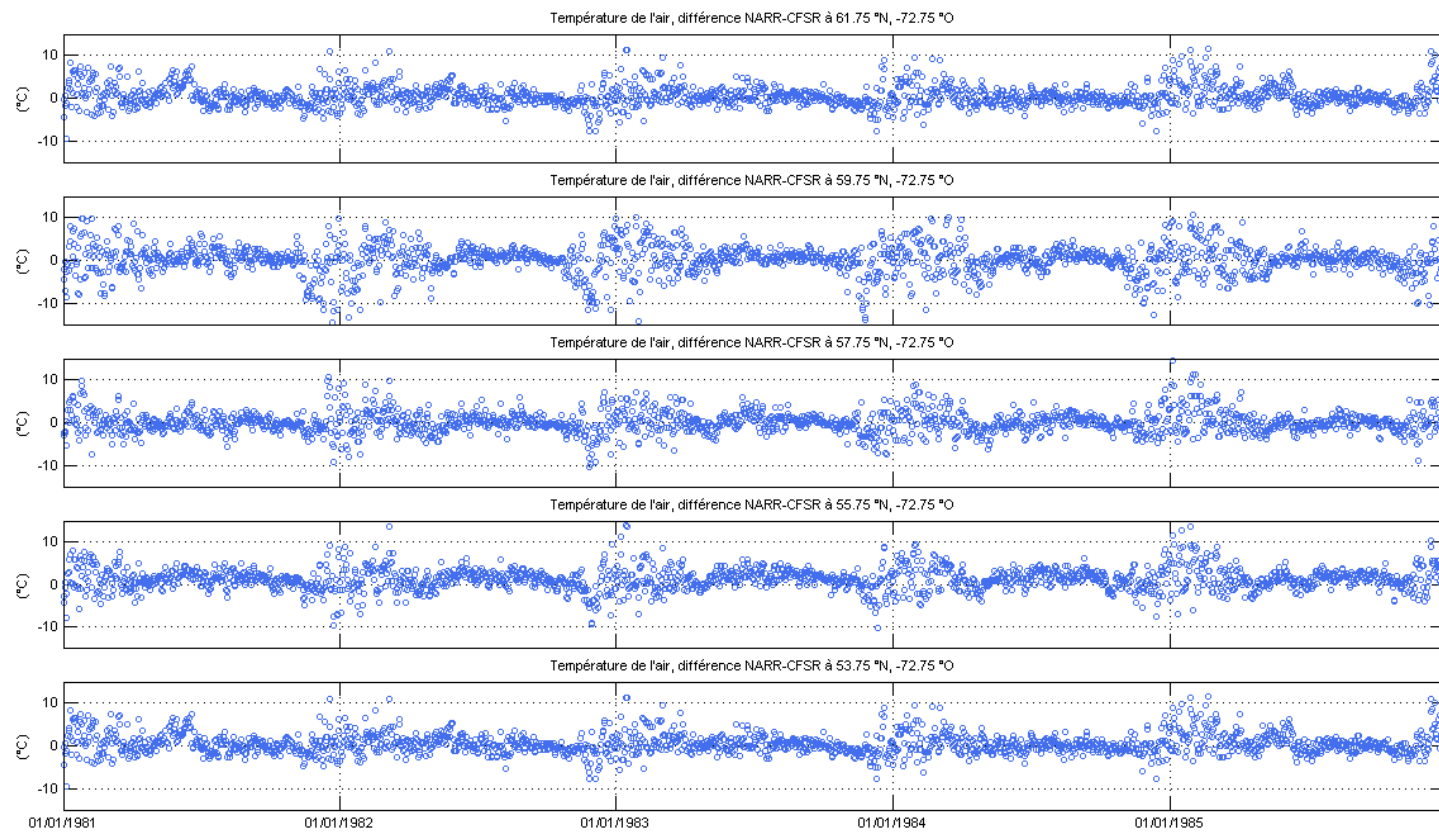


Figure 13. Évolution de la différence entre températures de l'air (°C) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) sur une période de cinq ans (1981-1985) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Les valeurs considérées pour la soustraction sont celles des pixels à ces latitudes, i.e. une moyenne de tous les points de grille inclus dans le pixel lorsqu'il y en a plus d'un.

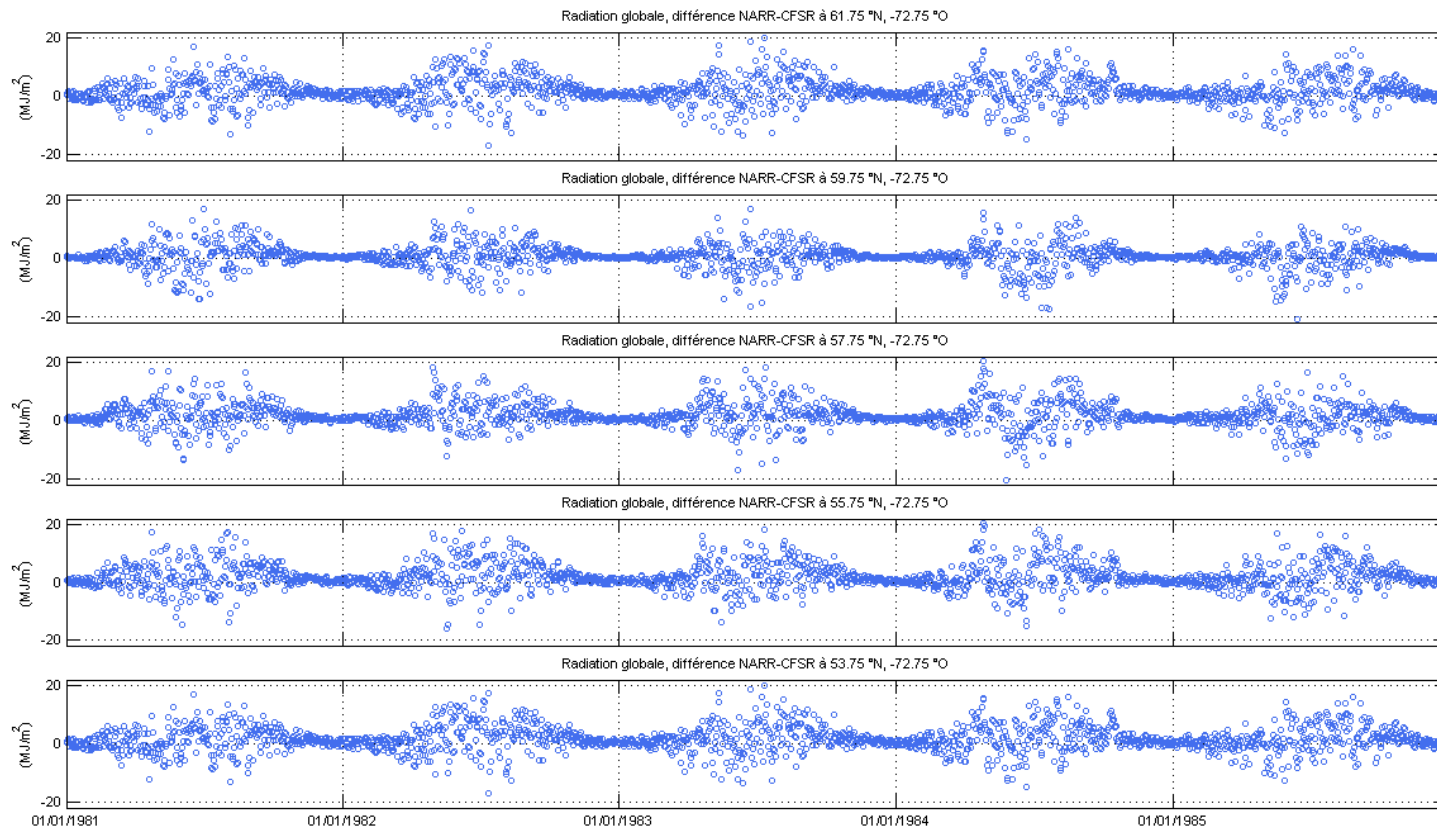


Figure 14. Évolution de la différence entre radiations globales (MJ/m^2) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) sur une période de cinq ans (1981-1985) à cinq latitudes le long du méridien $072,75^\circ\text{O}$. Les valeurs considérées pour la soustraction sont celles des pixels à ces latitudes, i.e. une moyenne de tous les points de grille inclus dans le pixel lorsqu'il y en a plus d'un.

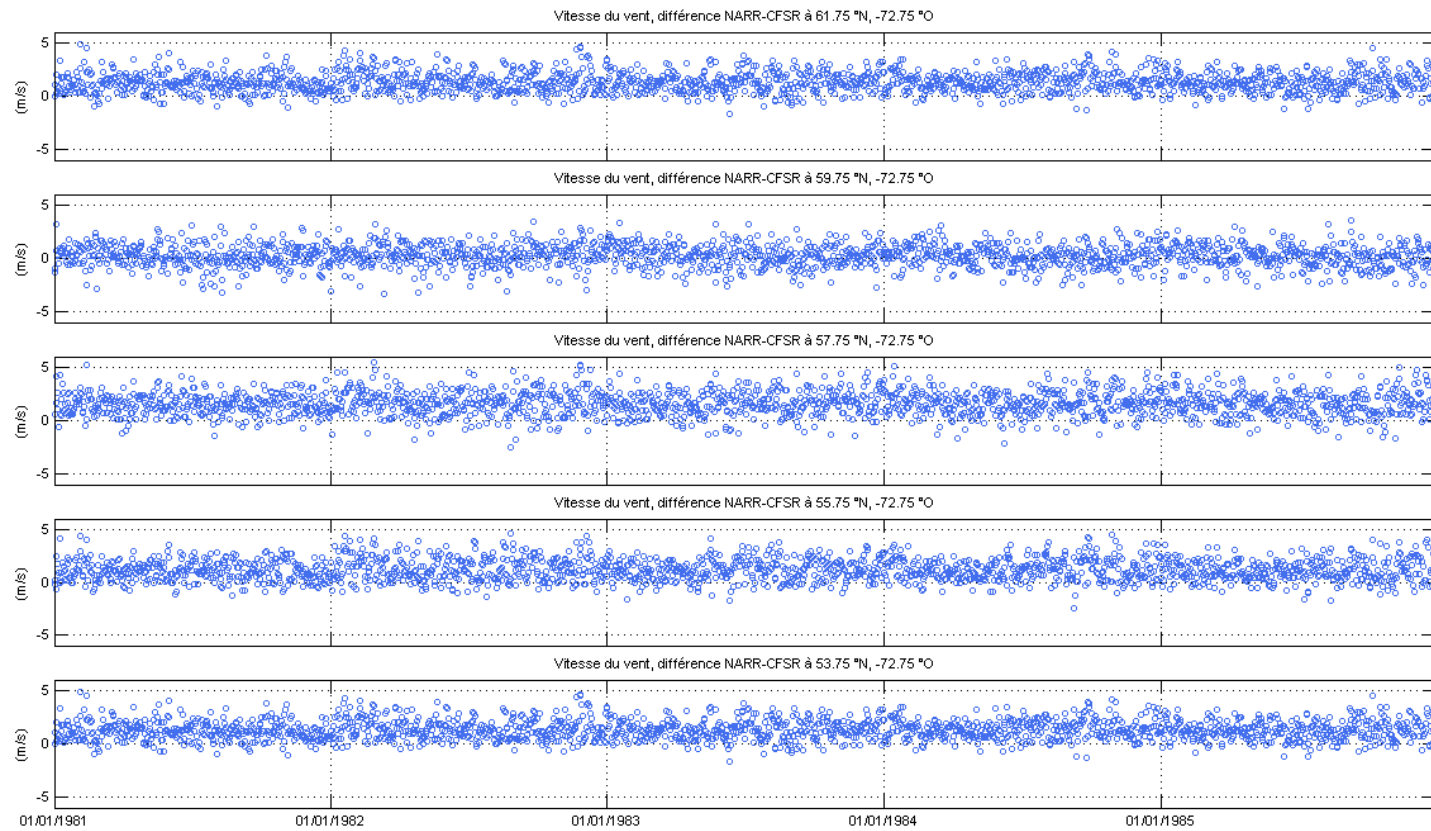


Figure 15. Évolution de la différence entre vitesses du vent (m/s) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) sur une période de cinq ans (1981-1985) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Les valeurs considérées pour la soustraction sont celles des pixels à ces latitudes, i.e. une moyenne de tous les points de grille inclus dans le pixel lorsqu'il y en a plus d'un.

Il est difficile de comparer les performances des réanalyses NARR et CFSR de manière sommaire. Les contraintes observationnelles, et par conséquent la fiabilité des réanalyses, peuvent varier considérablement dépendamment de la variable considérée, du lieu et de la période. Une des deux réanalyses peut donc performer mieux pour une variable donnée dans une sous-région donnée et moins bien pour une autre variable ou pour une autre sous-région.

- 1) Les différences peuvent être petites pour une variable donnée et plus importantes pour une autre (et chacune des sept variables passées au modèle a un impact plus ou moins important sur les températures simulées).
- 2) Les différences peuvent être plus marquées, ou même de sens opposé, sur une partie du territoire que sur une autre. On peut donc penser que les résultats d'une seule comparaison avec des séries temporelles observées pourraient difficilement être généralisés à l'ensemble du territoire.
- 3) Les différences peuvent être plus importantes à un temps de l'année qu'à un autre. Ceci peut entraîner des résultats différents dépendamment de la variable considérée et de la date d'occurrence des grandes différences sur le cycle annuel (par exemple des températures de l'air quasi similaires en été mais un hiver plus chaud qui entraîne un couvert de glace moins épais, qui entraîne une disparition du couvert de glace plus hâtive, qui entraîne un début de réchauffement plus hâtif, etc.).

Malgré les réserves mentionnées ci-dessus quant à la généralisation des comparaisons entre réanalyses et observations, celles-ci nous apparaissent quand même souhaitables, surtout pour les variables ayant le plus d'impact sur la thermie des lacs. Pour être utiles, elles devraient être assez nombreuses et s'intéresser si possible à divers types de sous-régions (zone côtière, zone de montagnes, etc.). Les Figures 10, 11 et 12 présentent l'évolution de la différence NARR-CFSR à cinq latitudes (pixels) le long du méridien - 072.75 °O sur une période de cinq ans arbitrairement choisie (du 1^{er} janvier 1981 au 31 décembre 1985) pour la température de l'air, la radiation globale et la vitesse du vent. Pour la température (Figure 10), les différences tendent à être plus prononcées en hiver qu'en été et les différences en été tendent à être plus souvent positives (NARR > CFSR). Pour la radiation globale (Figure 11), c'est au contraire en été que les différences sont plus marquées. Ceci découle probablement du fait que les valeurs de radiation sont beaucoup plus petites en hiver qu'en été. Pour la vitesse du vent (Figure 12), on ne remarque aucun patron de variations saisonnières. Bien qu'assez petites, les différences sont plus souvent positives que négatives (NARR > CFSR). Un peu étrangement, le biais positif de NARR sur CFSR est pratiquement absent à la latitude 59,75 °N. On peut voir ceci comme une illustration indirecte de la variabilité spatiale de la fiabilité des réanalyses.

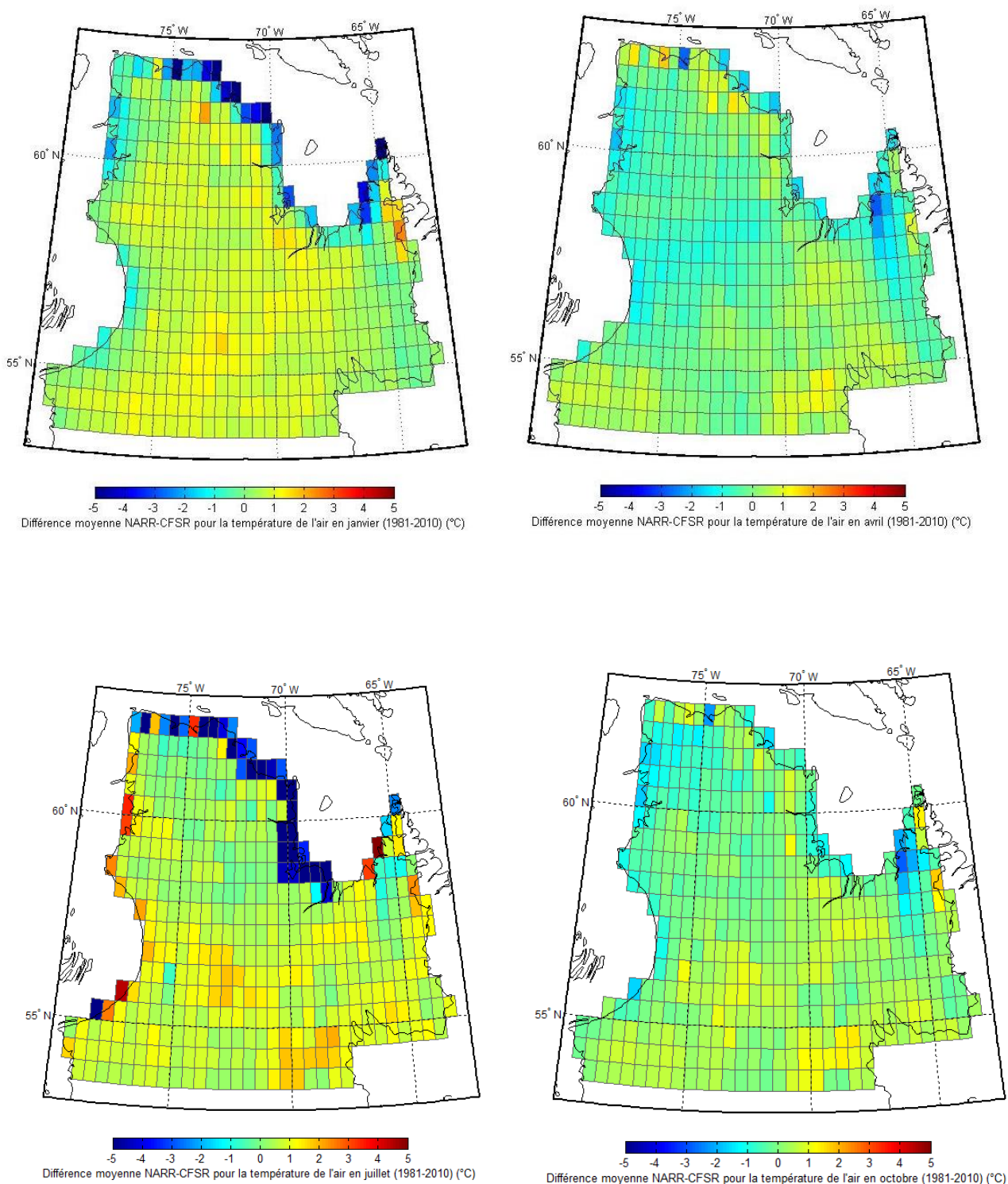
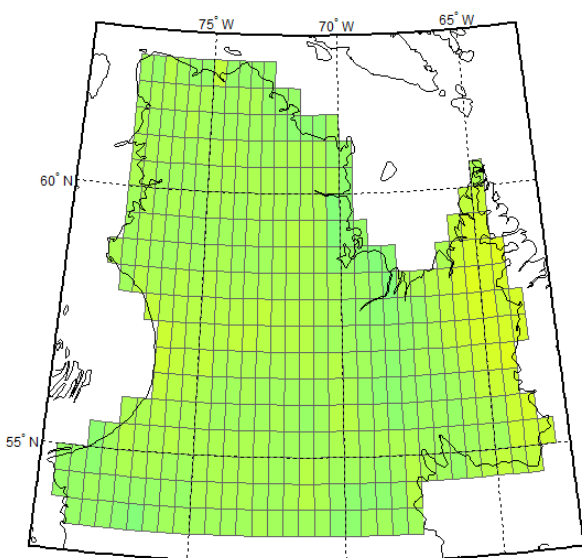
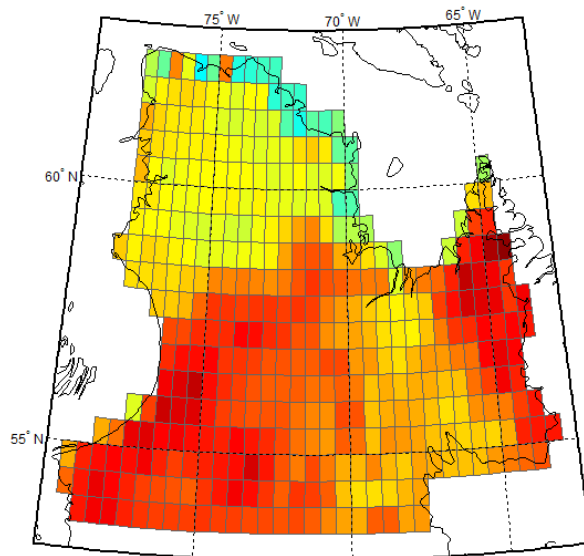


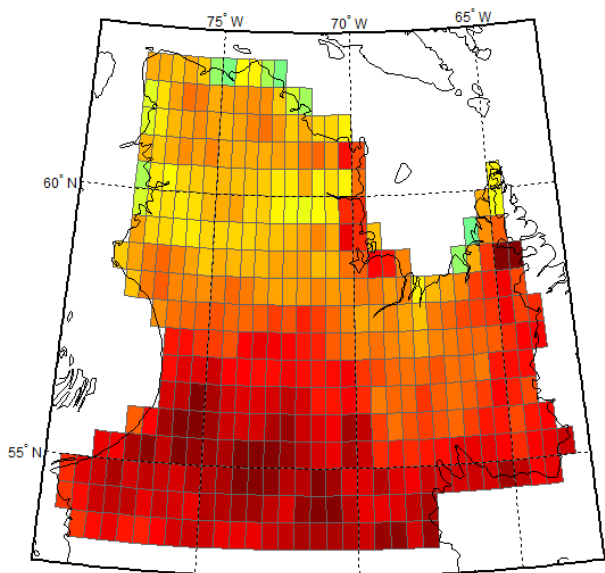
Figure 16. Cartes des différences moyennes mensuelles sur la période 1981-2010 entre les températures de l'air (°C) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) : différences moyennes en janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite).



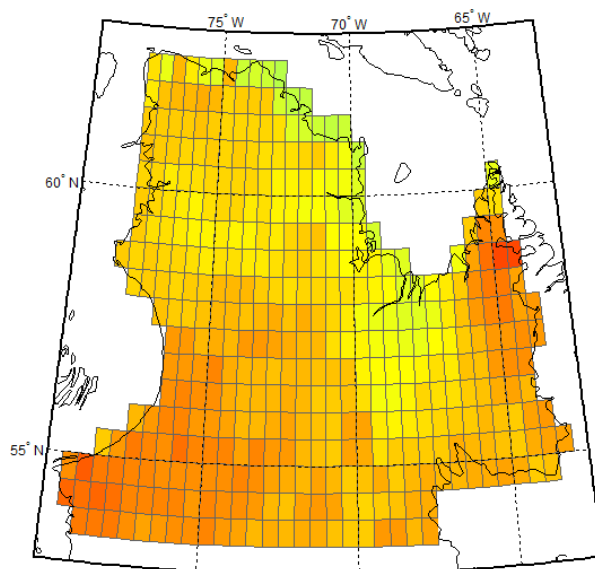
-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5
 Différence moyenne NARR-CFSR pour la radiation globale en janvier (1981-2010) (MJ/m²)



-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5
 Différence moyenne NARR-CFSR pour la radiation globale en avril (1981-2010) (MJ/m²)



-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5
 Différence moyenne NARR-CFSR pour la radiation globale en juillet (1981-2010) (MJ/m²)



-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5
 Différence moyenne NARR-CFSR pour la radiation globale en octobre (1981-2010) (MJ/m²)

Figure 17. Cartes des différences moyennes mensuelles sur la période 1981-2010 entre les radiations globales (MJ m⁻²) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) : différences moyennes en janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite).

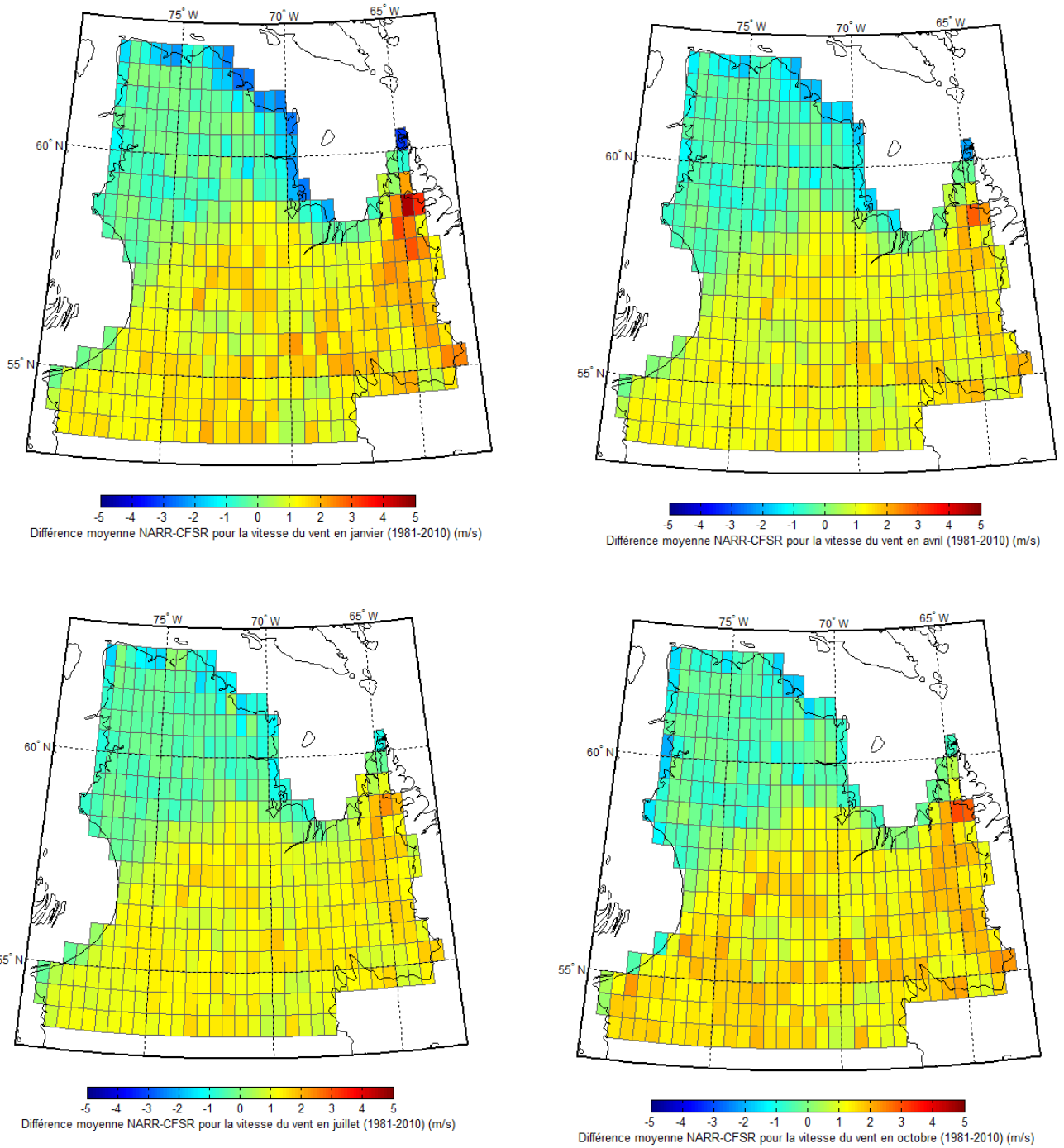


Figure 18. Cartes des différences moyennes mensuelles sur la période 1981-2010 entre les vitesses de vent (m s^{-1}) des réanalyses NARR et CFSR (NARR-CFSR) : différences moyennes en janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite).

Les Figures 13, 14 et 15 présentent des cartes de différences moyennes NARR-CFSR pour certains mois de l'année pour la période 1981-2010. Pour la température de l'air (Figure 13), les différences moyennes apparaissent généralement petites, plutôt positives pour certains mois (janvier et juillet) et plutôt négatives pour d'autres (avril et octobre). Les moyennes de températures NARR et CFSR sont particulièrement différentes en zone côtière en hiver et en été, les moyennes NARR étant alors nettement plus basses, avec comme exception la côte de la Baie d'Hudson en été. Pour la radiation globale (Figure 14), les différences moyennes semblent varier avec l'intensité radiative, les différences étant pratiquement nulles en janvier et maximums en juillet. À part pour quelques pixels côtiers en avril, les radiations moyennes NARR sont généralement supérieures aux radiations moyennes CFSR. Pour la vitesse du vent (Figure 15), les différences moyennes varient relativement peu avec les saisons. Les différences moyennes au nord du territoire apparaissent toujours différentes des valeurs plus au sud, corroborant ce que laissait entrevoir la Figure 12. Les différences sont positives au sud ($NARR > CFSR$) et légèrement plus prononcées en automne et en hiver. Les différences sont souvent légèrement négatives au nord ($NARR < CFSR$), et davantage en zone côtière en hiver. Les réanalyses CFSR de température de l'air et de radiation globale en été sont moins élevées que les réanalyses NARR. Ces différences devraient en principe conduire à des lacs simulés un peu moins chauds. De même, les données CFSR de vitesse de vent moins élevées en été pour le sud du territoire pourraient aussi contribuer à cette différence : des vitesses de vent relativement petites en été défavorisent le mélange, entraînant une température de surface un peu plus élevée et une légère diminution du transfert de chaleur de l'atmosphère vers le lac (Chapitre 7).

4.2 Climatologie limnologique (lacs)

Les cycles annuels climatologiques de température et d'épaisseur de glace sont dérivés en utilisant comme intrant de longues séries de variables météorologiques (valeurs journalières de réanalyse; section précédente) pour forcer le modèle en calculant les moyennes de 30 années consécutives pour chaque jour de l'année, i.e. 30 valeurs pour le 1^{er} janvier, 30 valeurs pour le 2 janvier, etc. On utilise les données de réanalyse CFSR pour produire les longues séries de données météorologiques journalières utilisées pour forcer le modèle. Le modèle MyLake a été utilisé pour dériver les cycles annuels climatologiques de température de l'eau et d'épaisseur de glace pour la période 1981-2010 pour quatre lacs-types les plus fréquents (Chapitre 6). Afin de produire des résultats sous forme de cartes, chacun des lacs types a été placé aux 410 pixels retenus de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en latitude et longitude couvrant l'ensemble du Nunavik. Pour chacune des variables météorologiques requises, on a utilisé la moyenne des données de réanalyse disponibles sur chacun des pixels considérés. Sur l'ensemble du Québec, on compte soient un, deux ou quatre valeurs par pixel (jamais trois), correspondant à 16,7 %, 48,3 % et 35,0 % des cas. Pour la simulation à chacun des pixels, nous avons utilisé une stratégie à une seule passe, c'est-à-dire 1) que les conditions initiales prescrites sont approximatives (au 1^{er} janvier, 0°C immédiatement sous la glace et 4°C pour le reste de la colonne d'eau, et 0,1 m de glace et de neige) et sont les mêmes à tous les pixels, 2) que la période simulée s'étend sur 32 ans et 3) qu'on ignore les deux premières années simulées dans le calcul des cycles annuels

climatologiques, considérées comme la période d'ajustement du modèle (« spin-up », en anglais). Cette façon de faire est moins exigeante en temps de travail et de calcul qu'une stratégie à deux passes où les conditions initiales de la deuxième passe à chaque pixel sont dérivées à l'aide des valeurs au 1^{er} janvier obtenues de la première passe.

4.3 Climatologie future : les deltas

Les températures climatologiques pour la période de référence (1981-2010) sont dérivées en utilisant des données météorologiques de réanalyse (Mesinger et al. 2006; Saha et al. 2014) pour forcer le modèle. Les températures climatologiques futures sont dérivées en utilisant des séries temporelles obtenues par la méthode des deltas (Huard et al. 2014; Logan 2016; Bélanger et al. 2017). Pour les résultats présentés ici, nous avons utilisé des deltas mensuels calculés à partir d'une seule simulation du Modèle régional canadien du climat (MRCC5) réalisée à Ouranos (Logan 2016). Cette simulation (MRCC5_NAM-22_CCCma_CanESM2-run1) est pilotée par le modèle global CanESM2 et utilise le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP 8.5 (IPCC 2014). Le scénario RCP 8.5 implique une augmentation continue et marquée de la concentration en CO₂ atmosphérique au cours du 21^{ème} siècle. Il est le plus pessimiste des quatre scénarios RCP. L'utilisation d'un scénario pessimiste permet d'identifier plus clairement quels aspects des modifications à venir seront potentiellement les plus préjudiciables aux salmonidés.

Les deltas sont des différences projetées, pour une variable météorologique donnée et pour une période de l'année donnée, entre une période de référence et une période future (voir Huard et al. 2014). La période de référence utilisée est 1981-2010. Les périodes futures considérées sont 2041-2070 et 2071-2100. Nous utilisons des deltas mensuels (écart moyen pour chaque mois de l'année). Les deltas ont été estimés pour six des sept variables météorologiques fournies au modèle : on fait l'hypothèse que l'humidité relative restera inchangée dans le futur. Les deltas mensuels à un pixel donné sont calculés à l'aide des valeurs au point de grille du modèle climatique le plus près du centre du pixel. Les deltas sont soit additifs (radiation solaire, couverture nuageuse, température de l'air, pression atmosphérique), soit multiplicatifs (vitesse du vent et précipitations). Les séries climatiques futures sont ensuite obtenues en ajoutant (ou en multipliant) les deltas aux données météorologiques de références (CFSR) à chacun des points de la grille. Des exemples de deltas pour la température de l'air, la radiation globale et la vitesse du vent sont présentés à la Figure 19.¹

¹ Si on souhaitait utiliser une autre simulation climatique pour dériver les deltas (un autre modèle régional et/ou un autre scénario de concentration de gaz à effet de serre), cela nécessiterait du travail supplémentaire. Les deltas mensuels pour la simulation Ouranos_MRCC5_NAM-22_CCCma_CanESM2-run1 ont déjà été préparés et vérifiés, et les quelques valeurs aberrantes repérées ont été corrigées.

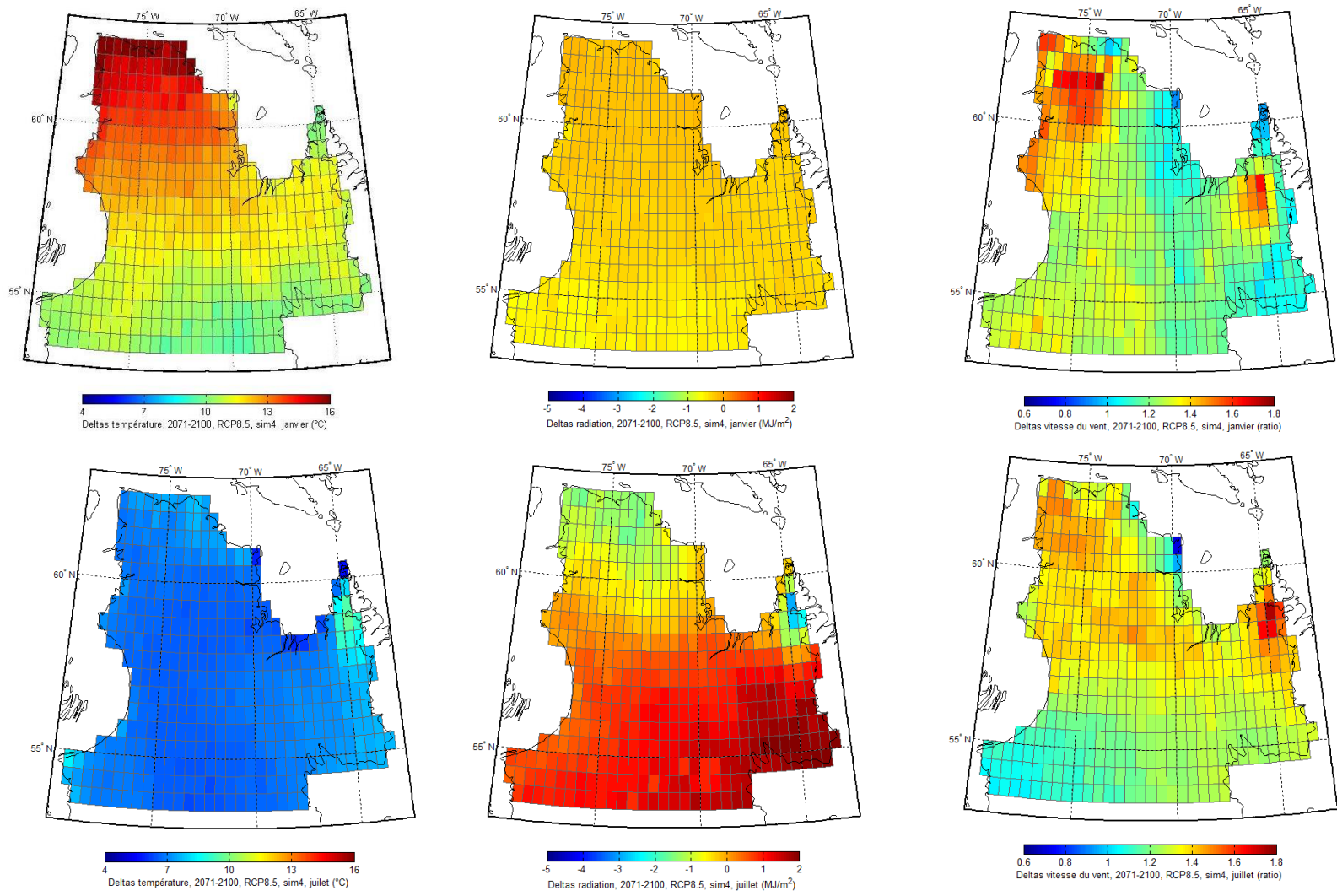


Figure 19. Deltas mensuels pour la température de l'air (°C) (à gauche), la radiation globale (MJ/m²) (au centre), et la vitesse du vent (ratio) (à droite) entre la période de référence 1981-2010 et l'horizon 2071-2100 pour la simulation climatique MRCC5_NAM-22_CCCma_CanESM2-run1 (RCP 8,5). Les deltas présentés sont pour les mois de janvier (ligne du haut) et de juillet (ligne du bas).

5. Modélisation de lacs réels

La calibration du modèle MyLake consiste à ajuster divers paramètres de manière à ce qu'il n'y ait pas de biais systématique et que l'écart entre les températures simulées et observées sur toute la colonne d'eau soient aussi petit que possible. Ces paramètres incluent par exemple la diffusivité sous et sur couvert de glace et un coefficient modulant l'énergie disponible pour le mélange d'origine éolienne. Les paramètres ajustables sont présentés et expliqués dans les manuels techniques des versions v1.1 (Saloranta et Andersen 2004) et v1.2 (Saloranta et Andersen 2005). Le volume du lac est assumé constant (le débit sortant est toujours égal au débit entrant). La colonne d'eau est divisée en un certain nombre de couches. Les températures initiales sont spécifiées au milieu de chacune des couches et les températures simulées sont assumées être au milieu de chacune des couches.

5.1 Ensemble des lacs déjà modélisés

La modélisation des lacs-types est effectuée à partir de lacs réels dont nous avons déjà simulé la thermie et pour lesquels nous avons validé les divers paramètres du modèle. Nous avons récemment simulé la thermie du Lac-du-camp (section suivante; Figure 17), sur l'île Bylot. Ce lac a été sélectionné parce qu'il est celui qui ressemble le plus aux lacs de la classe 1. De plus, c'est le lac le plus au nord de tous nos échantillons et sa superficie et sa profondeur moyennes sont de 21 ha (0.20912 km²) et 5 m, respectivement. Le comportement des lacs très au nord semble un peu différent des lacs plus au sud. Ce lac semble être notre meilleur choix pour représenter les lacs-types de la classe 1, même si sa profondeur est égale à la profondeur maximale pour cette classe. Le Tableau 2 présente l'ensemble des lacs maintenant disponibles pour modéliser les lacs-types. La modélisation des lacs albertains mentionnés dans le Tableau 2 est décrite dans Gratton et Bélanger (2018).

5.2 Le Lac-du-Camp (île Bylot) : modélisation et calibration

Le Lac-du-camp est un lac situé sur l'île Bylot (73,154 °N, 079,969 °O) au cœur d'une région faisant l'objet d'études écologiques et environnementales menées par le Centre d'études nordiques (CEN). On y trouve à proximité une station météorologique, soit la station BYLCAMP (pour Bylot Lac-du-camp). Le Lac-du-camp (BLC) a une superficie en surface de 21,0 ha, une profondeur maximum de 11,9 m et une profondeur moyenne de 3,8 m. Le modèle MyLake de BLC a été construit à l'aide de données bathymétriques recueillies à l'aide d'un appareil Humminbird 859 XD en parcourant de nombreux transects couvrant toute la surface du lac. Les superficies sont spécifiées en surface et à douze couches de 1 m d'épaisseur. Les débits entrant et sortant sont inconnus

(de même que leur température) et ils ont été prescrits comme étant nuls (i.e., on suppose négligeable l'influence de ces échanges sur les variations de contenu en chaleur).

Pour BLC, nous avons utilisé des séries de températures observées de quatre ans et forcé le modèle avec des données météorologiques aux stations les plus proches, excepté pour la radiation globale et le couvert nuageux pour lesquelles des données de réanalyse NARR au point le plus près (à 14,4 km de BLC) furent utilisées. Les températures observées ont été échantillonnées au moyen de thermistors VEMCO placés le long d'un mouillage au point le plus profond du lac.

La période simulée s'étend du 25 juillet 2012 au 11 juillet 2016. Les conditions initiales sur toute la colonne d'eau ont été dérivées des températures à cinq profondeurs au premier jour de la simulation. Pour le forçage météorologique, nous avons utilisé les données de deux stations : la station BYLCAMP du réseau SILA (qui signifie climat en Inuktitut; cen.nordicana.ca) du CEN et la station Pond Inlet (Environnement Canada). Les distances entre le centre de BLC et les stations BYLCAMP et Pond Inlet sont respectivement de 0,4 km et 83,5 km.

Les données de BYLCAMP ont été utilisées pour la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent, ces données étant directement disponibles sous forme journalière. Les trous dans les données ont été comblés à l'aide de données de la station Pond Inlet (données journalières calculées à partir de données horaires). Pour la température et la vitesse du vent, les jours sans donnée représentent 7,8 % de la période allant du 25 juillet 2012 au 30 septembre 2016. Pour l'humidité relative, les jours sans donnée représentent 24,8 % de la même période. Une grande partie des données manquantes proviennent de la période allant du 16 janvier au 12 mai 2014 (117 jours), soit pendant que le lac était couvert de glace. Pour une partie de cette période sans donnée (35 jours), les données de vitesse du vent à Pond Inlet étaient aussi manquantes et nous avons eu recours aux données NARR pour cette courte période.

Les données de Pond Inlet ont été utilisées pour la pression atmosphérique et les précipitations. Les données journalières de pression ont été calculées à partir de données horaires et les données de précipitations étaient directement disponibles sous forme journalière. Les trous dans les données de pression atmosphérique et de précipitations (respectivement 3,8 % et 6,6 % de la période allant du 25 juillet 2012 au 30 septembre 2016) ont été comblés à l'aide des données NARR au point de grille le plus près. Une grande partie des données manquantes proviennent d'une longue période allant du 15 octobre au 12 décembre 2014 (59 jours). Les données de précipitations sont manquantes également du 11 au 28 avril 2016 (18 jours).

La Figure 18 présente une comparaison des séries de température de l'eau simulées et observées à cinq profondeurs pour le lac BLC.

Tableau 2. Lacs réels simulés au cours des dernières années et disponibles pour la modélisation des lacs-types.

Lacs réels	Région	Latitude Nord (°)	Longitude Ouest (°)	Surface (km ²)	Surface (ha)	Volume (m ³)	Zmax (m)	Zmoy (m)
Stewart	Nunavik	58.1854	068.4309	8.520	852.0	4.25E+07	15	4.99
Chibougamau	Québec	49.8262	074.2781	213.057	21305.7	1.90E+09	59	8.93
Simoncouche	Québec	48.2330	071.2510	0.833	83.3	1.80E+06	9	2.16
Jacques-Cartier	Québec	47.5836	071.2200	12.566	1256.6	2.81E+08	68	22.34
Bédard	Québec	47.2720	071.1230	0.056	5.6	1.94E+05	10.5	3.46
Char	Nunavut	74.7067	094.8970	0.533	53.3	5.35E+06	27.5	10.04
Lac-du-Camp (Île Bylot)	Nunavut	73.1544	079.9693	0.210	21.0	7.97E+05	11.9	3.80
Baptiste North	Alberta	54.774	113.553	4.290	429.0	2.77E+07	16	6.45
Baptiste South	Alberta	54.737	113.550	4.853	485.3	6.22E+07	27	12.82
Ethel	Alberta	54.533	110.350	5.353	535.3	3.76E+07	30	7.03
Nakamun	Alberta	53.884	114.210	2.763	276.3	1.10E+07	9	3.97

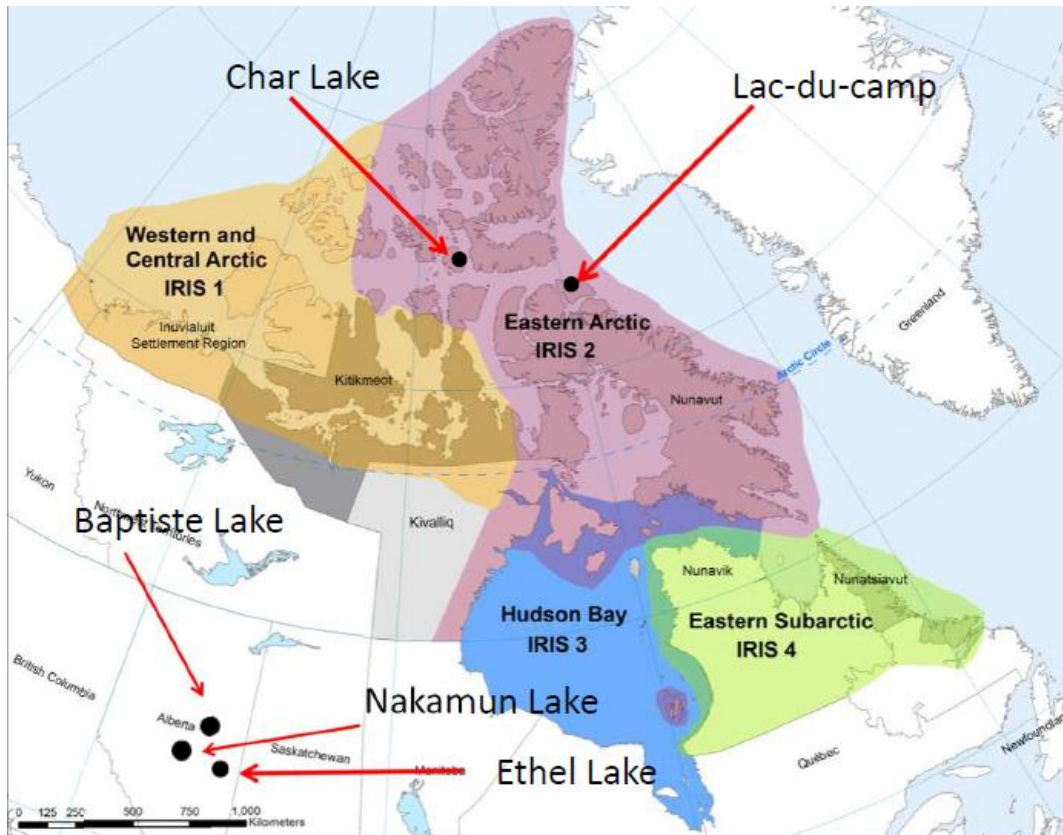


Figure 20. Lacs hors-Québec mentionnés dans le Tableau 2. Le fond de la carte est tiré du site d'ArcticNet. Les positions sont approximatives.

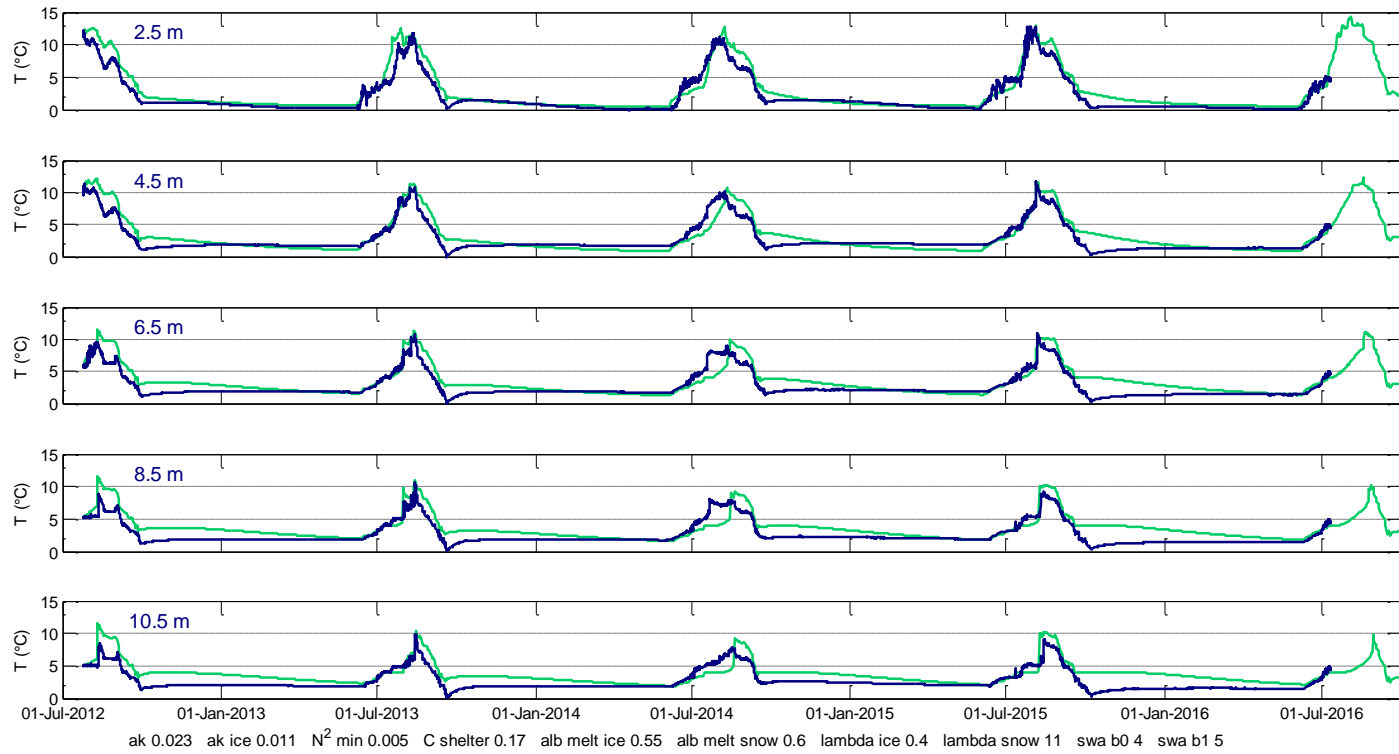


Figure 21. Comparaison entre les températures simulées (en vert) et observées (en bleu) pour le Lac-du-camp à cinq profondeurs pour la simulation retenue.

6. Modélisation des lacs-types

Des explications quant à la dérivation des bathymétries des lacs types et le processus de modélisation sont présentées à l'Annexe I. Nous allons concentrer nos exemples sur les quatre lac-types les plus fréquents afin de réduire le volume de ce rapport. Cependant les sept classes sont traitées de la même façon et toutes les figures sont disponibles sous forme numérique. Les listes des figures livrées sous forme numérique sont données aux Annexes II, III et IV. La calibration du Lac-du-camp sur l'île Bylot (BLC) a été utilisée pour les lacs types LC1, LC2, LC3 et LC5. La calibration du lac Baptiste South (BPTS) a été utilisée pour les lacs types LC6 et LC7. La calibration du lac Ethel (ETL) a été utilisée pour le lac type LC4.

La température a été simulée à chacun des 410 pixels du domaine à l'aide des séries de forçage passées 1979-2010 et futures 2039-2070 et 2069-2100. Nous avons utilisé une stratégie à une seule passe, c'est-à-dire 1) que les conditions initiales prescrites sont approximatives (au 1er janvier, 0°C immédiatement sous la glace et 4 °C pour le reste de la colonne d'eau, et 0,1 m de glace et de neige) et sont les mêmes à tous les pixels, 2) que la période simulée s'étend sur 32 ans, et 3) qu'on ignore les deux premières années simulées dans le calcul des cycles annuels climatologiques. Les deux premières années de simulation ignorées dans le calcul des valeurs climatologiques peuvent être considérées comme une période de spin-up du modèle).

Les cycles annuels climatologiques (au sens de normale climatologique sur une période de trente ans) de température ont été calculés à partir des valeurs journalières simulées pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100. Ils sont obtenus en moyennant les 30 valeurs pour chaque jour de l'année, i.e. les 30 valeurs pour le 1^{er} janvier, les 30 valeurs pour le 2 janvier, etc. Les résultats sont aussi disponibles pour l'épaisseur du couvert de glace mais ne sont pas utilisés.

Le modèle MyLake a été utilisé pour dériver les cycles annuels climatologiques de température de l'eau et d'épaisseur de glace pour la période 1981-2010, chacun des sept lacs-types ayant été placés à 410 pixels de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en latitude et longitude couvrant l'ensemble du Nunavik. Les Figures 19 à 23 présentent l'évolution des températures climatologiques à cinq pixels choisis le long du méridien $072,75^\circ\text{O}$, illustrant les variations nord-sud à cinq profondeurs (1,5 m, 3,5 m, 5,5 m, 7,5 m et 9,5 m; il n'y a pas de résultats à 9,5 m pour LC2). Les différences de température climatologiques entre les lacs types apparaissent essentiellement attribuables aux différences de profondeur moyenne. L'impact de la profondeur moyenne sur les cycles de températures climatologiques et la physique sous-jacente est discuté au Chapitre 7. On remarquera que l'évolution des températures pour le lac-type LC2 est, à toutes les latitudes et à toutes les profondeurs considérées dans les Figures 22 à 26, généralement quasi identique à celle du lac-type LC5. La courbe de LC2 est très souvent entièrement masquée par celle de LC5. Ceci apparaît s'expliquer par le fait que les profondeurs moyennes de LC2 et LC5 sont proches (Tableau 1) et qu'il en résulte des cycles annuels de température très semblables. La grande

différence de superficie en surface (~7.1 fois plus grande pour LC2 que pour LC5) ne semble pas avoir d'impact, sans doute parce que dans MyLake les échanges à la surface sont considérés par unité de surface.

Tableau 3. Lacs réels BLC, BPTS, CHI, ETL, JAC et NKM, ainsi que les sept lacs-types. Les acronymes entre parenthèses dans la colonne 1 indiquent quel lac réel a été utilisé pour les calibrations (intrants du modèle MyLake) du lac-type correspondant lors des simulations.

Lac	Acronyme	Latitude °N	Longitude °O
Lac-du-Camp	BLC	73.1544	079.9693
Baptiste-sud	BPTS	54.737	113.550
Chibougamau	CHI	49.8262	074.2781
Ethel	ETH	54.533	110.350
Jacques-Cartier	JAC	47.5836	071.2200
Nakamun	NKM	53.884	114.210
LC1 (BLC)		–	–
LC2 (BLC)		–	–
LC3 (BLC)		–	–
LC4 (ETH)		–	–
LC5 (BLC)		–	–
LC6 (BPTS)		–	–
LC7 (BPTS)		–	–

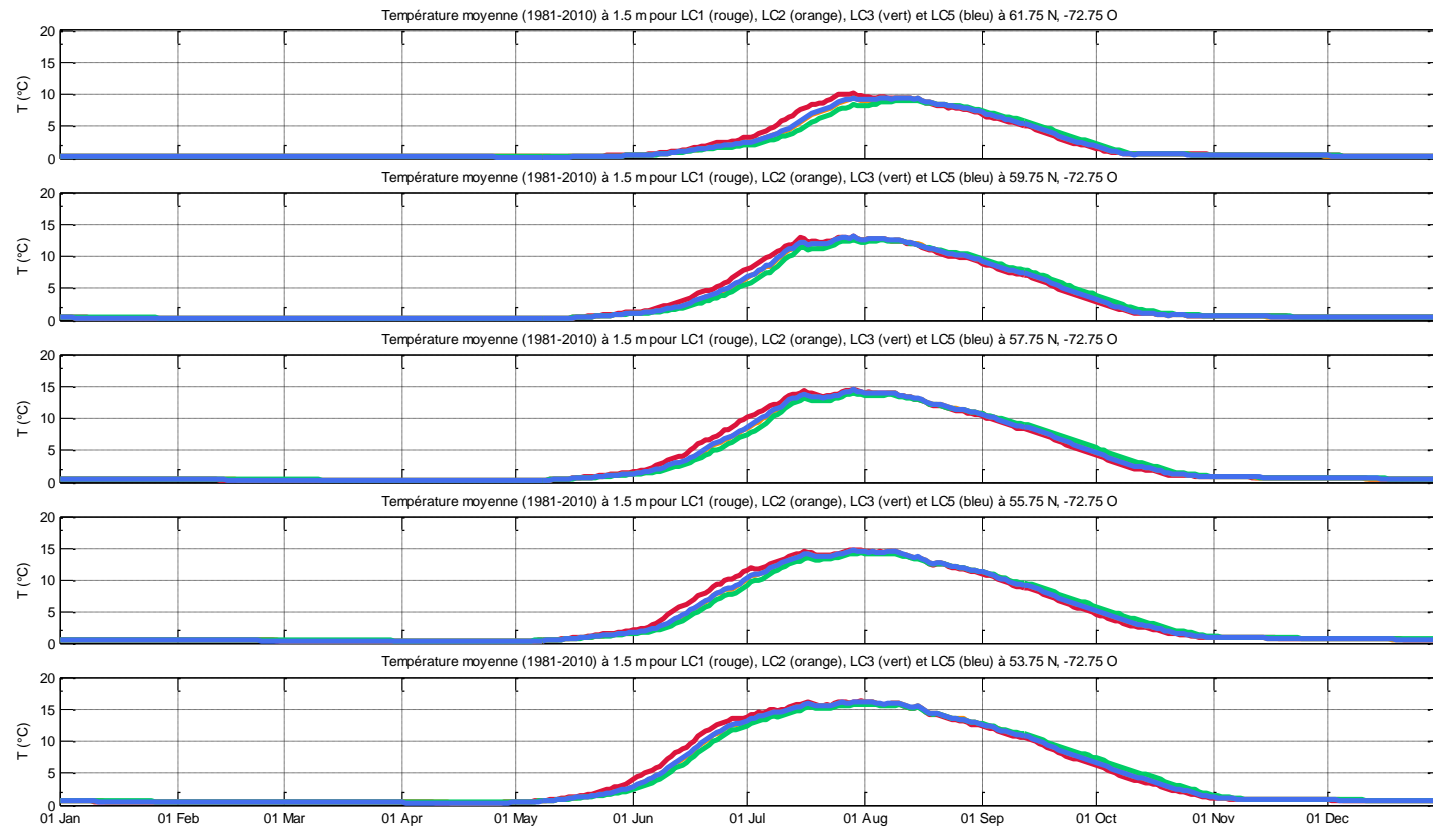


Figure 22. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et LC5 (bleu) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O : températures à 1,5 m (°C).

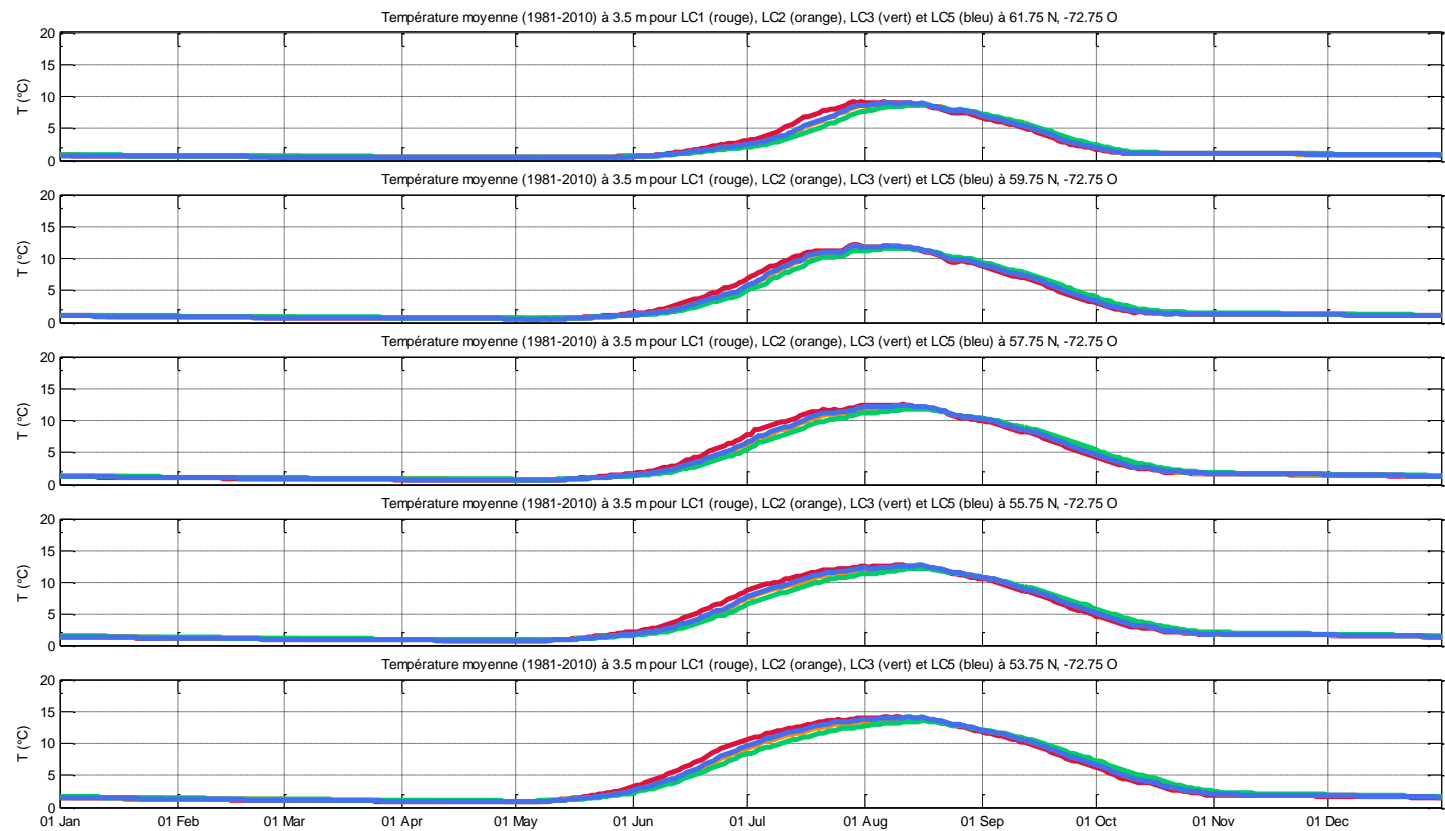


Figure 23. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et LC5 (bleu) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O : températures à 3,5 m (°C).

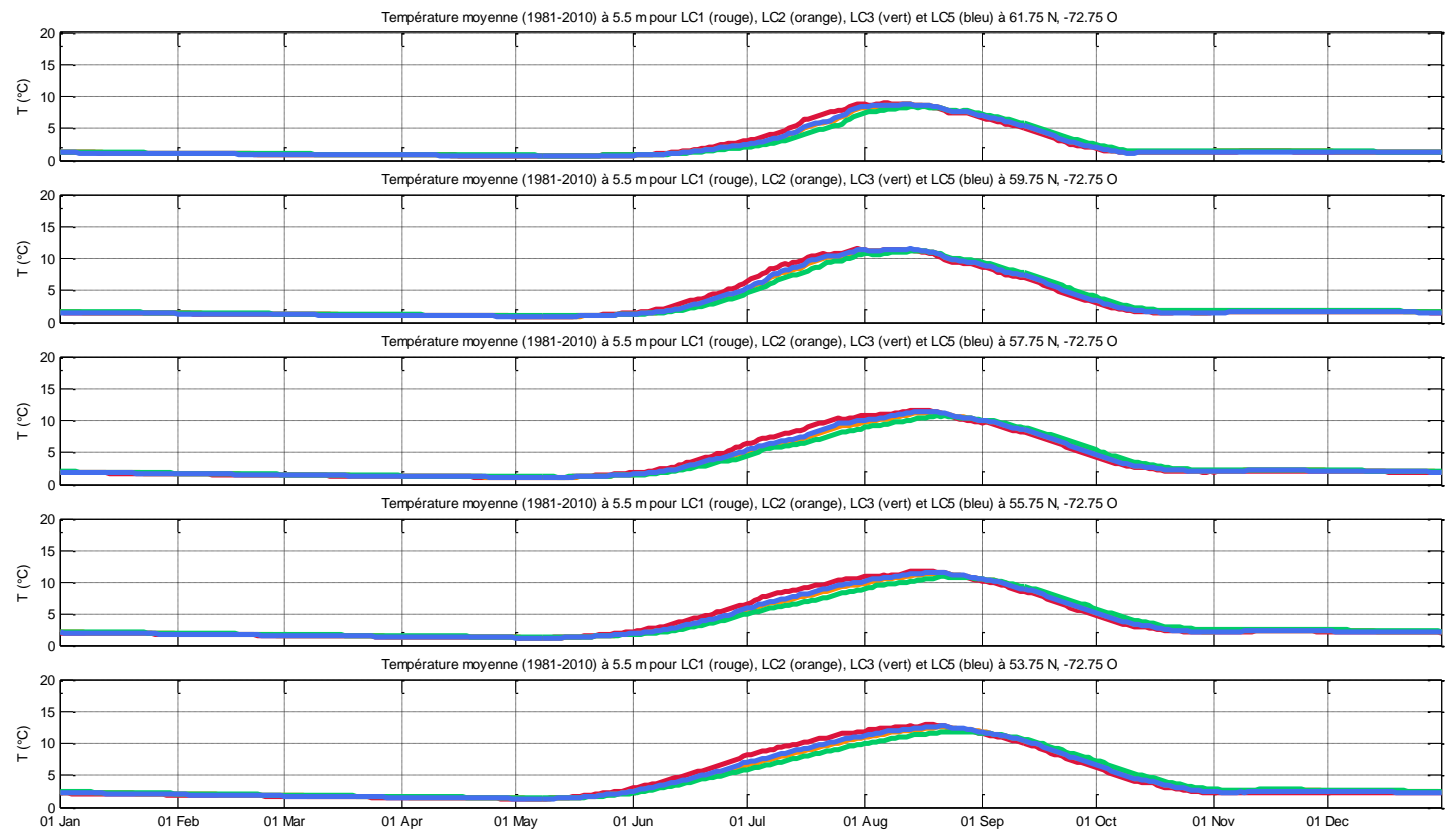


Figure 24. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et LC5 (bleu) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O : températures à 5,5 m (°C).

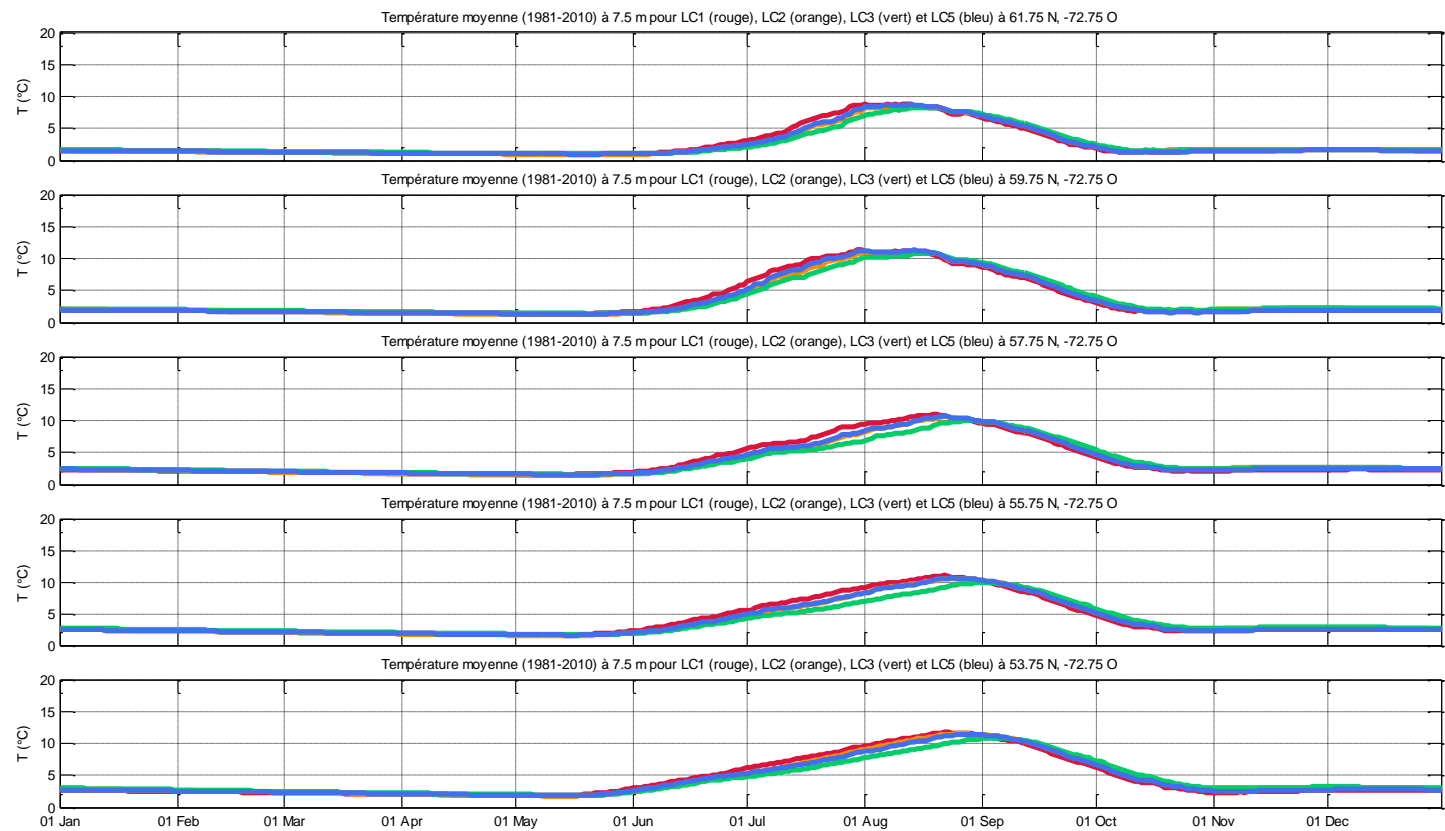


Figure 25. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC2 (orange), LC3 (vert) et LC5 (bleu) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O : températures à 7,5 m (°C).

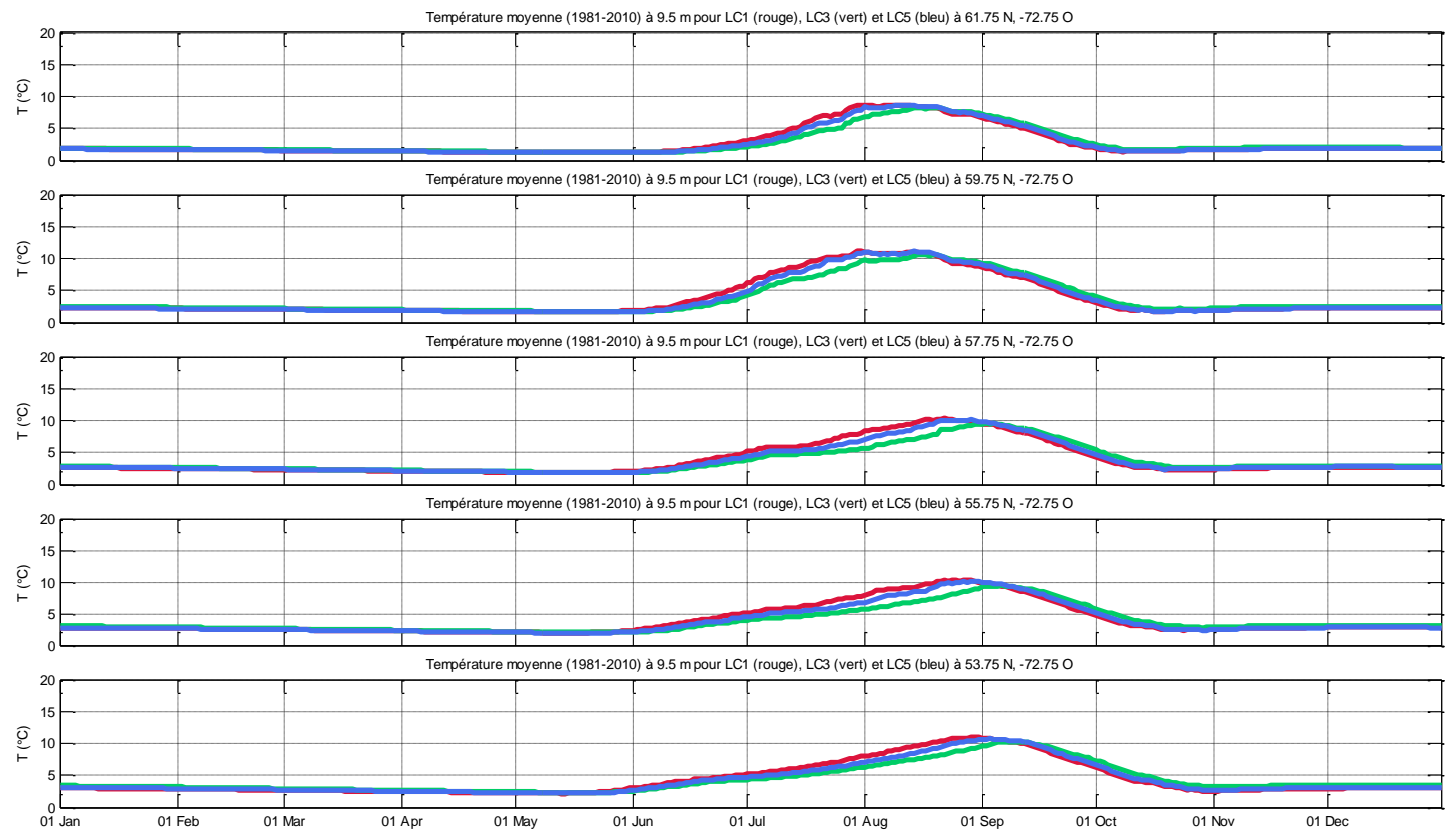


Figure 26. Cycles annuels de température climatologique 1981-2010 des lacs types LC1 (rouge), LC3 (vert) et LC5 (bleu) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O : températures à 9,5 m (°C).

7. Impact de la profondeur moyenne

Rappelons d'abord quelques-uns des résultats présentés dans un rapport intitulé « Influence de la profondeur moyenne d'un lac sur la température de l'eau et variations latitudinales : Une étude de sensibilité menée à l'aide du modèle unidimensionnel MyLake ». Ce rapport a été présenté au MFFP en mars 2016 (Bélanger, Gratton, St-Hilaire et Laurion 2016). Selon cette étude, une plus petite profondeur moyenne entraîne : 1) une plus petite quantité de chaleur accumulée par unité de surface, 2) une plus grande quantité de chaleur volumique et des températures plus élevées en été, 3) un début plus précoce de la période de refroidissement, un mélange automnal plus hâtif et une occurrence avancée du maximum de température en profondeur, 4) une occurrence plus hâtive du profil automnal de température uniforme à 4 °C, et 5) une plus petite quantité de chaleur volumique et des températures moins élevées en automne. L'intensité de ces différences varie avec la latitude, c'est-à-dire en fonction des conditions météorologiques.

- Un lac avec une plus petite profondeur moyenne accumule moins de chaleur par unité de surface. On a expliqué ce résultat par une température de surface plus élevée en période de gain de chaleur, résultant en un plus petit transfert de chaleur depuis l'atmosphère. La température de surface plus élevée résulterait du fait que la chaleur contenue dans la couche de surface est moins diluée lorsque mélangée avec une couche sous-jacente moins volumineuse.
- Les températures estivales plus élevées dans un lac avec une petite profondeur moyenne résultent du fait que la chaleur accumulée y est distribuée sur un plus petit volume. Ce phénomène domine nettement par rapport à la quantité de chaleur additionnelle absorbée dans un lac avec une plus grande profondeur moyenne.

Les différences de températures de surface apparaissent aussi responsables de certaines différences plus tard en fin d'été et à l'automne. La température de surface plus élevée pour un lac avec une petite profondeur moyenne entraîne d'abord un début de refroidissement plus précoce, le renversement du gradient avec l'atmosphère survenant plus tôt pour ce lac. Il s'en suit un mélange automnal plus hâtif, de même que des températures élevées survenant plus tôt en profondeur. Un peu plus tard lorsque le gradient avec l'atmosphère se renverse aussi pour un lac avec une plus grande profondeur moyenne, la température de surface est encore plus élevée pour le lac avec une petite profondeur moyenne et ce lac continue à perdre sa chaleur plus rapidement. Durant cette période, les deux lacs perdent de la chaleur et la différence de contenu en chaleur continue de croître. Éventuellement la température de surface devient similaire pour les deux lacs (le lac avec une petite profondeur moyenne ayant accumulé moins de chaleur et en ayant perdu une plus grande partie). À ce moment la différence en contenu en chaleur cesse de croître. Comme les deux lacs perdent alors leur chaleur à un même taux, le contenu en chaleur volumique du lac avec une petite profondeur moyenne devient vite inférieur (en raison de son plus petit volume), et sa température plus basse, de même que sa température de surface puisque le profil de température est alors uniforme. Le lac avec la plus grande profondeur

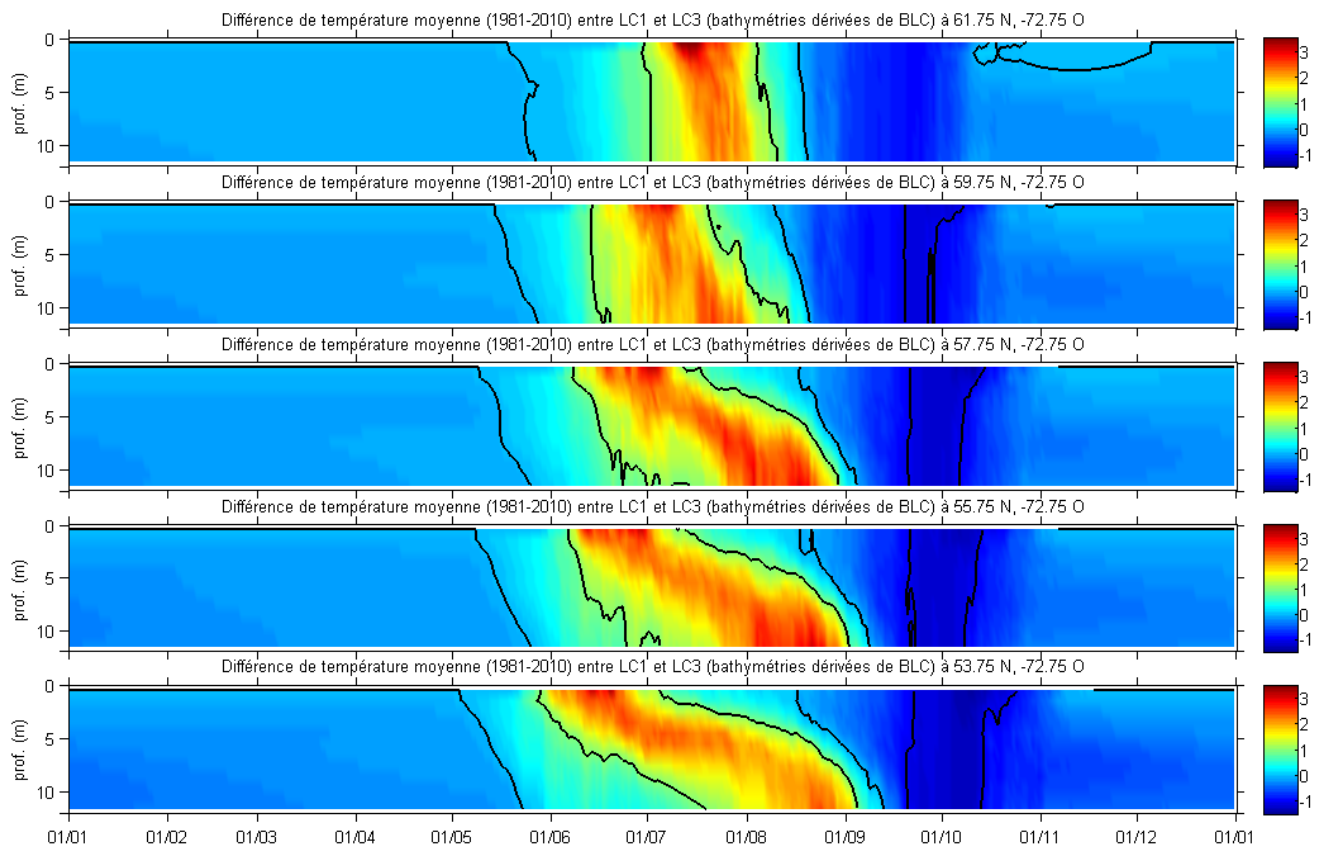


Figure 27. Différence entre les cycles annuels de température climatologique (°C) 1981-2010 des lacs types LC1 et LC3 (LC1-LC3) à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Les isothermes ajoutées correspondent aux températures -1, 0 et 1 °C.

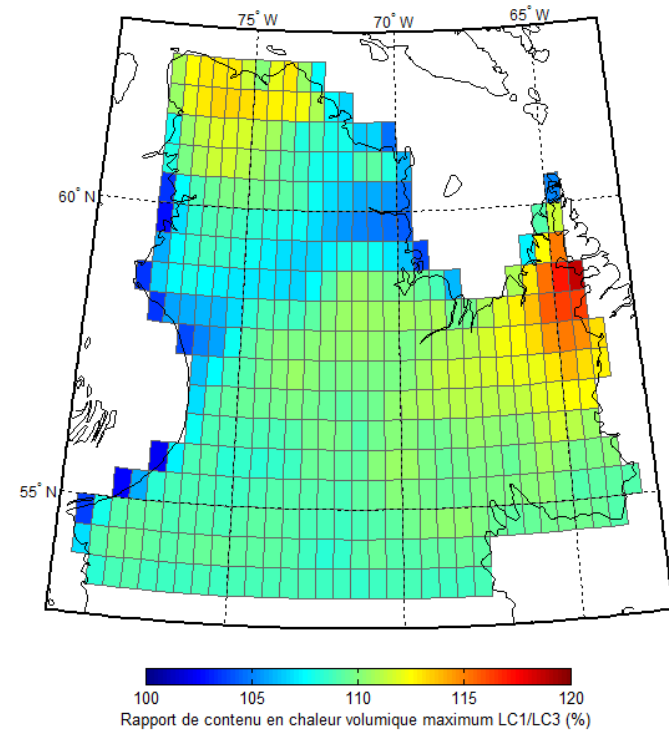
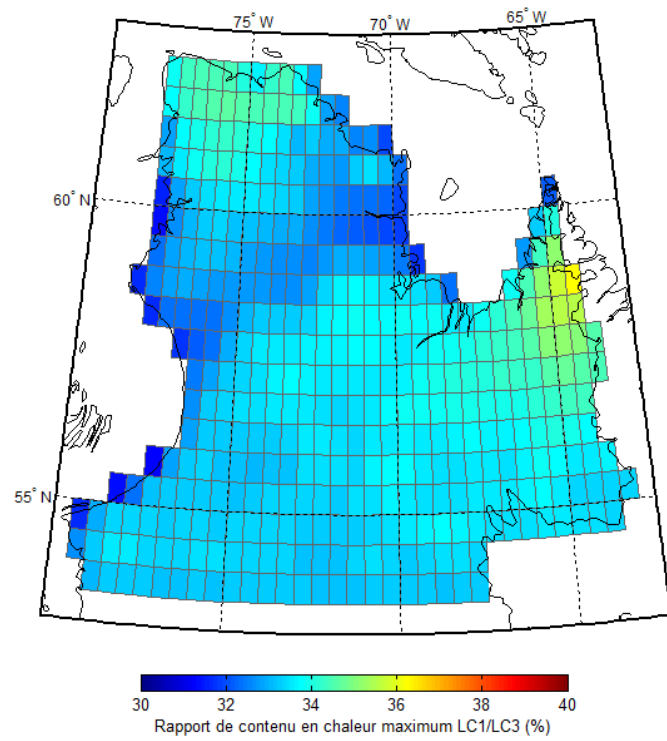


Figure 28. Rapports LC1/LC3 de contenu en chaleur maximum (%), à gauche, et de contenu en chaleur volumique maximum (%), à droite.

moyenne commence alors à perdre sa chaleur plus rapidement et la différence de contenu en chaleur décroît. Éventuellement, toute la chaleur restante dans les deux lacs est retournée à l'atmosphère, les contenus en chaleurs volumiques et les températures de surface devenant à nouveau similaires.

Selon la même étude, l'impact de la profondeur moyenne sur la température décroît du sud au nord. Autrement dit, plus la quantité d'énergie absorbée est importante, plus l'impact de la dilution de la chaleur absorbée (distribution sur des volumes différents) est marqué. Les conditions estivales étant de plus en plus courtes du sud au nord, la période où les différences de température sont davantage marquées diminue aussi du sud au nord. Il en va de même pour la période automnale durant laquelle la température d'un lac avec une petite profondeur moyenne est légèrement inférieure à celle d'un lac avec une plus grande profondeur moyenne.

Les résultats présentés aux Figures 22 à 26 sont conformes à ce à quoi on peut s'attendre en raison des différences de profondeur moyenne entre les quatre lacs-types considérés. Le lac LC1 a la plus petite profondeur moyenne (2,83 m) et le lac LC3 a la plus grande profondeur moyenne (5,38 m). La température de l'eau du lac LC1 est légèrement plus élevée que celle du lac LC3 en été et moins élevée en automne (Figures 22 à 26). Les lacs LC2 et LC5 ont des profondeurs moyennes intermédiaires (respectivement 3,94 m et 3,73 m) et leurs températures climatologiques en été et à l'automne sont entre celles des lacs LC1 et LC3. Les profondeurs moyennes des lacs-types LC2 et LC5 étant relativement proches, leurs températures climatologiques sont quasi similaires et les courbes de LC5 sont très souvent superposées à celles de LC2.

La Figure 27 présente la différence entre les températures climatologiques (1981-2010) des lacs-types LC1 et LC3 (LC1-LC3) à toutes les profondeurs à cinq latitudes le long du méridien 072,75 °O. Telle que mentionné ci-dessus, la durée des périodes avec différences positives (T de LC1 > T de LC3) et négatives (T de LC1 < T de LC3) diminue du sud au nord. Malgré cela, les différences en été sont tout aussi grandes à la latitude la plus élevée. C'est même à cette latitude qu'on trouve la différence la plus grande (+4,05 °C). Les différences négatives en automne y sont par contre légèrement plus petites (écart maximum de -0,95 °C à 61,75 °N et de -1,36 °C à 53,75 °N).

Les Figures 28a et 28b présentent les rapports LC1 / LC3 de contenu en chaleur maximum pour 1981-2010. Notez que le contenu en chaleur maximum peut survenir à des dates différentes à différents pixels, et qu'il ne survient pas nécessairement le même jour pour LC1 et LC3. La Figure 28a montre que le contenu en chaleur maximum pour LC1 n'est partout qu'environ le tiers (de 31,2 à 36,3 %) du contenu en chaleur maximum pour LC3. Ceci s'explique simplement par le plus grand volume d'eau (avec $T > 0$ °C) du lac LC3. La Figure 28b montre bien par contre que le contenu en chaleur maximum par unité de volume est plus grand pour LC1 que pour LC3 (de 102,3 à 118,8 %). On remarque certaines disparités spatiales : 1) les plus grandes différences sont tout au nord au-delà de 61 °N et dans les régions où l'élévation est relativement grande (Monts Torngat et plus au sud aux alentours des sommets constituant la ligne de partage des eaux entre le Québec et

le Labrador), et 2) les plus petites différences sont en zone côtière le long de la Baie d'Hudson et à l'ouest de la Baie d'Ungava.

La carte de différences LC1-LC3 de température moyenne pour la couche 0-5m pour la période du 1^{er} juin au 31 août (Figure 29) montre aussi que le lac LC1 est légèrement plus chaud que le lac LC3. On y voit cependant des variations spatiales différentes : en général la différence diminue du sud au nord. On notera que dans le cas précédent du contenu en chaleur maximum on s'intéressait à un moment précis du cycle annuel alors que la Figure 29 présente une moyenne sur trois mois. Comme la température de l'épilimnion commence à augmenter beaucoup plus tard pour un lac au nord que pour un lac au sud (Figures 22 et 23), les températures en juin demeurent très basses pour les lacs les plus au nord, ce qui forcément impacte la moyenne sur trois mois, de même que les différences entre LC1 et LC3.

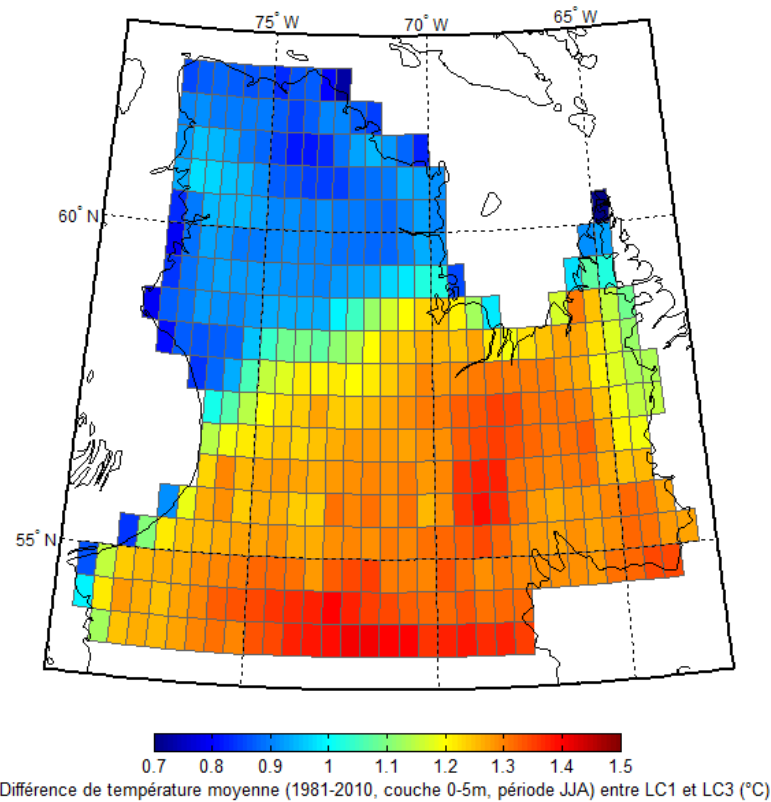


Figure 29. Différences entre LC1 et LC3 (LC1-LC3) pour la température moyenne (°C) 1981-2010 de la couche 0-5 m pour la période du 1^{er} juin au 31 août.

8. Choix des indicateurs de l'état des habitats thermiques

Il est possible de calculer divers indicateurs de l'état des habitats thermiques à l'aide des cycles climatologiques annuels. Les valeurs d'un indicateur à tous les pixels peuvent alors être représentées sur une carte couvrant l'ensemble de la région considérée. Les indicateurs sont de deux types : les indicateurs physiques et les indicateurs biologiques.

8.1 Indicateurs physiques

Nous avons privilégié, avec l'approbation sur MFFP, les quinze indicateurs physiques suivants, répartis en quatre catégories.

1. Contenu en chaleur

- 1a Contenu en chaleur maximal
- 1b1 Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur (%)
- 1b2 Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur (% par décennie)
- 1c Occurrence du maximum de contenu en chaleur
- 1d Évolution projetée de l'occurrence du maximum de contenu en chaleur

2. Température des cinq premiers mètres

- 2a Température moyenne de la couche 0-5 m pour la période du 1^{er} juin au 31 août
- 2b Évolution projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m du 1^{er} juin au 31 août

3. Température maximale près de la surface

- 3a Température maximale à 1,5 m
- 3b Évolution projetée de la température maximale à 1,5 m
- 3c Occurrence de la température maximale à 1,5 m
- 3d Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale à 1,5 m

4. Température maximale en profondeur

- 4a Température maximale en profondeur
- 4b Évolution projetée de la température maximale en profondeur
- 4c Occurrence de la température maximale en profondeur
- 4d Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale en profondeur

Toutes les figures de tous ces indicateurs physiques sont livrées en version électronique : la liste des figures électroniques est présentée à l'Annexe II. Cependant, nous présentons ci-dessous quelques exemples (Figures 30 à 33) de telles cartes pour quatre indicateurs. L'interprétation des indicateurs est présentée au Chapitre 9.

Pour chaque indicateur, nous présentons ici trois cartes, i.e. une carte pour chacun des trois lacs types LC1, LC3 et LC5 qui représentent les trois classes les plus importantes. La Figure 30 présente la température moyenne pour la couche 0-5 m pour la période du 1^{er} juin au 31 août. Nous présentons les valeurs pour la période 1981-2010 et les différences entre la période 2071-2100 et la période 1981-2010. La Figure 31 présente des cartes d'épaisseur de glace maximum. Ces valeurs n'ont pas été validées. La Figure 32 présente des cartes de volume minimum (en % du volume du lac) avec température sous 15 °C. Les cartes de volume minimum avec température sous 15 °C illustrent le plus petit volume d'habitat favorable pour les salmonidés atteint au cours de l'été. Un pourcentage de zéro signifierait qu'à un certain moment de l'été il ne resterait plus d'eau avec température sous la limite supérieure de confort. C'est un des indicateurs des conditions menaçant la survie des poissons. La Figure 33 présente des cartes de m³-jours avec température entre 5 et 20 °C (avec coefficient décroissant de 1 à 0 entre 15 et 20 °C). Les cartes de m³-jours avec température entre 5 et 20 °C illustrent la relative abondance des conditions d'habitat favorables à la croissance des salmonidés. C'est un des indicateurs des conditions favorables à la croissance des poissons.

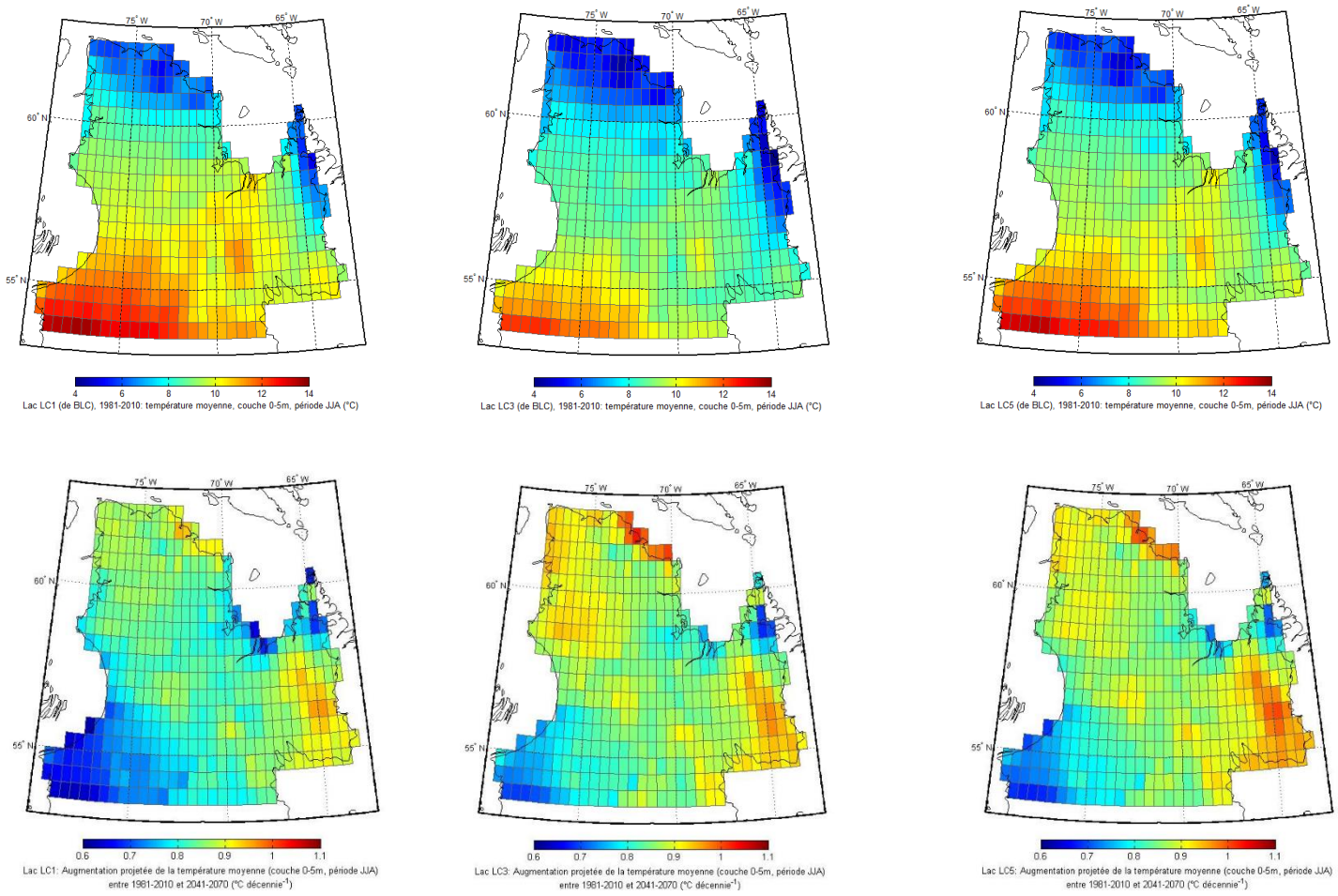


Figure 30. Ligne du haut : cartes de la température moyenne (°C) de la couche 0-5 m pour la période du 1^{er} juin au 31 août pour les lacs LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite). Ligne du bas : changements entre 1981-2010 et 2071-2100 pour les mêmes lacs-types.

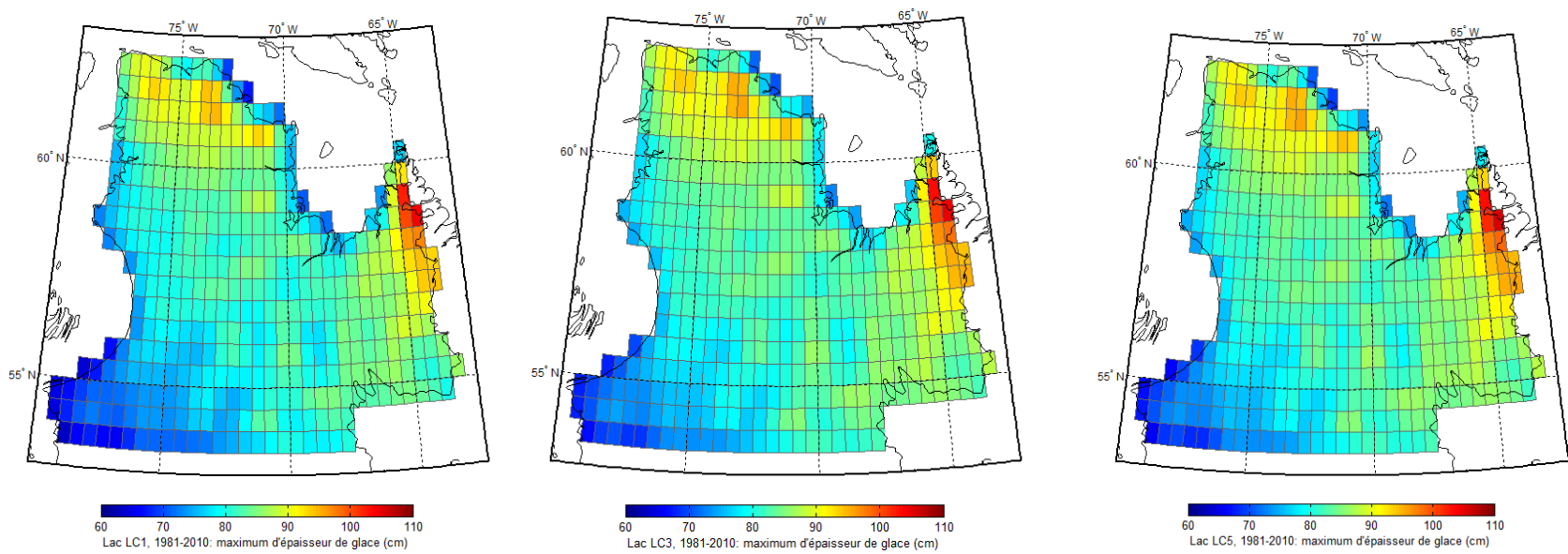


Figure 31. Cartes de l'épaisseur de glace maximum (cm) période 1981-2010 pour les lacs LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite). Les épaisseurs de glace simulées n'ont pas fait l'objet d'une comparaison avec des épaisseurs observées.

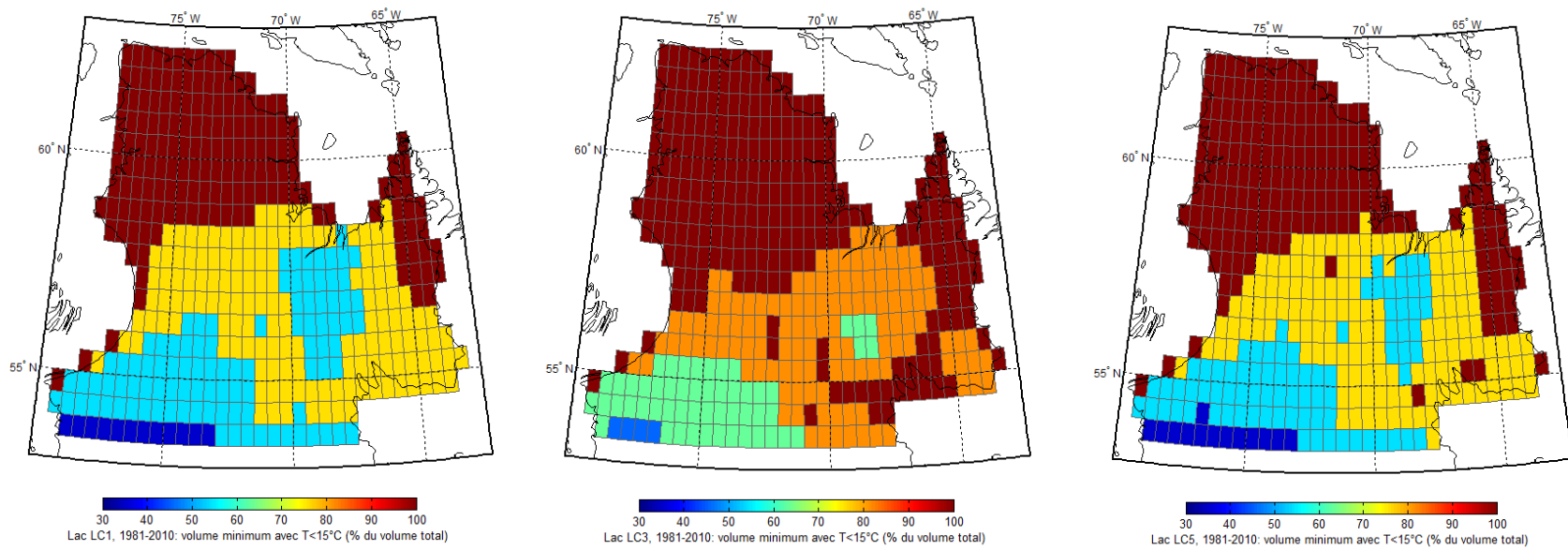


Figure 32. Cartes du volume minimum avec température sous 15 °C (% du volume du lac) pour la période 1981-2010, pour les lacs LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite).

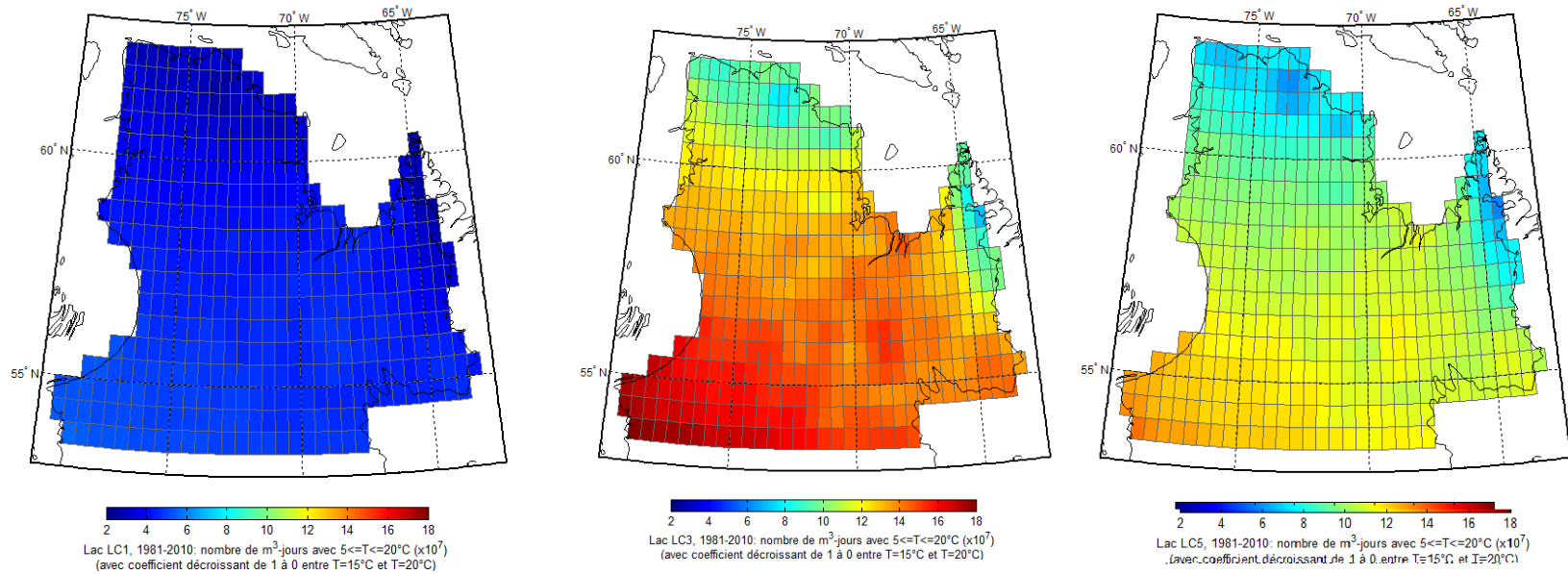


Figure 33. Cartes du nombre de m^3 -jours avec température entre 5 et 20 °C (avec coefficient décroissant de 1 à 0 entre 15 et 20 °C) (m^3 -jours), pour la période 1981-2010, pour le lac LC1 (à gauche), LC3 (au centre) et LC5 (à droite).

8.2 Indicateurs biologiques

Comme chaque stade de vie du touladi et de l'omble de chevalier 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). 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 4 et 5. Les courbes des préférences thermiques associées à chaque espèce sont présentées à la Figure 34. Le choix des métriques est décrit en plus de détails dans Ouellet et al. (2020).

Tableau 4. Métriques thermiques pour trois stades de vie du touladi et de l'omble chevalier. Tiré de Ouellet et al. (2020).

Période critique	Description	Métrique
Reproduction	Indice de potentiel de fraie : aire du lac disponible (a) et date de début de la fraie (b)	R1a R1b
	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+)	Indice de croissance du juvénile : fraction pondérée du lac potentiel pour la croissance (incluant la température de croissance optimale)	J1
Adulte	Indice de mortalité : fraction du volume du lac qui atteint la température létale	A1
	Indice de stress thermique : fraction pondérée du volume du lac avec des températures stressantes.	A2

Tableau 5. Seuils thermiques en °C pour chaque métrique du Tableau 4. Tous les seuils sont tirés de la littérature scientifique. Tiré de Ouellet et al. (2020).

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

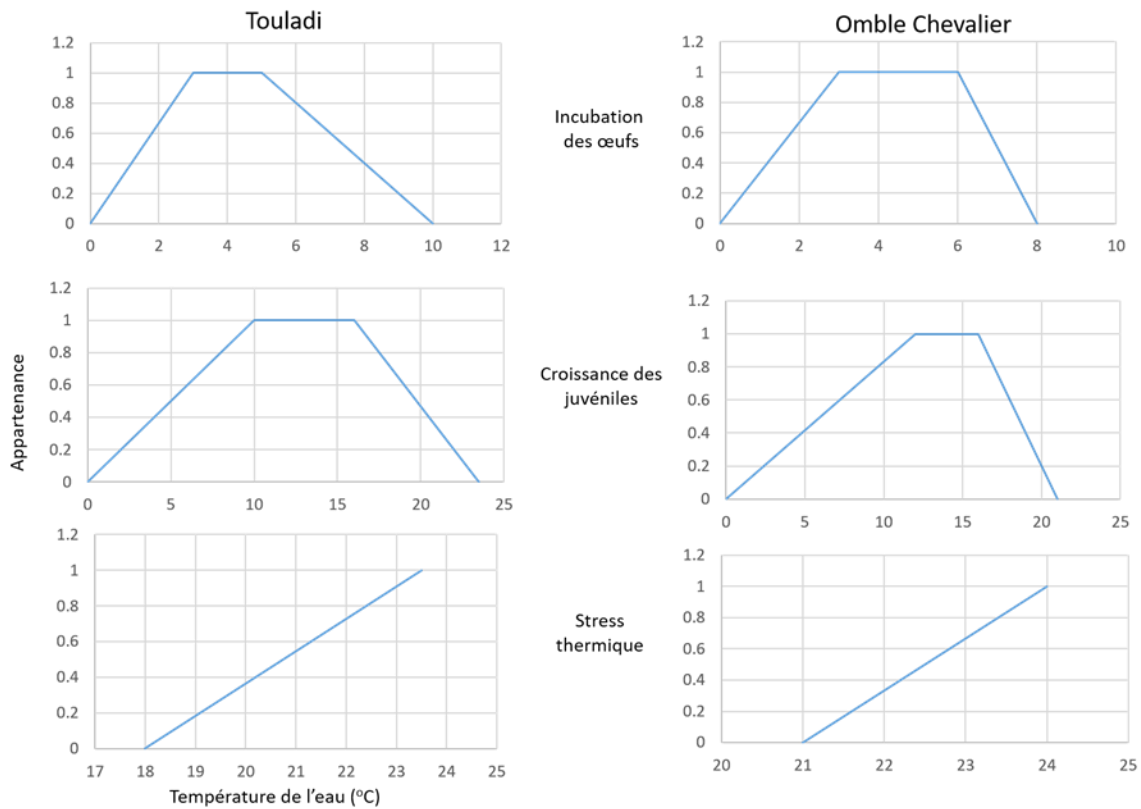


Figure 34. Courbes des préférences thermiques pour l’incubation des œufs (en haut), la croissance des juvéniles (au centre) et les stress thermiques chez l’adulte (en bas) pour le touladi (à gauche) et l’omble chevalier (à droite). Tiré de Ouellet et al. (2020).

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, les représentations graphiques des métriques biologiques seront identifiées par le terme « indicateur biologique », par analogie. Nous avons calculé et représenté graphiquement toutes les métriques du Tableau 4, à l’exception de la métrique A1. Il n’y a pas de représentation graphique des résultats pour la métrique A1 car les résultats indiquent que la température létale n’est jamais atteinte, même à l’horizon 2071-2100.

1. Indicateurs du potentiel de fraie (R1)

R1a. Nous avons tracé des cartes 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, soit 6-15 °C pour le touladi et 0,5-7 °C pour l’omble chevalier.

R1b. Nous avons tracé des cartes 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.

2. Indicateurs de la survie des œufs (R2)

R2a. Nous avons tracé 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 sont 0, 3, 5 et 10 °C. Les valeurs seuils pour l'omble chevalier sont 0, 3, 6 et 8 °C.

R2b. Nous avons cartographié 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).

3. Indicateurs de la croissance des juvéniles (J1)

J1a. Nous avons tracé des sections nord-sud du pourcentage du volume du lac avec une température favorable à la croissance des juvéniles. L'indicateur utilisé pour le touladi est basé sur les seuils 0, 10, 16, 23,5 °C, tandis que l'indicateur pour l'omble chevalier est basé sur les seuils 0, 12, 16, 21 °C.

J1b. Nous avons tracé des cartes du nombre de m³-jours avec une température favorable à la croissance des juvéniles seuils pour le touladi : 0, 10, 16, 23,5 °C; seuils pour l'omble chevalier : 0, 12, 16, 21 °C).

4. Indicateurs de mortalité (A1)

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 même à l'horizon 2071-2100.

5. Indicateurs de stress thermique (A2)

A2a. Nous avons tracé des sections 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.

A2b. Nous avons tracé des sections 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).

A2c. Nous avons tracé des cartes de la fraction 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).

La liste des figures disponibles pour les indicateurs biologiques est présentée à l'Annexe III pour le touladi et à l'Annexe IV pour l'omble chevalier. Une interprétation détaillée de tous les indicateurs biologiques est présentée à la section 9.2.

9. Analyse des résultats

Tous les résultats présentés sont basés sur le scénario de concentration de gaz à effet de serre RCP 8.5, soit le plus pessimiste des scénarios RCP.

9.1 Indicateurs physiques

9.1.1 Contenu en chaleur maximal

Grandeur des changements projetés

Les variations du contenu en chaleur sur un cycle annuel reflètent les gains de chaleur en été suivis des pertes de chaleur à l'automne. Les cycles annuels de contenu en chaleur par rapport à 0 °C ont été calculés à partir des cycles climatologiques de température et du volume de chacune des couches. On s'attend donc à ce que la grandeur du contenu en chaleur reflète le volume du lac.

Nous avons cartographié le maximum de contenu en chaleur de même que les changements projetés. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs types sont présentées aux Tableaux 6 et 7. La moyenne du contenu en chaleur maximal sur le domaine augmente systématiquement du lac type le moins volumineux jusqu'au lac type le plus volumineux (soit, par ordre, LC1, LC5, LC3, LC6, LC2, LC4 et LC7).

Les résultats indiquent une augmentation du contenu en chaleur maximal sur tout le domaine, mais d'intensité variable. Les augmentations moyennes sur le domaine entre 1981-2010 et 2071-2100 varient de 40,0 à 54,0 %. La plus petite augmentation en pourcentage est pour LC7, le lac type ayant la plus grande profondeur moyenne. Une grande partie du volume de LC7 est loin de la surface et la température à ces profondeurs en été augmente très peu. La plus grande augmentation projetée est pour le lac type LC3, c'est-à-dire un lac de profondeur moyenne intermédiaire. Ceci pourrait s'expliquer par l'impact combiné de deux facteurs : 1) la part du volume du lac loin de la surface peu affectée par le réchauffement estival (ce qui expliquerait que l'augmentation pour LC3 est plus grande que pour LC4, LC6 et LC7), et 2) un plus grand gain de chaleur pour un lac de plus grande profondeur moyenne (ce qui expliquerait que l'augmentation pour LC3 est plus grande que pour LC1, LC2 et LC5). Un lac de plus grande profondeur moyenne peut accumuler plus de chaleur par unité de surface en raison de sa température de surface plus basse, d'où une plus grande différence avec la température de l'air. Sa température de surface plus basse résulte d'un transfert de chaleur vers le bas plus efficace (le mélange de la couche de surface avec une couche sous-jacente plus volumineuse menant à température plus basse que si mélangé à une couche sous-jacente moins volumineuse de même température, la même chose se répétant plus bas dans la colonne d'eau).

Ford et Stefan (1980) ont présenté des résultats qui supportent l'idée avancée qu'une profondeur moyenne plus grande entraîne une température de surface plus basse. Ils ont comparé les températures dans trois lacs du Minnesota de morphologie différentes,

ces lacs étant près les uns des autres et exposés à des conditions météorologiques similaires. Parmi ces trois lacs, deux avaient pratiquement la même superficie (~1,8 km²) mais des profondeurs moyennes très différentes (10,0 et 3,6 m). Le troisième lac était beaucoup plus petit (0,3 km²) et de profondeur moyenne intermédiaire (7,9 m). La température de surface au printemps et en été était toujours un peu plus basse pour le lac de plus grande profondeur moyenne.

Les augmentations projetées en contenu en chaleur maximal s'accroissent au cours du 21^{ème} siècle. Lorsqu'exprimées en % par décennie par rapport au maximum de 1981-2010, les augmentations projetées passent de ~4,5 % par décennie pour les six décennies de 1981-2010 à 2041-2070 à ~7,3 % par décennie pour les trois décennies de 2041-2070 à 2071-2100 (moyenne des sept lacs types).

Tableau 6. Contenu en chaleur maximal : moyenne, plus bas maximum et plus haut maximum sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (TJ).

Contenu en chaleur maximal							
Période	Maximum moyen sur le domaine (TJ)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	23,27	385,43	69,76	7210	59,09	207,30	71540
2041-2070	29,13	419,67	91,02	9190	74,96	261,86	86610
2071-2100	33,97	575,23	106,84	10870	87,64	309,61	100090
	Plus bas maximum sur le domaine (TJ)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	16,09	261,19	45,85	5340	40,50	156,53	57850
2041-2070	20,24	349,12	67,11	7240	53,03	204,46	71110
2071-2100	23,92	411,95	79,23	8890	62,58	247,56	83080
	Plus haut maximum sur le domaine (TJ)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	28,45	476,04	85,77	8410	72,89	242,01	79950
2041-2070	33,95	574,10	104,73	10520	87,41	299,37	101010
2071-2100	38,75	655,99	120,24	12930	99,94	377,73	126440

Tableau 7. Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%).

Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur (%)								
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (%)							
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	
De 1981-2010 à 2041-2070	25,63	28,18	31,14	27,77	27,46	26,52	21,30	
De 1981-2010 à 2071-2100	46,62	50,07	54,04	51,19	49,13	49,70	40,02	
De 2041-2070 à 2071-2100	16,68	17,05	17,43	18,23	16,98	18,20	15,48	
	Plus petite augmentation sur le domaine (%)							
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	
De 1981-2010 à 2041-2070	18,60	20,40	21,81	18,43	19,64	18,24	14,08	
De 1981-2010 à 2071-2100	33,93	36,91	39,87	36,42	35,91	35,66	28,55	
De 2041-2070 à 2071-2100	12,51	12,85	12,66	9,30	12,75	9,98	8,09	
	Plus grande augmentation sur le domaine (%)							
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	
De 1981-2010 à 2041-2070	52,28	58,01	58,70	51,56	56,92	49,00	42,40	
De 1981-2010 à 2071-2100	81,99	93,55	100,37	89,09	90,86	87,79	76,64	
De 2041-2070 à 2071-2100	25,02	23,97	26,26	26,41	24,51	30,67	28,36	

Variations spatiales

Certaines des cartes de contenu en chaleur maximal présentent une caractéristique intrigante, à savoir que le maximum est plus grand dans la région nord-ouest du domaine que plus au sud, ce qui évidemment peut sembler contre-intuitif. Les Figures 35 et 36 présentent deux exemples de maximum plus grand au nord qu’au sud. Ce phénomène apparaît davantage marqué pour les lacs types de grande profondeur moyenne (LC4, LC6 et LC7), et davantage marqué pour le futur 2071-2100 que pour le passé 1981-2010. Divers

tests ont démontré que ce phénomène ne serait pas lié à la calibration utilisée mais plutôt à la réanalyse utilisée.

Les Figures 37 à 39 donnent une indication de ce qui semble causer les fortes valeurs de contenu en chaleur dans la région nord-ouest. On y compare l'évolution de la température et du contenu en chaleur à deux pixels pour le lac type LC6, soit un pixel dans la région nord-ouest et un pixel plus au sud où le maximum de contenu en chaleur est plus petit (les pixels considérés sont indiqués à la Figure 36). Les figures incluent aussi la température de l'air et la vitesse du vent (moyenne sur trente ans) aux mêmes pixels. À part pour une courte période (juin à l'horizon 2071-2100), la température de l'air est toujours égale ou légèrement supérieure au sud. Le plus grand contenu en chaleur au nord ne peut donc pas être expliqué par la température de l'air. Par contre, la vitesse du vent est nettement plus grande pour le pixel nord, et augmente dans le futur en été (sauf en août). Une plus grande vitesse du vent entraînerait une augmentation du mélange et un transport de la chaleur vers le fond en été (d'où la température à 20,5 m plus élevée au pixel nord qu'au pixel sud) tout en gardant une température de surface légèrement plus basse (température à 1,5 m plus basse au pixel nord qu'au pixel sud) favorisant un plus grand gain de chaleur depuis l'atmosphère. Il en résulte un contenu en chaleur plus grand au nord qu'au sud, la différence augmentant dans le futur.

Nous ne savons pas si la vitesse des vents CFSR dans la région nord-ouest reflète fidèlement la réalité. Nous savons par contre que les simulations réalisées avec les vents NARR ne produisent pas de tels contenus en chaleur relativement élevés dans la région nord-ouest. La représentativité des vents CFSR dans cette région mériterait d'être investiguée davantage. Cela nécessiterait une quantité de travail substantielle et dépasse le cadre de la présente étude.

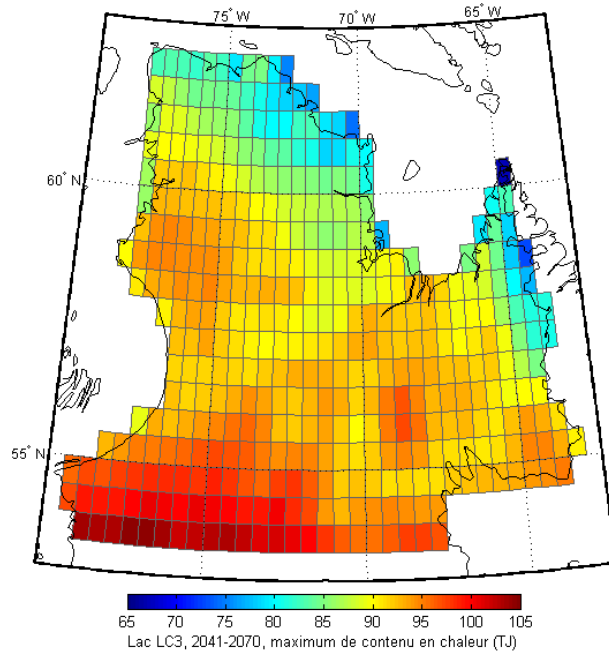


Figure 35. Lac-type LC3, maximum de contenu en chaleur à l’horizon 2041-2070 en tera-joules (TJ).

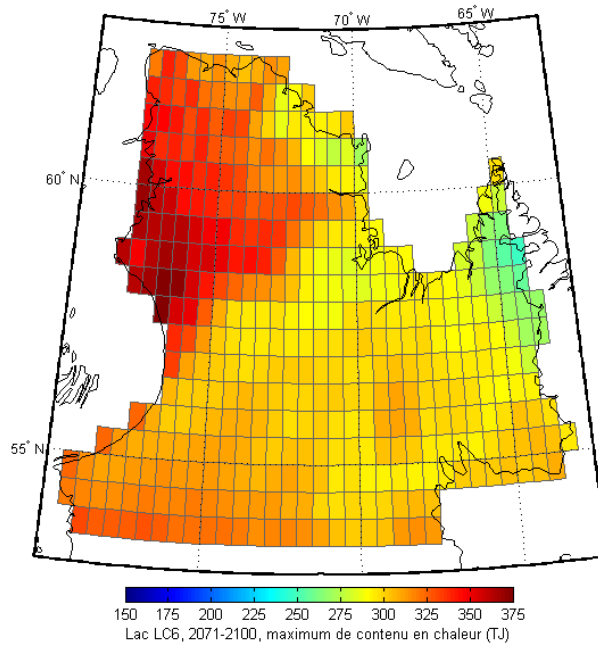


Figure 36. Lac-type LC6, maximum de contenu en chaleur à l’horizon 2071-2100 en tera-joules (TJ).

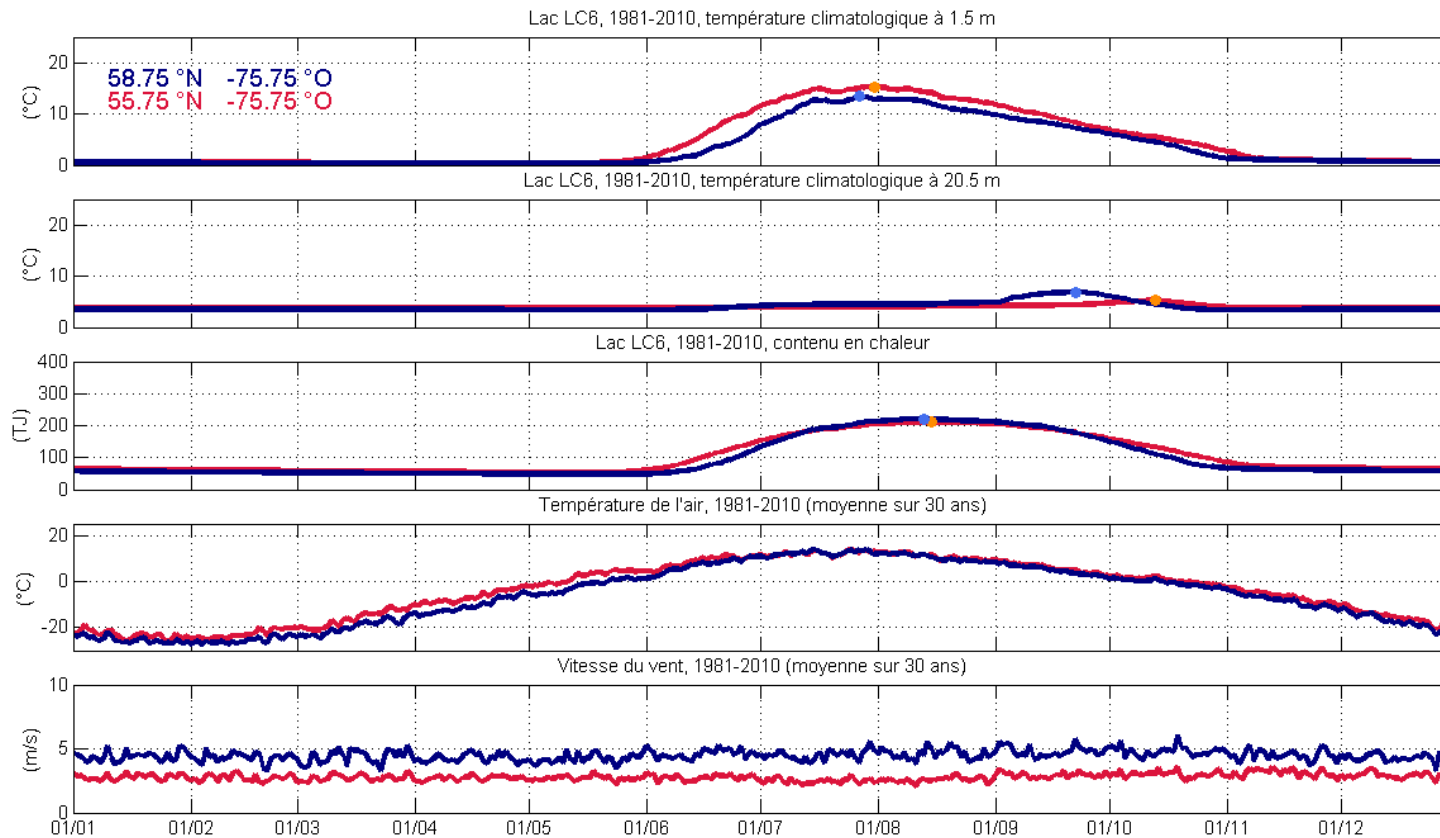


Figure 37. Lac type LC6, période 1981-2010, comparaison des cycles annuels climatologiques à deux pixels pour cinq variables : (a) température à 1,5 m (°C), (b) température à 20,5 m (°C), (c) contenu en chaleur (TJ), (d) température de l'air (°C), et (e) vitesse du vent (m s⁻¹). Les pixels comparés sont indiqués à la Figure 36. Les coordonnées du pixel nord sont 58,75 °N, -75,75 °O (en bleu) et les coordonnées du pixel sud sont 55,75 °N, -75,75 °O (en rouge). Les points bleu pâle et orange indiquent l'occurrence du maximum sur cycle annuel.

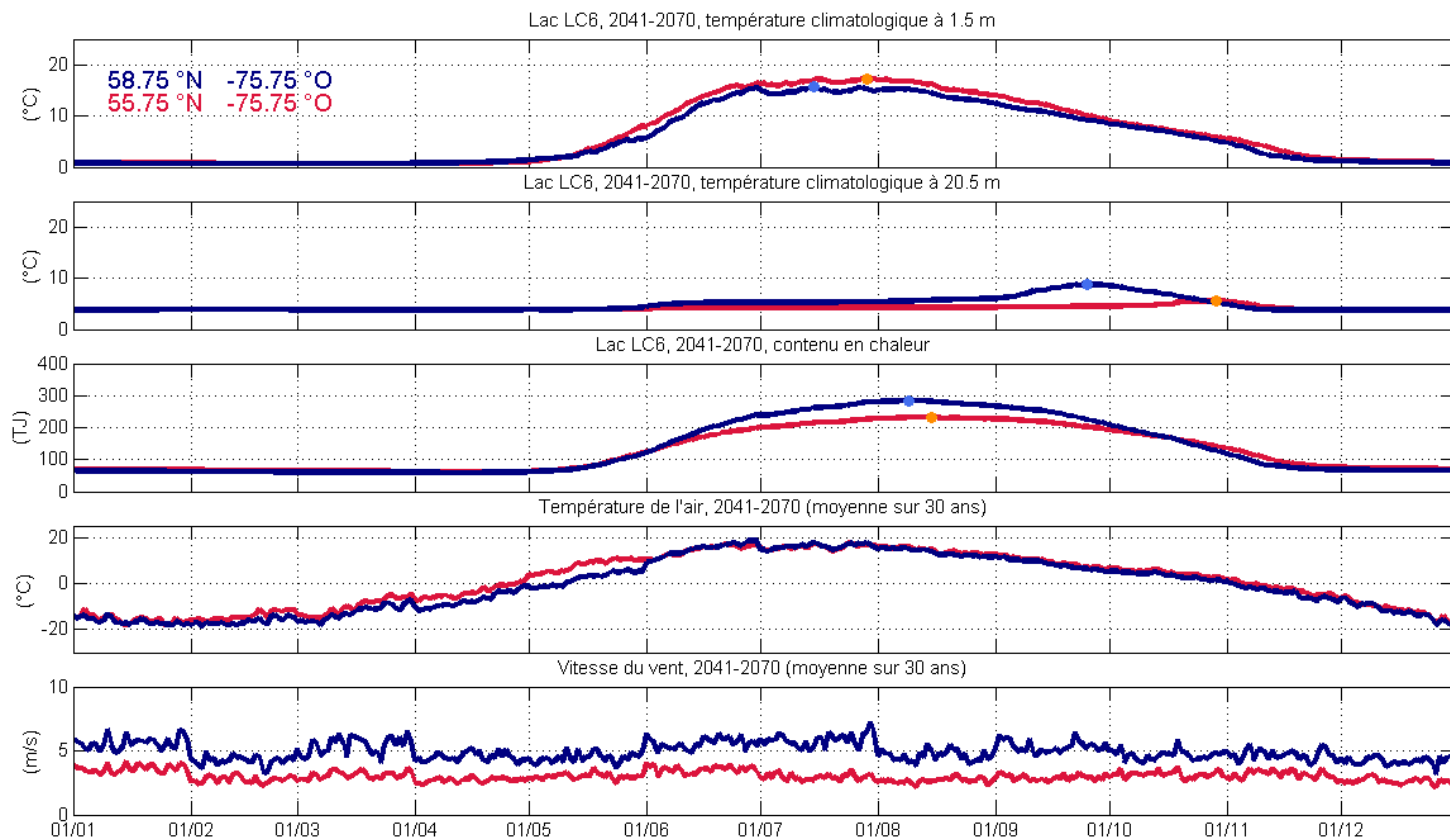


Figure 38. Lac type LC6, période 2041-2070, comparaison des cycles annuels climatologiques à deux pixels pour cinq variables : (a) température à 1,5 m (°C), (b) température à 20,5 m (°C), (c) contenu en chaleur (TJ), (d) température de l'air (°C), et (e) vitesse du vent (m s⁻¹). Les pixels comparés sont indiqués à la Figure 36. Les coordonnées du pixel nord sont 58,75 °N, -75,75 °O (en bleu) et les coordonnées du pixel sud sont 55,75 °N, -75,75 °O (en rouge). Les points bleu pâle et orange indiquent l'occurrence du maximum sur le cycle annuel.

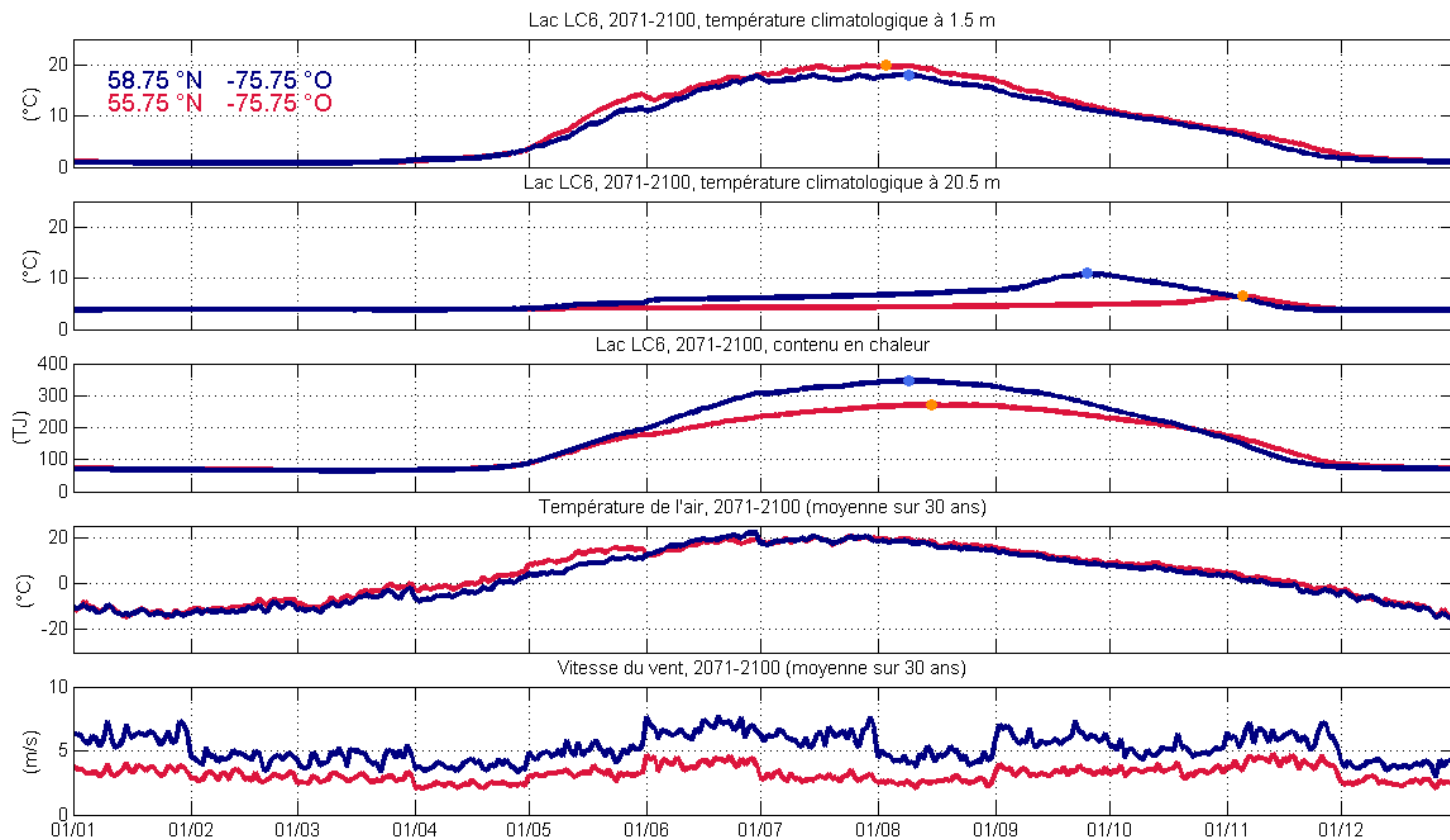


Figure 39. Lac type LC6, période 2071-2100, comparaison des cycles annuels climatologiques à deux pixels pour cinq variables : (a) température à 1,5 m (°C), (b) température à 20,5 m (°C), (c) contenu en chaleur (TJ), (d) température de l'air (°C), et (e) vitesse du vent (m s⁻¹). Les pixels comparés sont indiqués à la Figure 36. Les coordonnées du pixel nord sont 58,75 °N, -75,75 °O (en bleu) et les coordonnées du pixel sud sont 55,75 °N, -75,75 °O (en rouge). Les points bleu pâle et orange indiquent l'occurrence du maximum sur le cycle annuel.

Tableau 8. Occurrence du maximum de contenu en chaleur : occurrence moyenne, la plus hâtive et la plus tardive sur le domaine 1981-2010 pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (jour de l'année).

Occurrence du maximum de contenu en chaleur							
Période	Occurrence moyenne sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	01h42 01 août	07h20 05 août	22h04 09 août	22h21 10 août	08h15 04 août	16h26 15 août	04h09 13 août
2041-2070	21h20 26 juillet	16h06 31 juillet	12h03 04 août	19h41 07 août	15h08 30 juillet	22h31 13 août	11h26 10 août
2071-2100	07h10 24 juillet	00h20 27 juillet	13h18 31 juillet	05h38 08 août	04h47 26 juillet	01h05 14 août	23h16 11 août
	Occurrence la plus hâtive sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	28 juillet	28 juillet	01 août	04 août	28 juillet	13 août	08 août
2041-2070	30 juin	30 juin	28 juillet	29 juillet	30 juin	29 juillet	29 juillet
2071-2100	29 juin	30 juin	30 juin	29 juillet	29 juin	03 août	29 juillet
	Occurrence la plus tardive sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	12 août	19 août	22 août	22 août	17 août	30 août	30 août
2041-2070	10 août	16 août	17 août	22 août	16 août	30 août	22 août
2071-2100	15 août	16 août	17 août	20 août	16 août	30 août	22 août

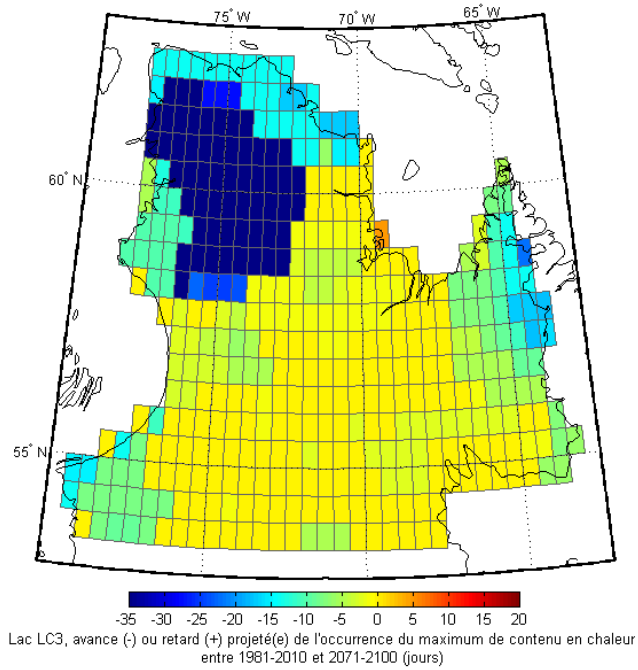


Figure 40. Lac type LC3, décalage projeté pour le contenu en chaleur maximal entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).

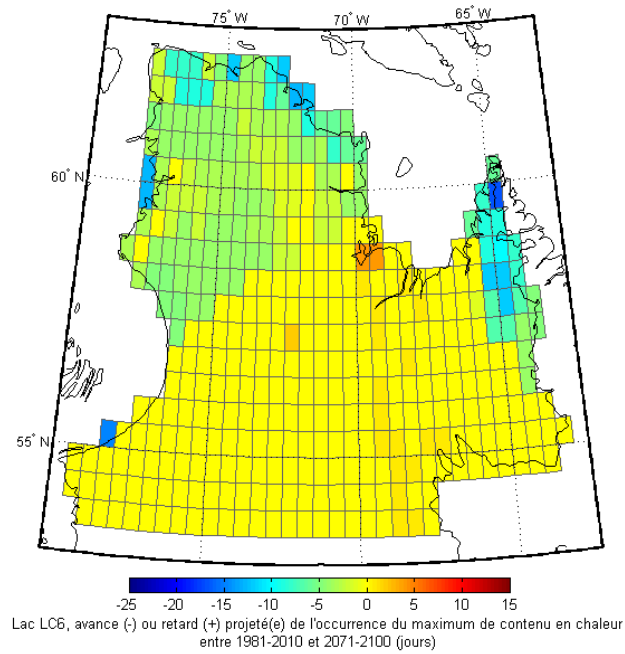


Figure 41. Lac type LC6, décalage projeté pour le contenu en chaleur maximal entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).

Décalages sur le cycle annuel

Nous avons cartographié l'occurrence du contenu en chaleur maximal de même que les changements projetés. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs types sont présentées aux Tableaux 8 et 9.

En se basant sur le décalage moyen sur le domaine, le maximum de contenu en chaleur semble arriver quelques jours plus tôt dans le futur, soit un décalage de 1,2 à 9,4 jours entre 1981-2010 et 2071-2100 Tableau 9. Ces résultats doivent cependant être interprétés avec précaution : il arrive que le décalage moyen soit fortement influencé par de grandes avances sur une petite partie du domaine, soit la région nord-ouest. C'est le cas pour les lacs types de faible profondeur moyenne alors que les avances dans cette région sont beaucoup plus modérées pour lacs types de grande profondeur moyenne (Figure 40 pour un exemple d'un lac de faible profondeur moyenne et Figure 41 pour un exemple d'un lac de grande profondeur moyenne).

Les plus grandes avances dans la région nord-ouest pour les lacs-types de faible profondeur moyenne pourraient être expliquées par une plus grande augmentation de la température de surface pour les lacs types de faible profondeur moyenne. Une température de surface plus élevée mène à un début de perte de chaleur plus hâtif et conséquemment à un maximum de contenu en chaleur plus hâtif. Les forts vents dans la région favoriseraient ce mécanisme puisque la différence de température de surface entre lacs de faible et grande profondeur moyenne découle du mélange des couches supérieures.

Un deuxième mécanisme, d'origine méthodologique et probablement déterminant, pourrait aussi expliquer les plus grandes avances dans la région nord-ouest pour les lacs-types de faible profondeur moyenne : une diminution des deltas pour la température de l'air entre juin et juillet. Les Figures 38 et 39 laissent supposer une diminution des deltas pour la température de l'air à au moins un des pixels de la région nord-ouest et le maximum de contenu en chaleur pour les lacs types de faible profondeur survient à la toute fin de juin, soit le 30 juin pour 2041-2070 (LC1, LC2 et LC5), et le 29 ou 30 juin pour 2071-2100 (LC1, LC2, LC3 et LC5) (Tableau 8). La baisse estimée de la température de l'air de juin à juillet affecte aussi les lacs types de grande profondeur moyenne (LC4, LC6 et LC7) mais leur température de surface plus basse fait en sorte que le gain de chaleur se poursuit par après.

Tableau 9. Évolution projetée de l'occurrence du maximum de contenu en chaleur : changement moyen, plus grande avance et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours).

Évolution projetée de l'occurrence du maximum de contenu en chaleur							
Période	Changement moyen sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	-5,18	-4,64	-5,41	-3,11	-4,71	-1,75	-2,70
De 1981-2010 à 2071-2100	-7,77	-9,29	-9,36	-2,70	-9,14	-1,64	-1,20
De 2041-2070 à 2071-2100	-2,59	-4,66	-3,95	0,41	-4,43	0,11	1,49
	Plus grande avance sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	-31	-29	-18	-19	-31	-17	-30
De 1981-2010 à 2071-2100	-37	-43	-43	-19	-43	-17	-16
De 2041-2070 à 2071-2100	-39	-37	-37	-15	-37	-11	-13
	Plus grand retard sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	10	9	9	3	8	4	7
De 1981-2010 à 2071-2100	10	10	5	5	10	4	8
De 2041-2070 à 2071-2100	38	23	11	14	37	14	14
Une valeur positive (négative) correspond à un retard (une avance) dans le futur.							

Différences entre lacs types

Le phénomène de contenu en chaleur maximal plus grand dans la région nord-ouest qu'au sud du domaine est davantage marqué pour les lacs-types de grande profondeur moyenne (Figures 35 et 36). La vitesse du vent particulièrement élevée dans cette région favoriserait le mélange, le mélange entraînerait une température de surface plus basse pour les lacs de grande profondeur moyenne et la température de surface plus basse mènerait à un plus grand gain de chaleur. Aussi, une partie du gain de chaleur dans les lacs-types de faible profondeur moyenne ne peut être transférée aux grandes profondeurs comme pour les lacs plus profonds. Cela pourrait également contribuer à maintenir une température de surface plus élevée pour les lacs-types de faible profondeur moyenne, spécialement si la colonne d'eau est très mélangée.

Les augmentations projetées de contenu en chaleur maximal varient relativement peu entre les lacs types mais on note les deux particularités suivantes : la plus petite augmentation en pourcentage est pour le lac type ayant la plus grande profondeur moyenne (LC7) et la plus grande augmentation est pour le lac type de profondeur moyenne intermédiaire (LC3) (Tableau 9). Les mécanismes expliquant ces résultats ont été présentés à la section *Grandeur des changements projetés*. Le contenu en chaleur maximal surviendrait plus tôt dans le futur dans la région nord-ouest du domaine mais de façon beaucoup plus marquée pour les lacs types de faible profondeur moyenne (Figures 40 et 41). Les mécanismes expliquant ces résultats ont été présentés à la section *Décalages sur le cycle annuel*.

9.1.2 Température moyenne estivale de la couche 0-5 m

Grandeur des changements projetés

Nous avons cartographié la température moyenne pour la couche 0-5 m entre le 1^{er} juin et le 31 août, de même que les changements projetés. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs-types sont présentées aux Tableaux 10 et 11. Les résultats indiquent une augmentation marquée de la température moyenne de la couche 0-5 m en été. La moyenne sur le domaine de passe de $\sim 9,0$ °C pour la période de référence 1981-2010 à $\sim 17,1$ °C pour la période 2071-2100 (moyenne des sept lacs types), correspondant à une augmentation de $\sim 0,90$ °C par décennie. Le taux de changement s'accroît au cours du siècle, l'augmentation moyenne projetée passant de $\sim 0,83$ °C par décennie pour la période allant de 1981-2010 à 2041-2070 à $\sim 1,03$ °C par décennie pour la période allant de 2041-2070 à 2071-2100. À titre comparatif, O'Reilly et al. (2015) ont estimé à partir de mesures *in situ* et satellitaires à l'échelle mondiale que la température de surface des lacs en été a augmenté de $0,34$ °C par décennie entre 1985 et 2009.

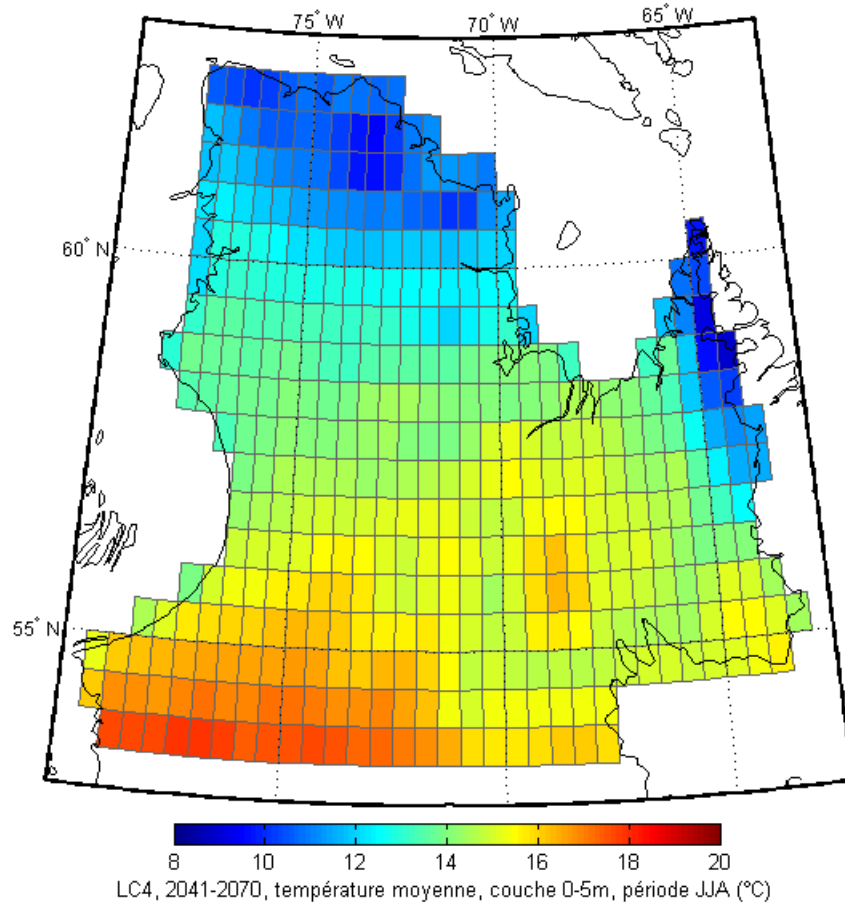


Figure 42. Lac-type LC4, période 2041-2070, température moyenne de la couche 0-5m en été (du 1^{er} juin au 31 août) (°C).

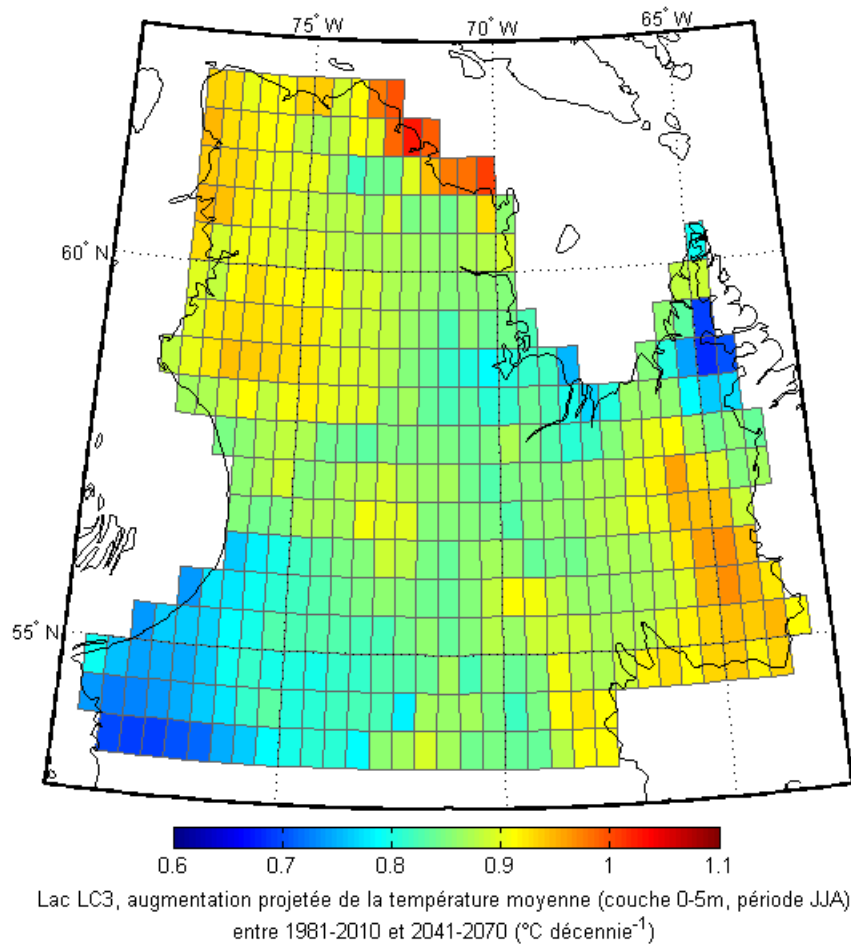


Figure 43. Lac-type LC3, augmentation projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m en été (du 1^{er} juin au 31 août) entre les périodes 1981-2010 et 2041-2070 ($^{\circ}\text{C}$ décennie $^{-1}$).

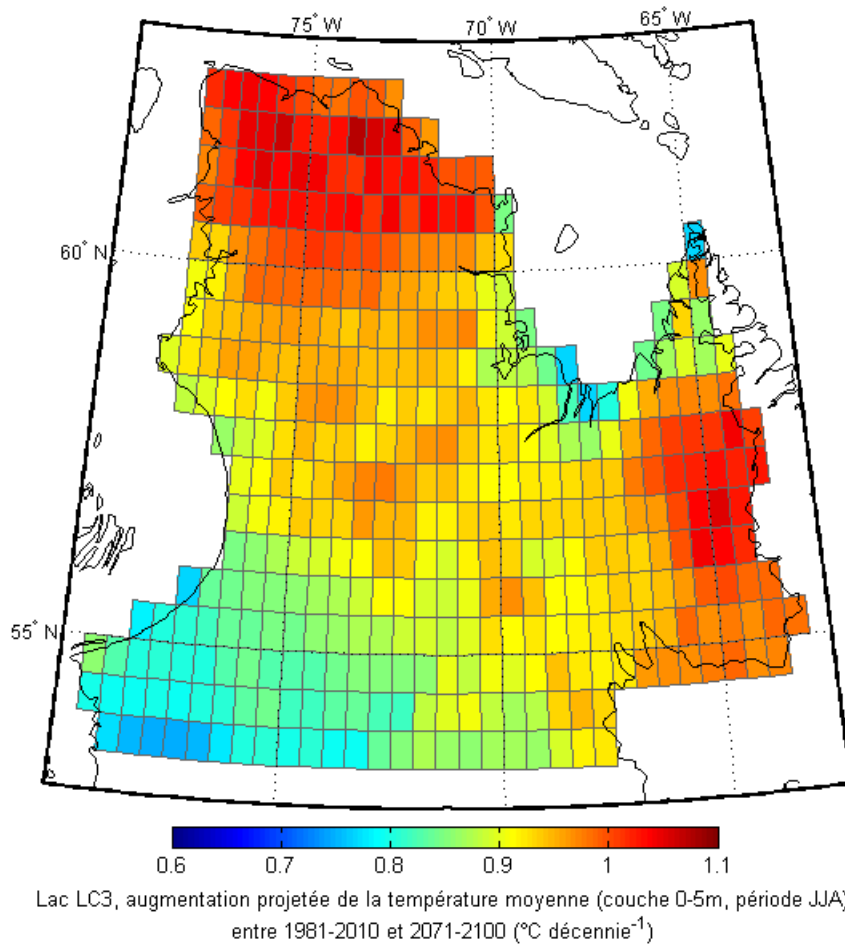


Figure 44. Lac-type LC3, augmentation projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m en été (du 1^{er} juin au 31 août) entre les périodes 2041-2070 et 2071-2100 ($^{\circ}\text{C}$ décennie $^{-1}$).

Tableau 10. Température moyenne de la couche 0-5 m pour la période du 1^{er} juin au 31 août : valeur moyenne, la plus basse et la plus élevée sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (°C).

Température moyenne de la couche 0-5 m pour la période du 1er juin au 31 août							
Période	Valeur moyenne sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	9,46	8,87	8,31	9,13	9,03	8,91	9,18
2041-2070	14,39	14,07	13,51	14,02	14,22	13,58	13,91
2071-2100	17,23	17,14	16,68	17,25	17,26	16,76	17,08
	Valeur la plus basse sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	5,04	4,36	3,95	4,35	4,47	4,11	4,11
2041-2070	9,34	8,74	8,16	8,89	8,89	8,69	8,97
2071-2100	12,08	12,23	12,06	12,18	12,23	11,70	11,70
	Valeur la plus élevée sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	13,68	13,14	12,42	13,84	13,39	13,48	13,86
2041-2070	17,55	17,30	16,68	17,95	17,53	17,50	17,86
2071-2100	19,92	19,78	19,18	20,39	19,98	19,94	20,27

Tableau 11. Évolution projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m du 1^{er} juin au 31 août : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs-types et trois intervalles (%).

Évolution projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m du 1er juin au 31 août (°C décennie⁻¹)							
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	0,821	0,866	0,866	0,815	0,866	0,779	0,790
De 1981-2010 à 2071-2100	0,863	0,918	0,930	0,902	0,915	0,872	0,878
De 2041-2070 à 2071-2100	0,948	1,023	1,058	1,076	1,012	1,059	1,055
	Plus petite augmentation sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	0,620	0,676	0,683	0,665	0,676	0,635	0,652
De 1981-2010 à 2071-2100	0,675	0,734	0,747	0,725	0,726	0,713	0,710
De 2041-2070 à 2071-2100	0,704	0,715	0,721	0,758	0,714	0,751	0,752
	Plus grande augmentation sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	0,990	1,040	1,034	1,070	1,044	1,015	1,027
De 1981-2010 à 2071-2100	1,009	1,057	1,072	1,068	1,055	1,051	1,063
De 2041-2070 à 2071-2100	1,357	1,428	1,450	1,413	1,425	1,361	1,372

Variations spatiales

La Figure 42 fournit un exemple de la variation spatiale de la température estivale moyenne de la couche 0-5 m (LC4, 2041-2070). Les températures moyennes les plus élevées sont au sud-ouest du domaine et les plus basses sont au nord et en terrain élevé le long de la frontière avec le Labrador. On remarque une petite région un peu plus chaude aux alentours de 56 °N 69 °O. Le contraste de température sur le domaine tend à diminuer quelque peu entre le passé 1981-2010 et le futur 2071-2100. Par exemple, l'écart-type diminue (pour LC4, de 1,99 à 1,94 à 1,58 °C; pour LC5, de 1,78 à 1,62 à 1,35 °C) et la valeur maximale sur le domaine s'approche de la valeur moyenne (pour LC4, la différence passe de 4,71 à 3,93 à 3,14 °C; pour LC5 de 4,36 à 3,31 à 2,72 °C). Les Figures 43 et 44 fournissent des exemples de la variation spatiale des augmentations projetées de température estivale moyenne de la couche 0-5 m (LC3, de 1981-2010 à 2041-2070 et de 2041-2070 à 2071-2100). Dans le premier cas, l'augmentation projetée varie entre 0,68 et 1,03 °C décennie⁻¹, les augmentations les plus petites étant au sud-ouest du domaine et les plus grandes étant tout au nord aux pixels contigus au Détroit d'Hudson. Des augmentations relativement marquées sont aussi projetées au nord-ouest et au sud-est du domaine. Dans le deuxième cas, l'augmentation projetée varie entre 0,72 et 1,45 °C décennie⁻¹, les augmentations les plus petites étant au sud-ouest du domaine et les plus marquées étant au nord du domaine au-delà de 60 °N et en altitude le long de la frontière avec le Labrador. De manière générale, les plus grandes augmentations sont prévues là où les températures estivales en passé de référence sont relativement basses.

Différences entre lacs-types

Pour un horizon donné, les moyennes sur le domaine diffèrent relativement peu (écart maximal de 1,15 °C) et il ne semble pas y avoir de lien déterminant entre la profondeur moyenne et la température estivale moyenne de la couche 0-5 m (Tableau 10). Pour les trois horizons, la plus petite température moyenne sur le domaine est obtenue pour LC3, un lac type de profondeur moyenne intermédiaire. C'est aussi le lac-type avec la plus grande augmentation projetée entre 1981-2010 et 2071-2100 (Tableau 11). La différence entre les lacs types tend à s'amenuiser au cours du 21^{ème} siècle : l'écart maximal entre deux moyennes sur le domaine passe de 1,15 (1981-2010) à 0,82 (2041-2070) à 0,58 °C (2071-2100) et l'écart type entre les sept moyennes sur le domaine passe de 0,33 à 0,30 à 0,22 °C. Le lien entre températures estivales moyennes et profondeur moyenne est davantage apparent pour l'augmentation de la moyenne entre 2041-2070 et 2071-2100. Les trois lacs types de faible profondeur moyenne (LC1, LC2 et LC5) ont les augmentations projetées les plus petites (Tableau 11). Ce pourrait être lié une température de surface plus élevée modérant le gain de chaleur.

9.1.3 Température maximale en surface

Grandeur des changements projetés

Nous avons cartographié la température maximale atteinte à 1,5 m et les augmentations projetées. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs types sont présentées aux Tableaux 12 et 13. Les résultats indiquent une augmentation de la température maximale à 1,5 m. La moyenne sur le domaine passe de $\sim 13,8$ °C pour la période de référence 1981-2010 à $\sim 19,6$ °C pour la période 2071-2100 (moyenne des sept lacs-types), correspondant à une augmentation de $\sim 0,65$ °C par décennie. Le taux de changement s'accélérerait au cours du siècle, l'augmentation moyenne projetée passant de $\sim 0,53$ °C par décennie pour la période allant de 1981-2010 à 2041-2070 à $\sim 0,89$ °C par décennie pour la période allant de 2041-2070 à 2071-2100. La température la plus élevée sur le domaine à l'horizon 2071-2100 est $\sim 23,0$ °C.

Variations spatiales

La Figure 45 présente un exemple de variations spatiales de la température maximale à 1,5 m. En général les cartes se ressemblent : plus grands maximums au sud-ouest du domaine, maximums relativement élevés autour de 56 °N 69 °O, plus petits maximums au nord du domaine et à l'est dans la région des Monts Torngat, et maximums un peu plus petits le long de la Baie d'Hudson qu'au centre du domaine. Les augmentations projetées entre 1981-2010 et 2041-2070 sont généralement plus marquées là où les maximums de 1981-2010 sont bas (au nord du domaine et à l'est dans la région des Monts Torngat) (Figure 46). Les augmentations les plus grandes entre 2041-2070 et 2071-2100 sont le plus souvent dans une région centrale aux environs de 60 °N (Figure 47). Les augmentations pour cette période sont aussi relativement grandes dans le coin sud-est du domaine.

Décalages sur le cycle annuel

Nous avons cartographié l'occurrence de la température maximale à 1,5 m et les changements projetés. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs types sont présentées aux Tableaux 14 et 15. Les moyennes sur le domaine indiquent une température maximale survenant quelques jours plus tôt dans le futur (de 1,9 à 4,9 jours entre 1981-2010 et 2071-2100). Cependant les résultats sont très contrastés sur le domaine (de grands retards sur une partie du domaine et de grandes avances sur une autre partie), ce qui rend la moyenne moins pertinente. Des retards modérés sur une grande partie du domaine combinés à de grandes avances sur une plus petite partie peut résulter en une avance moyenne pouvant atteindre jusqu'à 7,9 jours (Figure 48 et Tableau 14). Les très grandes avances sont généralement concentrées dans la région nord-ouest. Comme pour le maximum de contenu en chaleur, une diminution des deltas dans cette région pour la température de l'air entre juin et juillet pourrait être responsable de ces grandes avances (e.g. Figures 38 et 39). Les maximums les plus hâtifs sur le domaine sont aussi centrés sur cette région et, pour les horizons 2041-2070 et 2071-2100, surviennent toujours à la fin de juin (27 ou 28 juin; on notera que l'occurrence du maximum est déterminée à partir d'une

série lissée). Il n'y a pas de région de grandes avances dans les cartes du passé de référence (pas de deltas ajoutés).

La température maximale à 1,5 m survient plus tard dans le futur sur une grande partie du domaine (Figure 48). La température maximale de l'eau étant limitée par la température de l'air, une température de l'air plus élevée en fin juillet et début août permet d'atteindre une température de surface plus élevée et étire la période de réchauffement. Les plus grands retards sur le domaine ne sont pas affectés par les deltas. Ils varient entre 10 et 15 jours pour la période de 1981-2010 à 2071-2100 (Tableau 14). Les plus grands retards pour la période de 2041-2070 à 2071-2100 sont particulièrement grands (~40 jours); ils pourraient être associés à des cas où le maximum survient plus tôt à l'horizon 2041-2070 puis plus tard à l'horizon 2071-2100 (Figures 37, 38 et 39).

Différences entre lacs-types

Pour 1981-2010, il y a peu de différence entre les moyennes de température maximale à 1,5 m sur le domaine (de 13,3 à 14,1 °C; écart-type de 0,25 °C) et peu de différence d'occurrence (de ~15h le 29 juillet à ~16h le 1^{er} août; écart type de 0,94 jours) (Tableaux 14 et 16). La plus grande température maximale moyenne et l'occurrence moyenne la plus tardive est pour LC3, un lac type de profondeur moyenne intermédiaire. Le lac-type LC6 présente la température maximale moyenne la plus basse parmi les trois lacs-types de grande profondeur moyenne. C'est pour ce lac-type que la diminution de l'aire avec la profondeur dans les premiers mètres est la plus est la moins prononcée (pentes calculées par régression linéaire sur les cinq premiers mètres), ce qui peut expliquer ce résultat.

Les cartes d'occurrence pour 1981-2010 montrent toutes une région plus ou moins grande à l'ouest de la Baie d'Ungava où le maximum survient quelques jours plus tard; ce phénomène est relativement plus marqué pour LC3, d'où l'occurrence moyenne la plus tardive pour cette période.

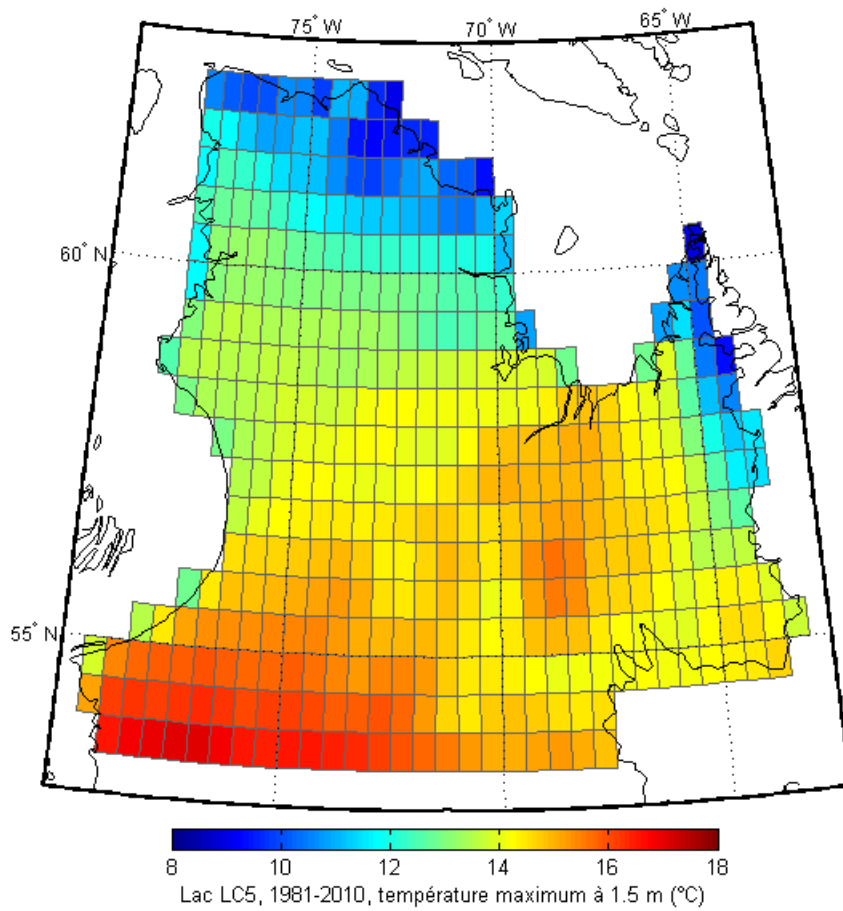


Figure 45. Lac-type LC5, période 1981-2010, température maximale à 1,5 m (°C).

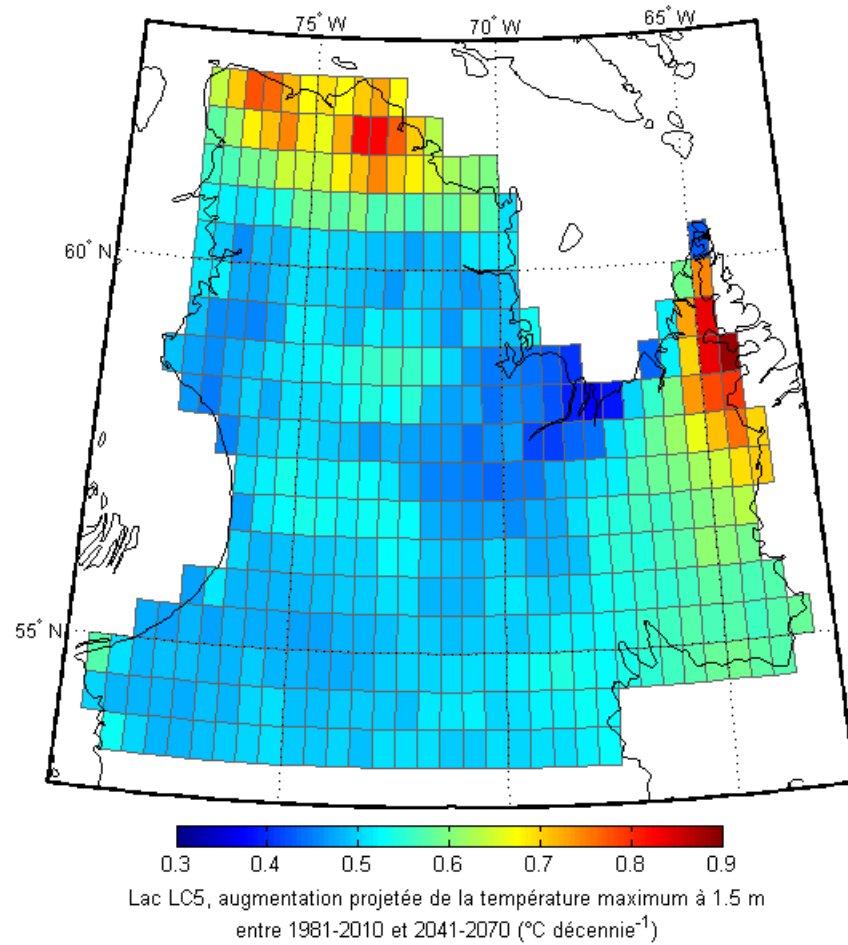


Figure 46. Lac-type LC5, augmentation projetée de la température maximale à 1,5 m entre les périodes 1981-2010 et 2041-2070 (°C par décennie).

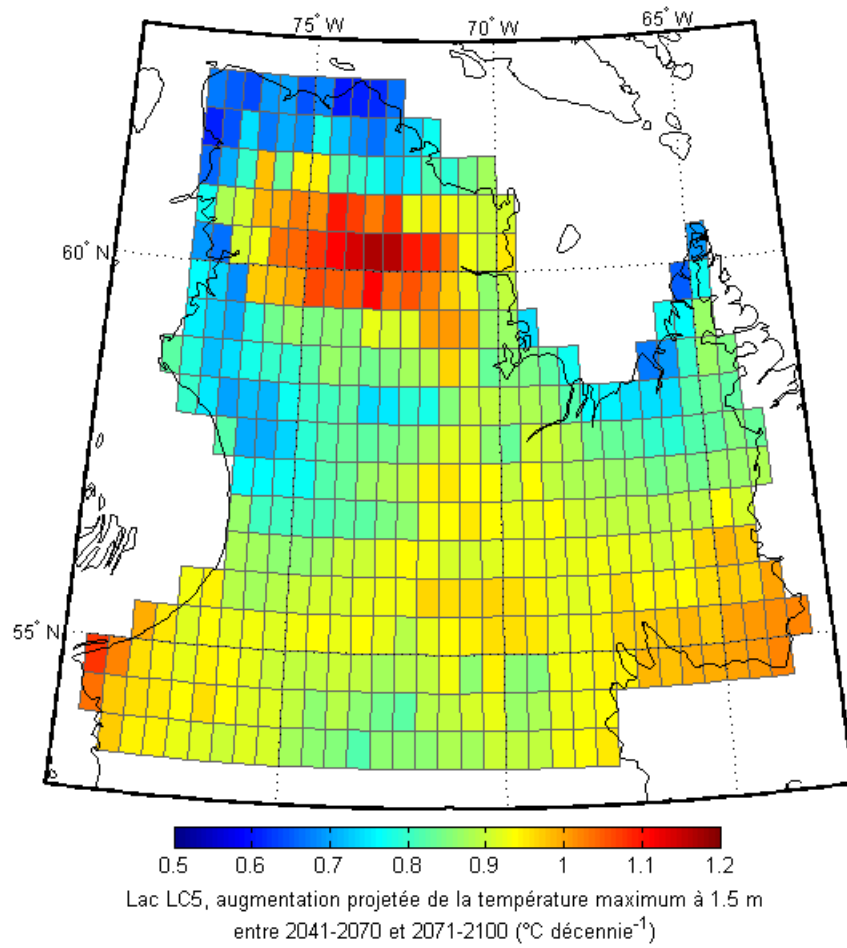


Figure 47. Lac-type LC5, augmentation projetée de la température maximale à 1,5 m entre les périodes 2041-2070 et 2071-2100 (°C par décennie).

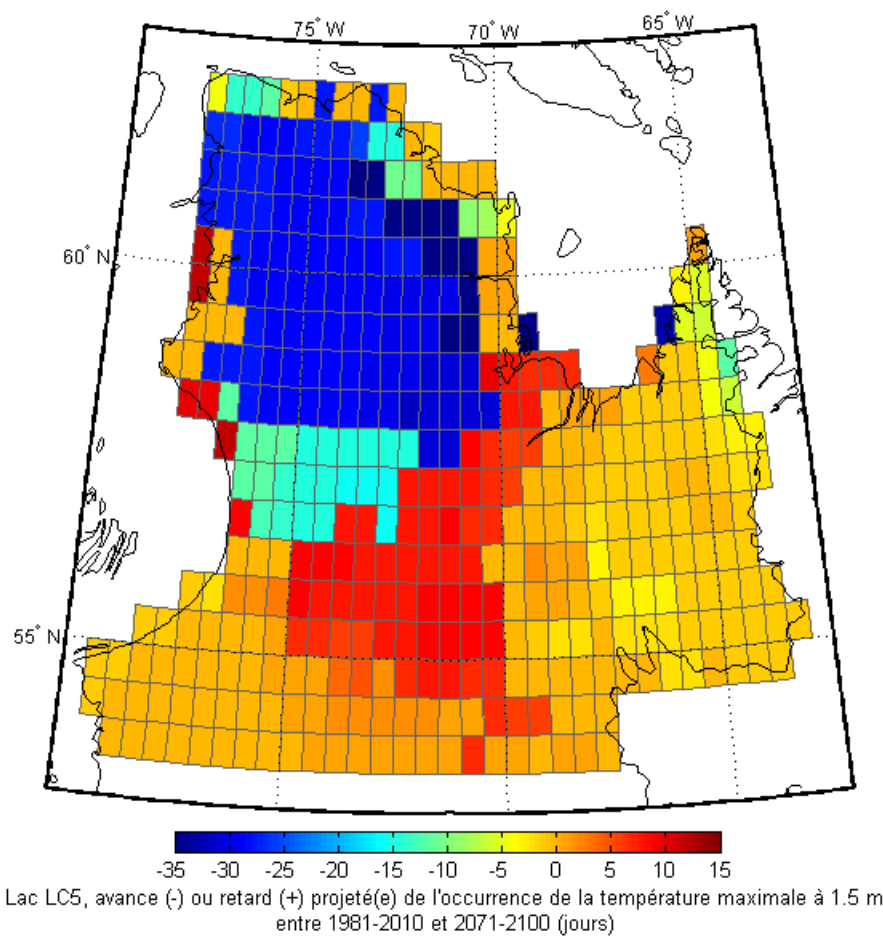


Figure 48. Lac-type LC5, décalage projeté pour la température maximale à 1,5 m entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).

Tableau 12. Température maximale à 1,5 m : maximum moyen, plus bas et plus haut maximum sur le domaine pour les sept lacs-types et trois périodes de simulation (°C).

Température maximale à 1,5 m							
Période	Maximum moyen sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	13,85	13,67	13,28	14,10	13,72	13,71	14,02
2041-2070	16,91	16,91	16,68	17,17	16,92	16,82	17,07
2071-2100	19,49	19,56	19,35	19,86	19,57	19,52	19,76
	Plus bas maximum sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	9,03	8,92	8,47	8,09	8,95	7,55	7,36
2041-2070	11,32	11,51	11,51	11,53	11,50	11,20	11,04
2071-2100	13,38	13,59	13,59	13,64	13,53	13,34	13,31
	Plus haut maximum sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	17,07	17,05	16,76	17,90	17,11	17,56	17,84
2041-2070	19,91	19,99	19,77	20,75	20,02	20,44	20,69
2071-2100	22,63	22,74	22,49	23,68	22,76	23,31	23,60

Tableau 13. Évolution projetée de la température maximale à 1,5 m : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs-types et trois intervalles (°C par décennie).

Évolution projetée de la température maximale à 1,5 m							
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	0,509	0,539	0,566	0,511	0,533	0,517	0,508
De 1981-2010 à 2071-2100	0,626	0,654	0,674	0,640	0,649	0,645	0,637
De 2041-2070 à 2071-2100	0,860	0,884	0,889	0,899	0,881	0,900	0,895
	Plus petite augmentation sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	0,355	0,379	0,403	0,352	0,372	0,368	0,351
De 1981-2010 à 2071-2100	0,483	0,506	0,521	0,502	0,501	0,510	0,500
De 2041-2070 à 2071-2100	0,577	0,597	0,599	0,582	0,601	0,579	0,559
	Plus grande augmentation sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	0,825	0,897	0,919	0,821	0,891	0,846	0,875
De 1981-2010 à 2071-2100	0,818	0,884	0,912	0,803	0,876	0,839	0,824
De 2041-2070 à 2071-2100	1,144	1,177	1,096	1,156	1,171	1,155	1,158

Tableau 14. Occurrence de la température maximale à 1,5 m : occurrence moyenne, la plus hâtive et la plus tardive sur le domaine 1981-2010 pour les sept lacs-types et trois périodes de simulation (jour de l'année).

Occurrence de la température maximale à 1,5 m							
Période	Occurrence moyenne sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	14h51 29 juillet	21h09 30 juillet	16h09 01 août	00h31 30 juillet	16h33 30 juillet	21h23 30 juillet	22h45 29 juillet
2041-2070	18h46 21 juillet	19h00 25 juillet	02h16 29 juillet	06h32 26 juillet	21h44 24 juillet	07h44 29 juillet	05h14 26 juillet
2071-2100	17h17 21 juillet	20h32 23 juillet	22h14 26 juillet	13h42 25 juillet	06h29 23 juillet	00h55 29 juillet	18h32 25 juillet
	Occurrence la plus hâtive sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	16 juillet	27 juillet	27 juillet	16 juillet	27 juillet	27 juillet	17 juillet
2041-2070	27 juin	28 juin	28 juin	27 juin	28 juin	28 juin	27 juin
2071-2100	27 juin	28 juin	28 juin	27 juin	27 juin	28 juin	27 juin
	Occurrence la plus tardive sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	05 août	11 août	14 août	12 août	11 août	23 août	11 août
2041-2070	08 août	16 août	16 août	11 août	16 août	15 août	11 août
2071-2100	09 août	09 août	09 août	11 août	09 août	11 août	11 août

Tableau 15. Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale à 1,5 m : changement moyen, plus grande avance et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs-types et trois intervalles (jours).

Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale à 1,5 m							
Période	Changement moyen sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	-7,84	-5,09	-3,58	-3,75	-5,78	-1,57	-3,73
De 1981-2010 à 2071-2100	-7,90	-7,02	-5,75	-4,45	-7,42	-1,85	-4,18
De 2041-2070 à 2071-2100	-0,06	-1,94	-2,17	-0,70	-1,63	-0,28	-0,45
	Plus grande avance sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	-34	-38	-40	-35	-38	-35	-35
De 1981-2010 à 2071-2100	-36	-43	-42	-39	-43	-39	-44
De 2041-2070 à 2071-2100	-38	-40	-41	-40	-41	-40	-40
	Plus grand retard sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	7	14	14	11	14	14	11
De 1981-2010 à 2071-2100	12	12	10	12	12	15	12
De 2041-2070 à 2071-2100	41	40	42	41	40	39	40
Une valeur positive (négative) correspond à un retard (une avance) dans le futur.							

9.1.4 Température maximale en profondeur

Grandeur des changements projetés

Nous avons cartographié la température maximale en profondeur ainsi que les changements projetés. La profondeur considérée est 8,5 ou 9,5 m pour les lacs-types de faible profondeur moyenne et 20,5 m pour les lacs-types de grande profondeur moyenne. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs-types sont présentées aux Tableaux 16 et 17. Les résultats indiquent une augmentation de la température maximale atteinte en profondeur. Pour les lacs-types relativement peu profonds (LC1, LC2, LC3 et LC5), la température maximale moyenne à 8,5/9,5 m passerait de ~10,0 °C pour la période de référence 1981-2010 à ~15,9 °C pour la période 2071-2100 (moyenne des sept lacs-types), correspondant à une augmentation de ~0,65 °C par décennie. Ce taux d'augmentation est pratiquement identique à celui projeté pour la température maximale à 1,5 m. Pour les lacs types profonds (LC4, LC6 et LC7), la température maximale moyenne à 20,5 m passerait de ~5,8 °C pour la période de référence 1981-2010 à ~8,5 °C pour la période 2071-2100 (moyenne des sept lacs-types), correspondant à une augmentation de ~0,30 °C par décennie. Les augmentations projetées indiquent une accélération du taux de changement au cours du 21^{ème} siècle. Cette accélération est particulièrement marquée pour les lacs profonds, le taux de changement de la température maximale à 20,5 m passant de 0,21 °C par décennie pour la période allant de 1981-2010 à 2041-2070 à 0,47 °C par décennie pour la période allant de 2041-2070 à 2071-2100, soit un changement 2,2 fois plus rapide.

Variations spatiales

La Figure 49 présente un exemple de variations spatiales de la température maximale à 9,5 m. Les cartes des lacs-types relativement peu profonds se ressemblent : plus grands maximums au nord-ouest du domaine entre environ 58 et 60 °N et le long de la Baie d'Hudson et plus petits maximums au nord-est du domaine dans la région des Monts Torngat. Les grands maximums de la région nord-ouest peuvent être associés à la région de forts vents mentionnée plus tôt (section 4.1), le mélange étant responsable de l'exportation de chaleur de la surface vers le fond. La Figure 50 présente un exemple de variations spatiales de la température maximale à 20,5 m à l'horizon 2071-2100. Les cartes des lacs-types de grande profondeur moyenne se ressemblent. Elles montrent toutes une coupure nette en diagonale au nord de laquelle les températures en profondeur sont plus élevées. Cette caractéristique peut être également être associée à la région de forts vents mentionnée plus tôt (section 4.1). On notera que les températures maximales relativement élevées atteignent la limite nord du domaine.

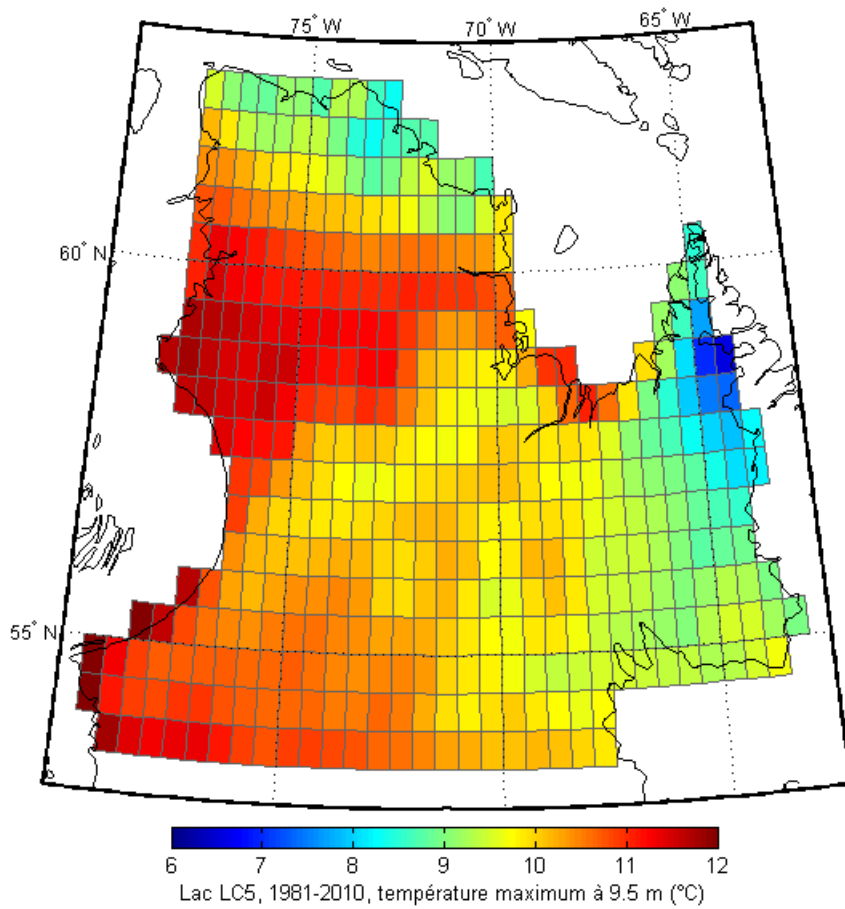


Figure 49. Lac-type LC5, période 1981-2010, température maximale à 9,5 m (°C).

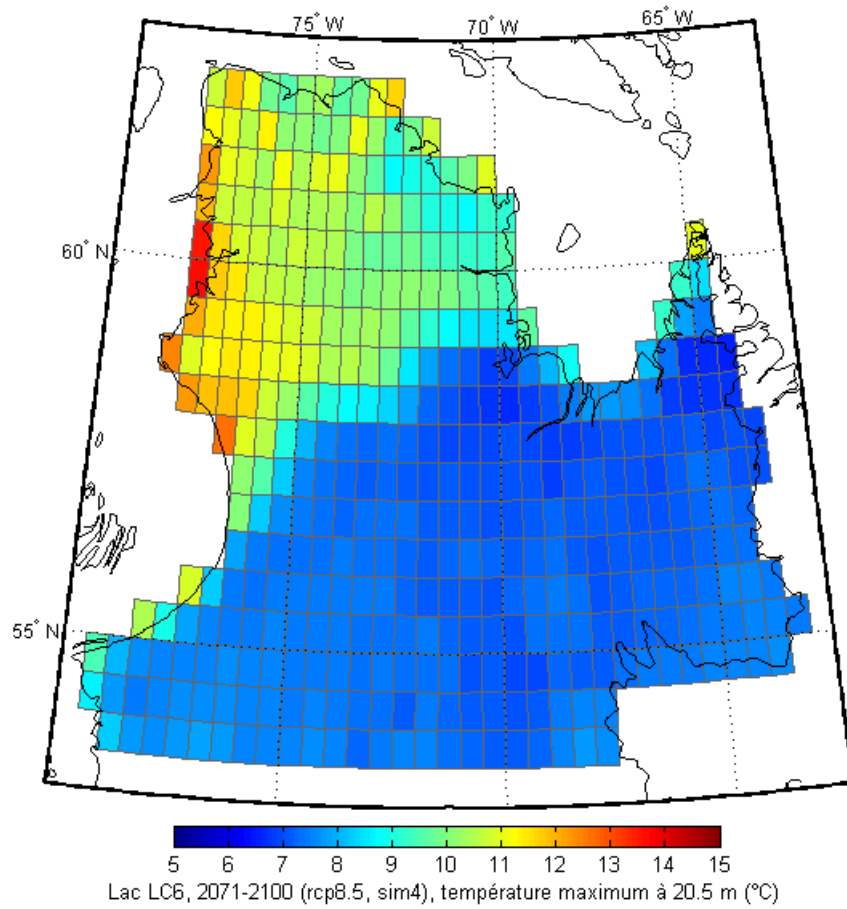


Figure 50. Lac-type LC6, période2071-2100, température maximale à 20,5 m (°C).

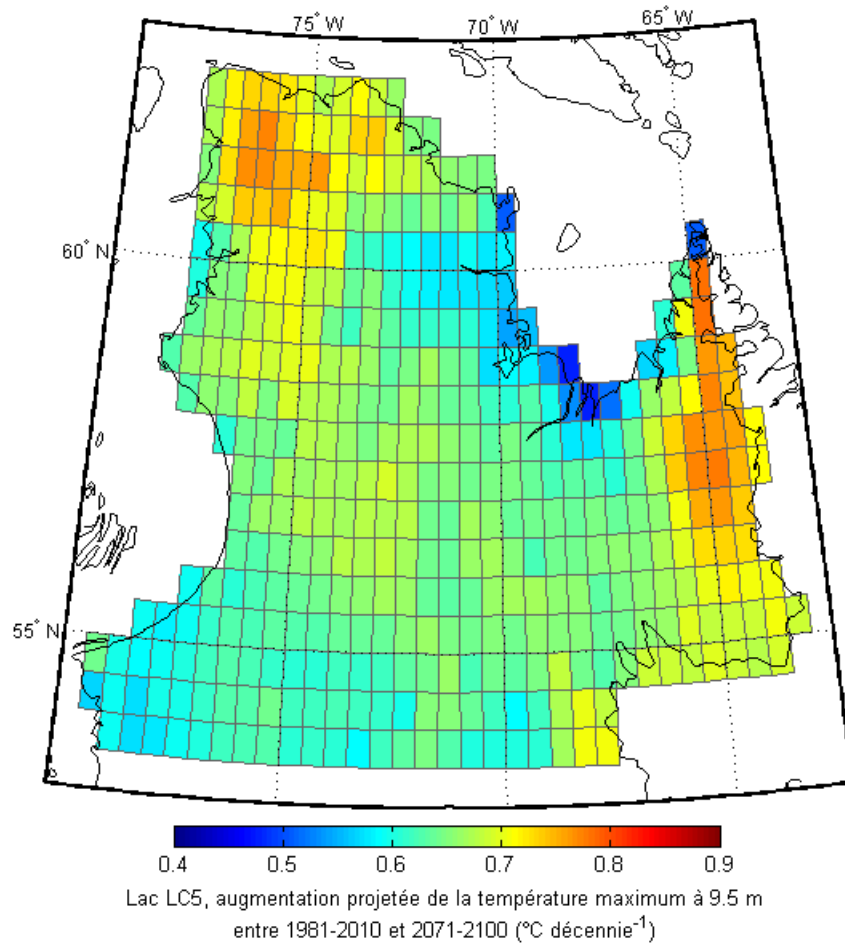


Figure 51. Lac-type LC5, augmentation projetée de la température maximale à 9,5 m entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 (°C par décennie).

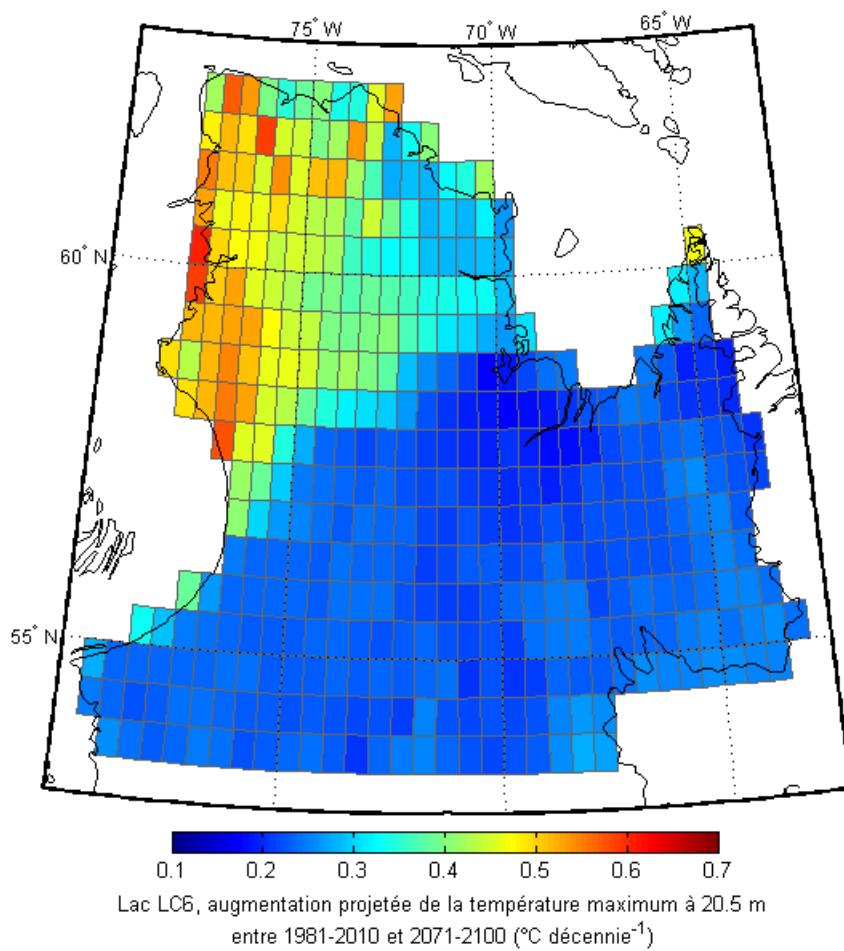


Figure 52. Lac-type LC6, augmentation projetée de la température maximale à 20,5 m entre les périodes 1981-2010 et 2071-2100 (°C par décennie).

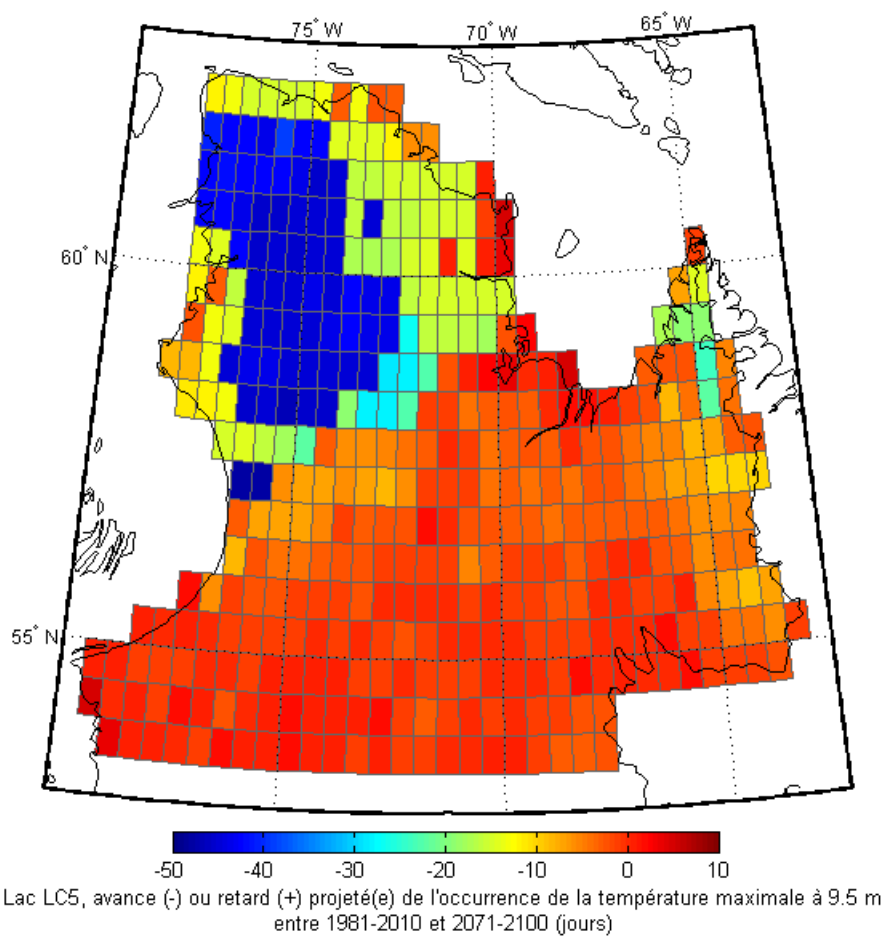


Figure 53. Lac-type LC5, décalage projeté pour la température maximale à 9,5 m entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).

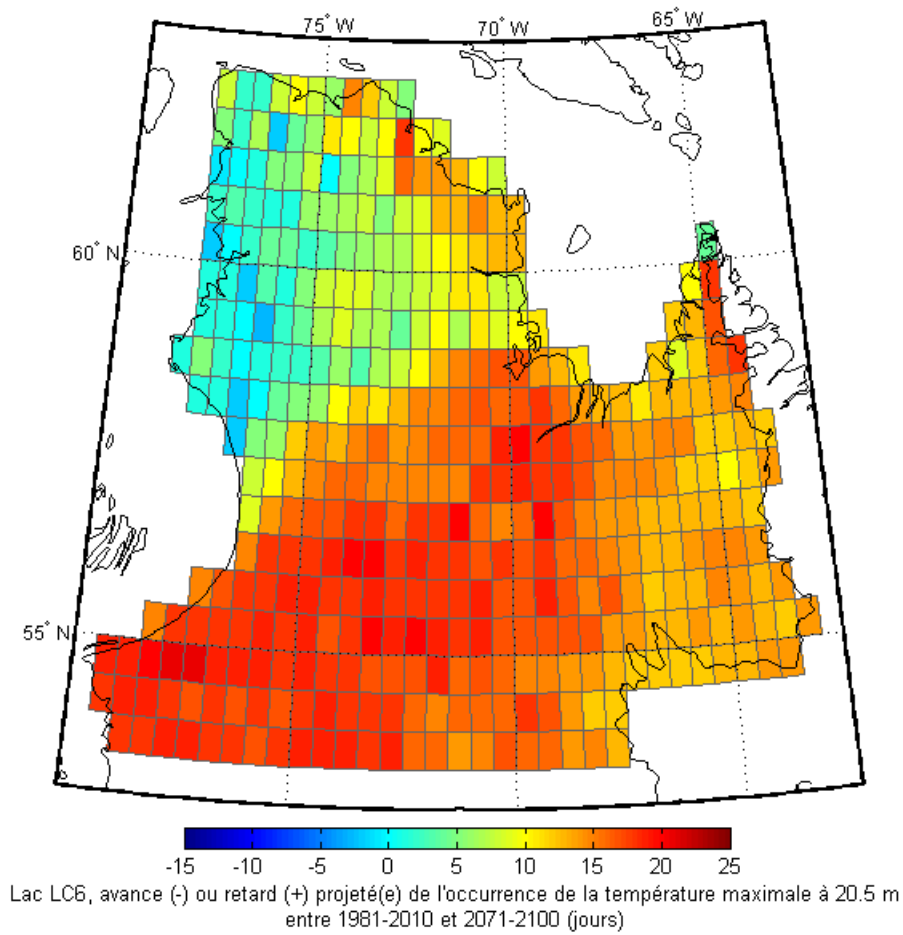


Figure 54. Lac-type LC6, décalage projeté pour la température maximale à 20,5 m entre 1981-2010 et 2071-2100 (jours).

Tableau 16. Température maximale en profondeur : maximum moyen, plus bas et plus haut maximum sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (°C).

Température maximale en profondeur							
Période	Maximum moyen sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
	à 9,5 m	à 8,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 20,5 m
1981-2010	10,26	10,24	9,55	6,23	10,06	5,74	5,46
2041-2070	13,58	13,66	12,82	7,72	13,41	6,99	6,53
2071-2100	16,10	16,18	15,30	9,33	15,93	8,37	7,75
	Plus bas maximum sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
	à 9,5 m	à 8,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 20,5 m
1981-2010	6,97	6,53	6,16	5,01	6,54	4,77	4,62
2041-2070	10,32	10,20	9,38	5,87	9,98	5,42	5,20
2071-2100	12,77	12,99	12,35	6,98	13,01	6,51	6,01
	Plus haut maximum sur le domaine (°C)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
	à 9,5 m	à 8,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 20,5 m
1981-2010	12,37	12,26	11,91	9,40	12,29	8,36	7,89
2041-2070	15,28	15,38	15,10	12,38	15,43	10,84	10,32
2071-2100	17,94	18,06	17,57	15,36	18,08	13,69	13,08

Tableau 17. Évolution projetée de la température maximale en profondeur : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (°C par décennie).

Évolution projetée de la température maximale en profondeur							
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1 à 9,5 m	LC2 à 8,5 m	LC3 à 9,5 m	LC4 à 20,5 m	LC5 à 9,5 m	LC6 à 20,5 m	LC7 à 20,5 m
De 1981-2010 à 2041-2070	0,552	0,569	0,546	0,249	0,559	0,209	0,179
De 1981-2010 à 2071-2100	0,648	0,660	0,640	0,345	0,652	0,293	0,255
De 2041-2070 à 2071-2100	0,840	0,841	0,827	0,539	0,839	0,460	0,407
	Plus petite augmentation sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1 à 9,5 m	LC2 à 8,5 m	LC3 à 9,5 m	LC4 à 20,5 m	LC5 à 9,5 m	LC6 à 20,5 m	LC7 à 20,5 m
De 1981-2010 à 2041-2070	0,379	0,388	0,400	0,121	0,373	0,105	0,081
De 1981-2010 à 2071-2100	0,462	0,486	0,460	0,202	0,474	0,170	0,140
De 2041-2070 à 2071-2100	0,580	0,603	0,527	0,143	0,536	0,242	0,209
	Plus grande augmentation sur le domaine (°C décennie⁻¹)						
	LC1 à 9,5 m	LC2 à 8,5 m	LC3 à 9,5 m	LC4 à 20,5 m	LC5 à 9,5 m	LC6 à 20,5 m	LC7 à 20,5 m
De 1981-2010 à 2041-2070	0,721	0,772	0,788	0,563	0,779	0,492	0,491
De 1981-2010 à 2071-2100	0,828	0,779	0,796	0,760	0,786	0,611	0,587
De 2041-2070 à 2071-2100	1,297	1,097	1,071	1,414	1,194	1,064	1,007

Tableau 18. Occurrence de la température maximale en profondeur : occurrence moyenne, la plus hâtive et la plus tardive sur le domaine 1981-2010 pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (jour de l'année).

Occurrence de la température maximale en profondeur							
Période	Occurrence moyenne sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
	à 9,5 m	à 8,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 20,5 m
1981-2010	13h56 19 août	06h12 23 août	01h22 30 août	21h57 22 sept.	21h09 24 août	04h33 30 sept.	15h15 27 sept.
2041-2070	06h05 14 août	01h14 16 août	03h55 24 août	07h34 30 sept.	17h41 17 août	23h22 09 oct.	09h26 07 oct.
2071-2100	08h45 09 août	06h46 13 août	14h37 23 août	23h19 01 oct.	12h31 14 août	21h47 12 oct.	04h16 11 oct.
	Occurrence la plus hâtive sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
	à 9,5 m	à 8,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 20,5 m
1981-2010	30 juillet	01 août	09 août	19 août	01 août	01 septembre	27 août
2041-2070	02 juillet	19 juillet	30 juillet	16 août	19 juillet	25 août	25 août
2071-2100	28 juin	29 juin	19 juillet	01 août	29 juin	06 septembre	03 septembre
	Occurrence la plus tardive sur le domaine (jour de l'année)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
	à 9,5 m	à 8,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 9,5 m	à 20,5 m	à 20,5 m
1981-2010	03 septembre	05 septembre	09 septembre	12 octobre	06 septembre	17 octobre	15 octobre
2041-2070	01 septembre	01 septembre	11 septembre	24 octobre	07 septembre	31 octobre	30 octobre
2071-2100	02 septembre	02 septembre	11 septembre	29 octobre	06 septembre	05 novembre	05 novembre

Tableau 19. Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale en profondeur : changement moyen, plus grande avance et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours).

Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale en profondeur							
Période	Changement moyen sur le domaine (jours)						
	LC1 à 9,5 m	LC2 à 8,5 m	LC3 à 9,5 m	LC4 à 20,5 m	LC5 à 9,5 m	LC6 à 20,5 m	LC7 à 20,5 m
De 1981-2010 à 2041-2070	-5,33	-7,25	-5,89	7,40	-7,14	9,78	9,76
De 1981-2010 à 2071-2100	-10,22	-9,98	-6,45	9,06	-10,36	12,72	13,54
De 2041-2070 à 2071-2100	-4,89	-2,73	-0,55	1,66	-3,22	2,93	3,78
	Plus grande avance sur le domaine (jours)						
	LC1 à 9,5 m	LC2 à 8,5 m	LC3 à 9,5 m	LC4 à 20,5 m	LC5 à 9,5 m	LC6 à 20,5 m	LC7 à 20,5 m
De 1981-2010 à 2041-2070	-42	-29	-21	-8	-29	-8	-2
De 1981-2010 à 2071-2100	-49	-48	-30	-34	-48	-3	-2
De 2041-2070 à 2071-2100	-33	-32	-20	-35	-32	-7	-6
	Plus grand retard sur le domaine (jours)						
	LC1 à 9,5 m	LC2 à 8,5 m	LC3 à 9,5 m	LC4 à 20,5 m	LC5 à 9,5 m	LC6 à 20,5 m	LC7 à 20,5 m
De 1981-2010 à 2041-2070	8	4	4	20	4	16	17
De 1981-2010 à 2071-2100	14	5	7	21	5	21	22
De 2041-2070 à 2071-2100	19	20	25	12	17	12	11

Décalages sur le cycle annuel

Nous avons cartographié l'occurrence de la température maximale en profondeur et les changements projetés. Des statistiques sur le domaine pour les sept lacs types sont présentés aux Tableaux 17 et 18. La profondeur considérée n'est pas la même pour les lacs types de faible et de grande profondeur moyenne, soit 9,5 m et 20,5 m. Les moyennes sur le domaine indiquent une avance de la température maximale à 9,5 m (LC1, LC2, LC3 et LC5) et un retard de la température maximale à 20,5 m (LC4, LC6 et LC7). Cependant les résultats sont très contrastés sur le domaine, particulièrement ceux pour 9,5 m, ce qui rend la moyenne moins pertinente. La Figure 53 présente un exemple de décalages projetés pour un lac-type de faible profondeur moyenne (LC5, de 1981-2010 à 2071-2100). On y voit le même type de coupure en diagonal que pour les températures maximales. Le décalage est petit sur la majeure partie du domaine et le maximum est fortement devancé dans la région nord-ouest. Normalement, la température maximale en profondeur est atteinte en période de perte de chaleur lorsque la colonne d'eau s'homogénéise graduellement, l'eau refroidie plus dense coulant et se mélangeant aux eaux sous-jacentes. Pour LC5, le maximum à l'horizon 2071-2100 dans la région nord-ouest survient à la fin juin (Tableau 18), trop tôt pour être associé à la perte de chaleur. Dans le cas d'un lac relativement peu profond et très mélangé, on conçoit que les températures élevées en profondeur puissent survenir plus tôt, mais il est inattendu qu'elles cesseraient d'augmenter si tôt. On peut penser qu'ici aussi la diminution des deltas de température de l'air entre juin et juillet a pu jouer un rôle.

La Figure 54 présente un exemple de décalages projetés de la température maximale à 20,5 m pour un lac-type de grande profondeur moyenne (LC6, de 1981-2010 à 2071-2100). Le même type de coupure en diagonal sépare la partie sud de la partie nord, mais cette fois avec des retards d'environ 10 à 15 jours dans la partie sud et de plus petits retards ou de faibles avances dans la partie nord. L'occurrence la plus hâtive à l'horizon 2071-2100 est le 6 septembre (Tableau 18), donc en période de perte de chaleur. Les retards dans la partie sud peuvent être expliqués par un refroidissement débutant plus tard dans le futur. La zone nord de décalage projeté correspond exactement à la zone nord du contenu en chaleur maximal à l'horizon 2071-2100 (Figure 36), ce qui semble indiquer qu'il y aurait un lien entre les plus petits retards, voire les faibles avances, de température maximale en profondeur et le contenu en chaleur plus grand dans cette région. Refroidir un volume d'eau plus chaud exporterait plus rapidement de la chaleur en profondeur, possiblement via une plus grande différence entre la température de surface et la température de l'air.

Différences entre lacs types

Pour les lacs types de grande profondeur moyenne, la moyenne sur le domaine de la température maximale à 20,5 m diminue avec une augmentation de la profondeur moyenne (soit, par ordre croissant de profondeur et décroissant de température, LC4, LC6 et LC7), et ce pour les trois horizons considérés (Tableau 16). On peut expliquer ces résultats par la différence de dilution de la chaleur entre lacs de profondeur moyenne différente. La part du volume près de la surface où l'eau est relativement chaude est plus grande pour un lac de moindre profondeur moyenne. Supposant une même température de surface (disons la couche 1) au début de la perte de chaleur, la température des couches mélangées 1 et 2 est plus élevée pour le lac de moindre profondeur moyenne du fait du plus

grand volume de la couche 1, puis la température des couches mélangées 1, 2 et 3 est plus élevée du fait de la température plus élevée des couches combinées 1 et 2 (et peut-être aussi du volume plus grand des couches 1 et 2), et ainsi de suite jusqu'en profondeur.

Des trois lacs-types de grande profondeur moyenne, c'est aussi pour LC4 que le maximum de température à 20,5 m survient le plus tôt (Tableau 18). Ce pourrait être parce que sa température de surface est plus élevée et que la perte de chaleur débute plus tôt.

9.2 Indicateurs biologiques

Tous les indicateurs biologiques basés sur la thermie que nous proposons sont discutés ici. Les positions des cinq pixels utilisés pour les sections nord-sud sont présentées à la Figure 12.

9.2.1 Fraie

Les Figures 55 et 56 présentent les variations temporelles de la fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie du touladi pour deux lacstypes, soit LC4 pour illustrer les lacs de grande profondeur moyenne, et LC5 pour illustrer les lacs de faible profondeur moyenne. Les séries sont présentées pour cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et trois horizons. La partie du fond ayant une profondeur au-dessus de 2,5 m n'est pas considérée car il est peu probable que les poissons fraient à ces faibles profondeurs. Le jour du déclenchement de la fraie estimé via la température de surface est également indiqué.

Pour le lac-type LC4, la fraction de l'aire sous 2,5 m avec température au fond favorable à la fraie pour le touladi ($6 \leq T \leq 14$ °C) augmente à l'automne dans tous les cas mais n'atteint pas toujours 100 %. De manière générale, la fraction maximale et/ou la durée de la période de 100 % augmente du sud au nord. Ce pourrait être lié à une différence de taux de perte de chaleur, supposant qu'une perte de chaleur plus rapide mène à une augmentation de température en profondeur plus prononcée. Ce pourrait également être lié à une différence d'intensité de mélange. La disponibilité des fonds avec température favorable à la fraie augmente entre le passé de référence 1981-2010 et l'horizon 2071-2100 (parce qu'un supplément de chaleur accumulée dans la partie supérieure de la colonne d'eau mène à plus de fond avec $T \geq 6$ °C) alors que la fin de la période de disponibilité maximale est retardée (parce que l'homogénéisation de la colonne d'eau à 4 °C survient plus tard, plus de chaleur devant être évacuée et possiblement plus lentement si la température de l'air en automne est plus élevée). À l'horizon 2071-2100, la fraction de l'aire sous 2,5 m avec température au fond favorable à la fraie atteint 100 % aux cinq latitudes considérées, la durée de la période de 100 % allant de 11 jours au sud à 44 jours au nord.

Pour le lac-type LC5, il existe toujours à l'automne une période où 100 % de l'aire sous 2,5 m a une température au fond favorable à la fraie pour le touladi. Cette période survient de plus en plus tard dans le futur alors que sa durée tend à diminuer. La diminution de la durée peut varier avec la latitude : entre les horizons 2041-2070 et 2071-2100, la diminution est nulle au sud et augmente jusqu'à 12 jours au nord. La durée de la période où 100 % de l'aire sous 2,5 m a une température au fond favorable à la fraie demeure substantielle à l'horizon 2071-2100, soit entre 40 et 44 jours pour les cinq latitudes considérées.

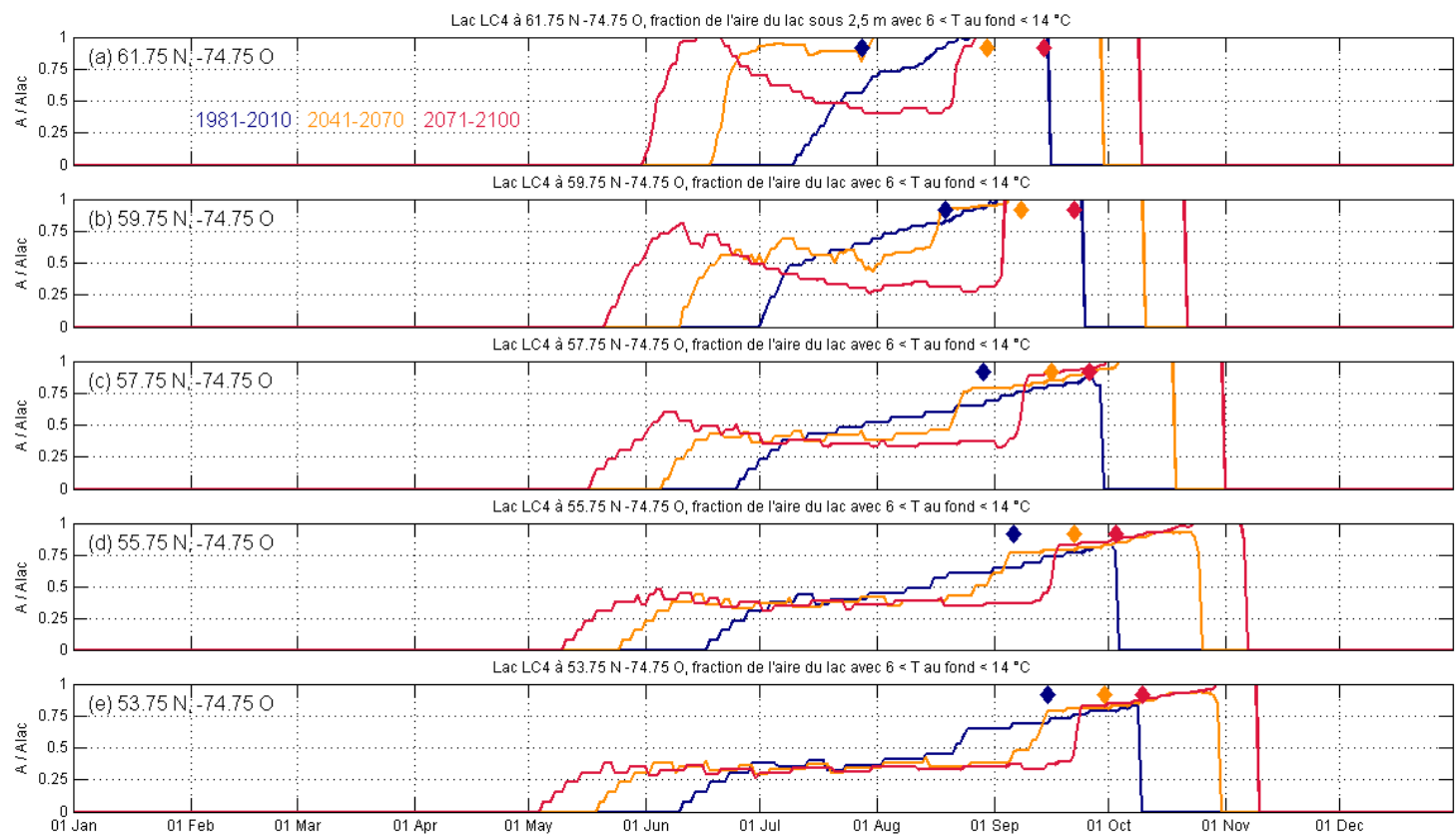


Figure 55. Lac-type LC4, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour le touladi ($6 \leq T \leq 14$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 11$ °C).

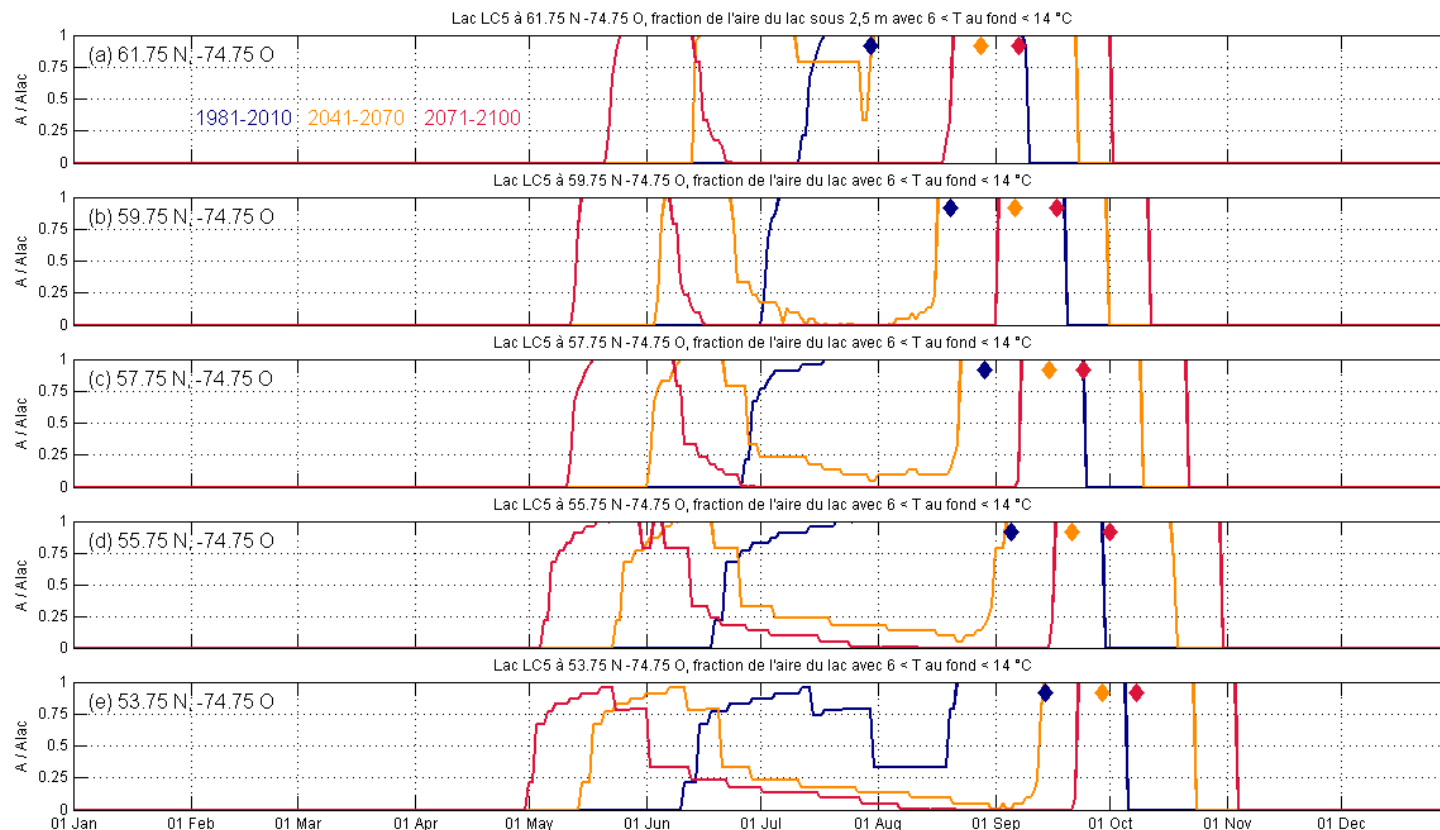


Figure 56. Lac-type LC5, fraction de l'aire sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour le touladi ($6 \leq T \leq 14$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 11$ °C).

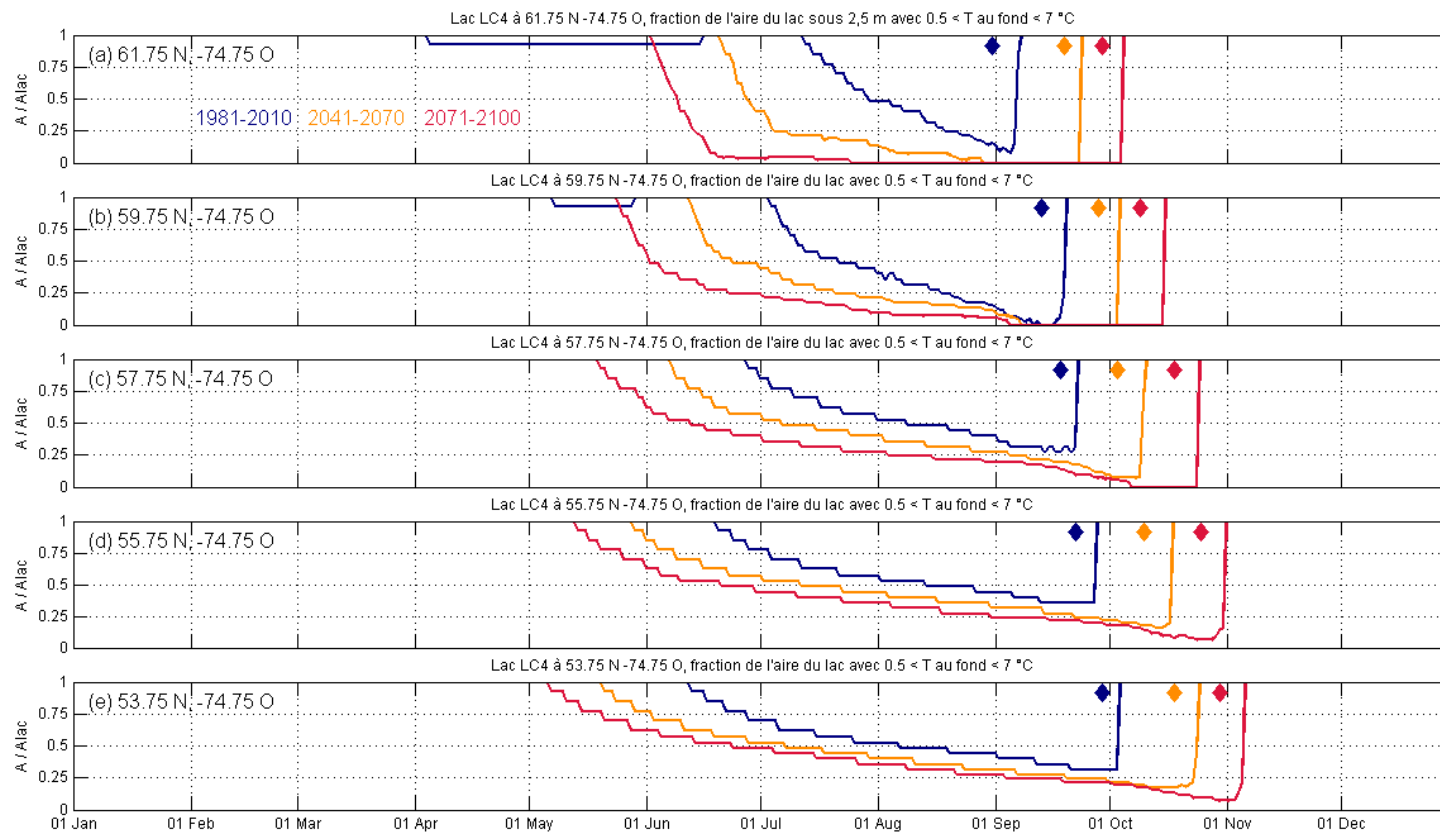


Figure 57. Lac type LC4, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour l'omble chevalier ($0,5 \leq T \leq 7$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 8$ °C).

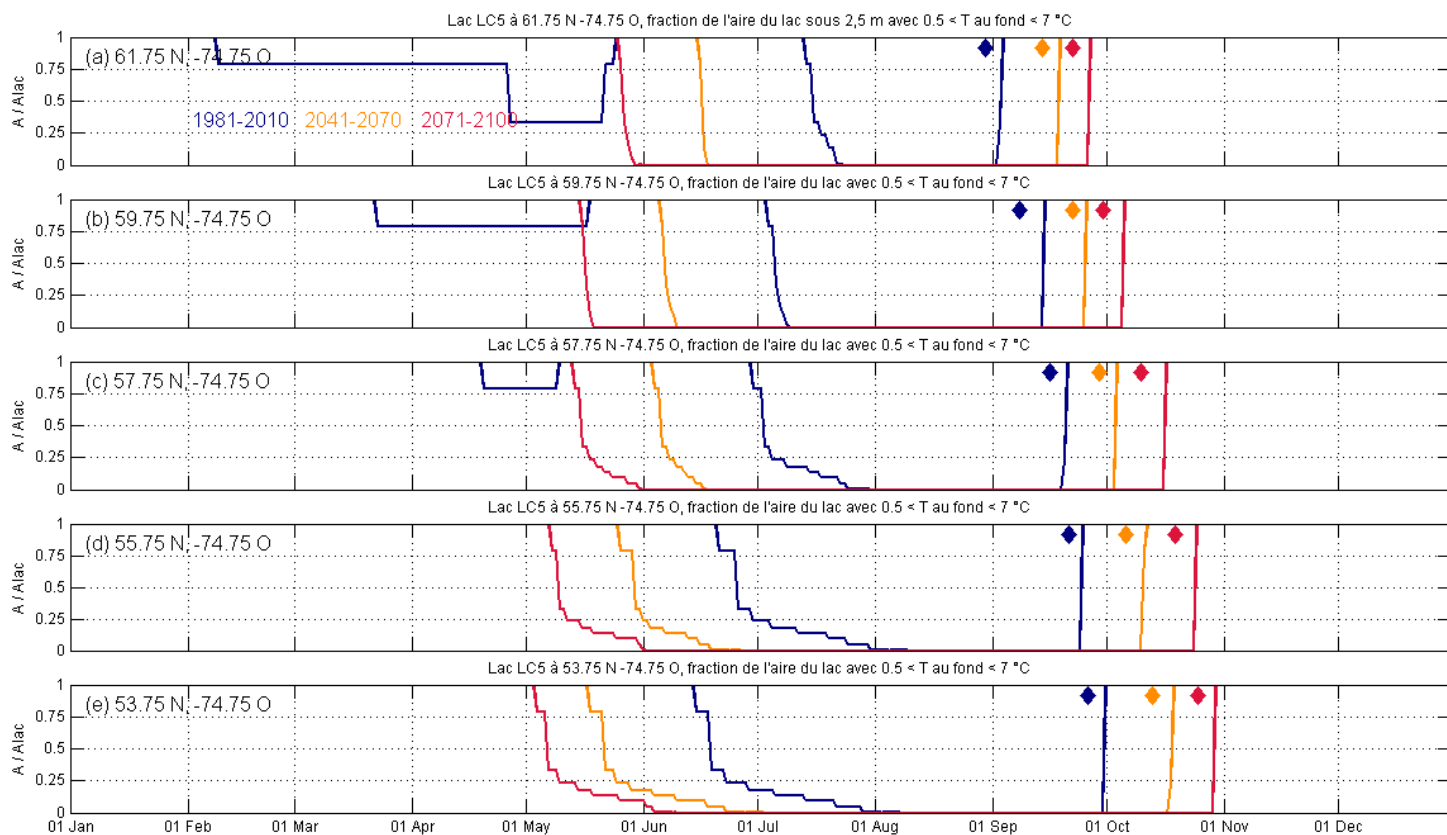


Figure 58. Lac type LC5, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie pour l'omble chevalier ($0,5 \leq T \leq 7$ °C) : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les losanges de même couleur indiquent le début de la fraie estimé via la température de surface ($T = 8$ °C).

On a cartographié le changement projeté pour la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m à une température favorable à la fraie du touladi. Les changements moyens, minimaux et maximaux sur le domaine pour les sept lacs-types et les trois horizons sont présentés au Tableau 20. Ces résultats généralisent ce qui peut être déduit à partir des cas LC4 et LC5 présentés ci-dessus (Figures 55 et 56), à savoir que la période avec 100 % du fond propice à la fraie devrait être plus longue dans le futur pour les lacs de grande profondeur moyenne, et plus courte pour les lacs de faible profondeur moyenne. La durée de la période avec 100 % du fond avec température favorable à la fraie donne une idée de la disponibilité des fonds propices mais cet indicateur doit être interprété avec précaution. Par exemple, la valeur de 100 % n'est pratiquement jamais atteinte pour un lac avec très grande profondeur moyenne comme le lac-type LC7, sauf tout au nord du domaine à l'horizon 2071-2100. On ne peut cependant pas en déduire qu'il n'y a pas ou très peu de fonds propices à la fraie dans un tel lac.

La limite inférieure de gamme de températures favorables à la fraie étant beaucoup plus basse pour l'omble chevalier que pour le touladi (0,5 vs 6,0 °C), la fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie atteint 100 % à l'automne et demeure à 100 % jusqu'à tard au printemps suivant (Figures 57 et 58). Il est donc inutile dans ce cas de cartographier la durée de la période avec 100 % du fond propice à la fraie. L'augmentation automnale de la part du fond avec température propice à la fraie survient rapidement (dès que la surface atteint 7 °C) et de plus en plus tard dans le futur. Le retard projeté entre le passé de référence et l'horizon 2071-2100 est de 30,4 jours pour LC4 et de 25,8 jours pour LC5 (moyenne des cinq latitudes considérées) et il est environ sept jours plus longs au sud du domaine qu'au nord. Le décalage de l'arrivée automnale des conditions thermiques propices à la fraie sur tout le fond s'accroîtrait dans le futur, le retard exprimé par décennie entre 2041-2070 et 2071-2100 étant d'environ 1,45 fois celui entre 1981-2010 et 2041-2070.

Le jour du déclenchement de la fraie est estimé via la température de surface. Il s'agit en quelque sorte d'un 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, même si communément acceptés dans la littérature, conduisent à un certain écart avec la réalité sur le terrain puisqu'elles ont été dérivées d'observations de cas particuliers. Par conséquent, divers facteurs tels l'emplacement du lac, la bathymétrie du lac et la profondeur de la frayère ont pu influencer sur les valeurs proposées dans la littérature.

Si des valeurs de température au niveau des frayères reconnues associées au déclenchement de la fraie devenaient disponibles, celles-ci pourraient éventuellement remplacer les températures de surface utilisées. Dans ce cas, la profondeur de la frayère devrait être prise en compte dans la détermination du jour du déclenchement de la fraie.

On a cartographié le retard projeté du déclenchement de la fraie. Les changements moyens, minimaux et maximaux sur le domaine pour les sept lacs-types et les trois horizons sont présentés aux Tableaux 20 pour le touladi et 22 pour l'omble chevalier. Les résultats indiquent que la fraie devrait débiter plus tard dans le futur, tant pour le touladi que pour

l'omble chevalier. Pour le touladi, le retard moyen sur le domaine à l'horizon 2071-2100 (par rapport au passé de référence 1981-2010) varie de 25,4 à 30,8 jours. Pour l'omble chevalier, il varie de 23,9 à 33,7 jours. La profondeur moyenne semble avoir une légère influence sur les retards projetés pour les lacs-types de faible profondeur moyenne (LC1, LC2 et LC5) étant un peu plus petits que pour les lacs-types de grande profondeur moyenne (LC4, LC6 et LC7). La différence est d'environ 4,1 jours pour le touladi et 7,1 jours pour l'omble chevalier. Les changements projetés entre 1981-2010 et 2041-2070 montrent aussi une légère influence de la profondeur moyenne.

Les résultats indiquent que le décalage progressif du début de la fraie devrait s'accélérer au cours des neuf décennies entre le passé de référence 1981-2010 et l'horizon 2071-2100. Pour le touladi, le taux de changement projeté pour les lacs-types de faible profondeur moyenne est de 2,8 jours par décennie pour les six premières décennies et passe à 3,2 jours par décennie pour les trois décennies suivantes. Pour les lacs-types de grande profondeur moyenne, le taux passe de 3,2 à 3,8 jours par décennie. Les résultats pour l'omble chevalier montrent aussi une accélération du taux de changement dans le futur : de 2,4 à 3,3 jours par décennie pour les lacs-types de faible profondeur moyenne, et de 3,0 à 4,3 jours par décennie pour les lacs-types de grande profondeur moyenne). Il est difficile de prévoir les conséquences d'un retard de la fraie sur le recrutement. Deux mécanismes peuvent possiblement jouer : 1) si cela entraîne une exposition des œufs à des températures défavorables pouvant compromettre leur survie, et 2) si cela mène à un asynchronisme entre l'éclosion et la disponibilité de la nourriture, affectent ainsi la croissance et la survie des alevins.

Tableau 20. Évolution projetée de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m sera à une température favorable à la fraie pour le touladi ($6 \leq T \leq 14$ °C) : changement moyen, plus petit changement et plus grand changement sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours).

Changement projeté de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m sera à une température favorable à la fraie							
(touladi, limites: $6 \geq T \leq 14$ °C)							
Période	Changement moyen sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	-18,8	-21,3	-6,3	8,1	-14,0	8,9	0,5
De 1981-2010 à 2071-2100	-20,7	-23,1	-9,8	16,9	-15,9	26,0	3,3
De 2041-2070 à 2071-2100	-2,3	-2,6	-4,2	9,1	-2,4	16,5	2,7
	Plus petit changement sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	-49	-49	-49	-1	-48	0	0
De 1981-2010 à 2071-2100	-53	-49	-52	0	-49	2	0
De 2041-2070 à 2071-2100	-19	-22	-24	-20	-21	-28	0
	Plus grand changement sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	17	18	19	51	15	42	29
De 1981-2010 à 2071-2100	11	16	22	51	17	58	50
De 2041-2070 à 2071-2100	5	4	1	25	5	32	31

Tableau 21. Retard projeté du déclenchement de la fraie pour le touladi : retard moyen, plus petit retard et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours). La date du déclenchement de la fraie est estimée via la température de surface ($T = 11\text{ °C}$).

Retard projeté du déclenchement de la fraie (touladi, basé sur 11 °C en surface)							
Période	Retard moyen sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	16,4	16,7	18,4	19,0	16,5	19,5	18,7
De 1981-2010 à 2071-2100	25,4	26,1	28,1	29,7	25,9	30,8	29,1
De 2041-2070 à 2071-2100	9,5	9,7	10,2	11,1	9,6	12,1	10,8
	Plus petit retard sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	13	14	15	14	14	15	14
De 1981-2010 à 2071-2100	21	23	24	24	22	24	23
De 2041-2070 à 2071-2100	7	7	8	7	7	6	6
	Plus grand retard sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	26	27	28	30	27	31	30
De 1981-2010 à 2071-2100	32	33	32	42	32	45	41
De 2041-2070 à 2071-2100	17	16	16	19	16	28	24

Tableau 22. Retard projeté du déclenchement de la fraie pour l'omble chevalier : retard moyen, plus petit retard et plus grand retard sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (jours). La date du déclenchement de la fraie est estimée via la température de surface ($T = 8\text{ °C}$).

Retard projeté du déclenchement de la fraie (omble chevalier, basé sur 8 °C en surface)							
Période	Retard moyen sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	14,2	14,4	15,2	17,4	14,3	19,4	17,5
De 1981-2010 à 2071-2100	23,9	24,5	25,8	29,8	24,3	33,7	30,6
De 2041-2070 à 2071-2100	9,8	10,1	10,6	12,4	10,0	13,9	12,7
	Plus petit retard sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	10	11	12	13	11	14	13
De 1981-2010 à 2071-2100	20	20	21	23	20	25	23
De 2041-2070 à 2071-2100	6	6	7	8	6	9	7
	Plus grand retard sur le domaine (jours)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	21	20	21	29	20	32	28
De 1981-2010 à 2071-2100	32	33	32	39	32	51	47
De 2041-2070 à 2071-2100	16	16	15	16	16	20	21

9.2.2 Incubation (survie des œufs)

L'évolution projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation donne une indication des chances de survie des œufs dans le futur, supposant que plus la fraction du fond avec conditions thermiques propices est grande, meilleures sont les chances de survie. On note cependant que le sort des œufs n'est pas entièrement dépendant de cet indicateur, la fraie pouvant avoir lieu en zone favorable ou défavorable indépendamment de la part du fond avec conditions.

Les Figures 59 et 60 présentent les variations temporelles de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation pour le touladi pour deux lacs-types, soit LC4 pour illustrer les lacs de grande profondeur moyenne et LC5 pour illustrer les lacs de faible profondeur moyenne. La fraction augmente avec le refroidissement automnal, devient 100 % autour de la période isotherme à 4 °C, puis diminue avec l'apparition de températures inférieures à 3 °C. Cette séquence est décalée du nord au sud et est également décalée dans le futur. Pour LC4, le décalage est de 18,5 jours en moyenne entre 1981-2010 et 2041-2070 et de 11,0 jours entre 2041-2070 et 2071-2100. Les retards moyens pour LC5 sont presque similaires, soit 17,0 et 10,9 jours. Après la période de 100 % la diminution est d'abord rapide mais ralenti considérablement avec l'instauration d'un couvert de glace. La perte de chaleur continue en hiver et la fraction du fond avec température favorable à l'incubation diminue lentement avec l'avancée des températures sous 3 °C dans la colonne d'eau. La partie de la colonne d'eau avec température demeurant au-dessus de 3 °C étant beaucoup plus importante pour LC4 que pour LC5, la fraction du fond en hiver avec température sous 2,5 m favorable à l'incubation est également plus grande pour LC4. De manière générale, les résultats prédisent une augmentation dans le futur de la fraction du fond en hiver avec température favorable à la survie des œufs.

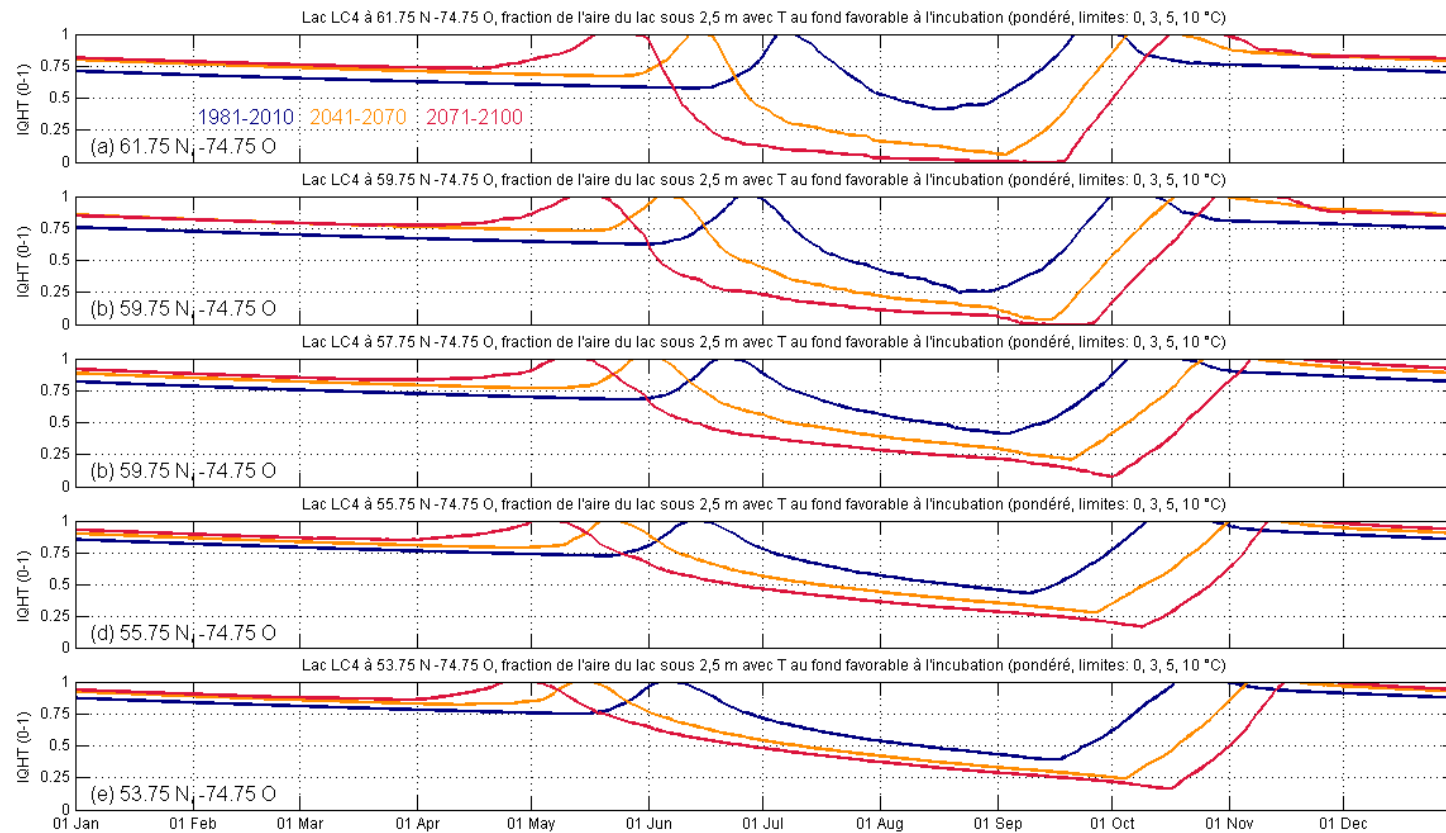


Figure 59. Lac type LC4, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la survie des œufs pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

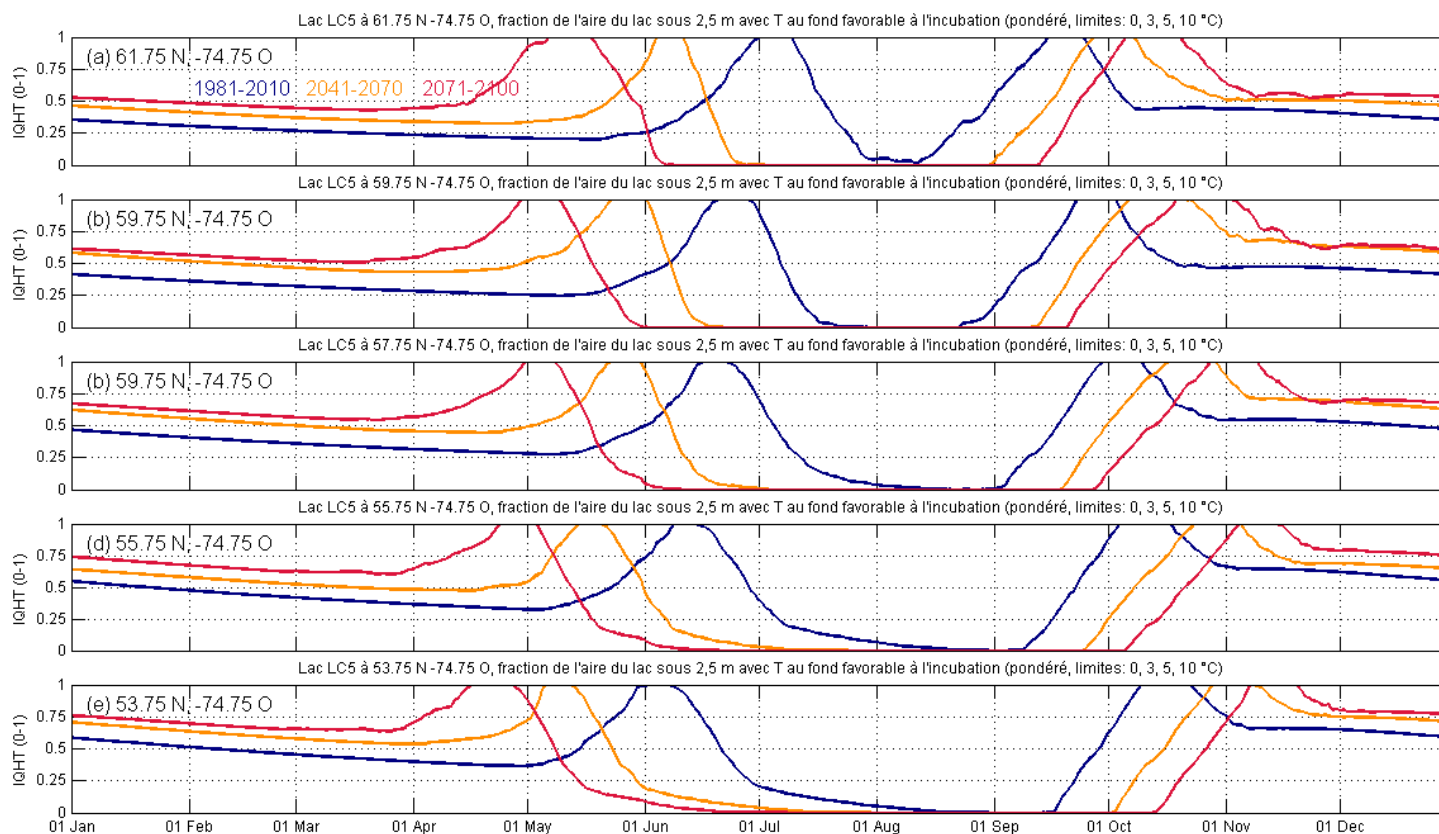


Figure 60. Lac type LC5, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la survie des œufs pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

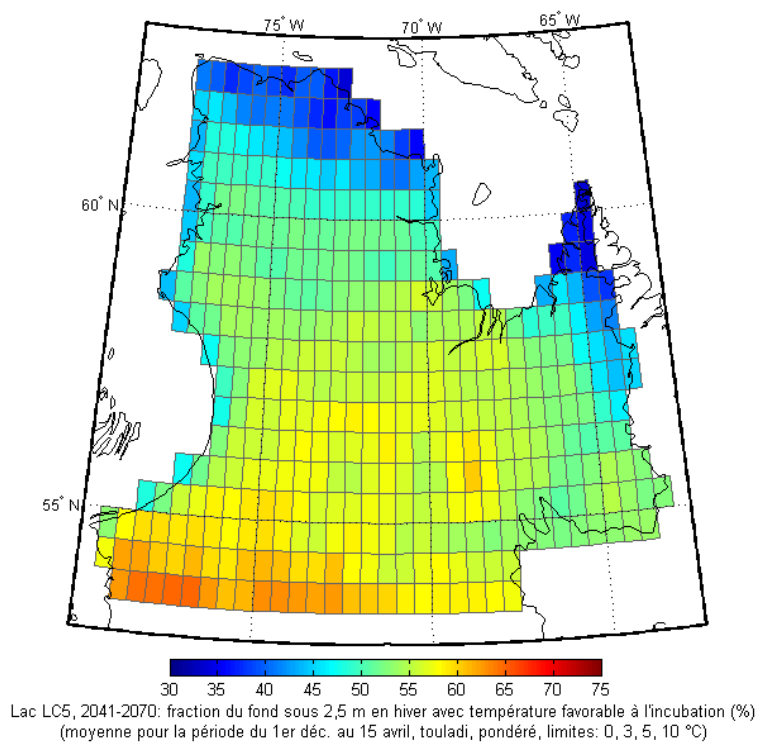


Figure 61. Lac type LC5, période 2041-2070, fraction de l'aire du lac sous 2,5 m en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril) avec température près du fond favorable à la survie des œufs pour le touladi (%). La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

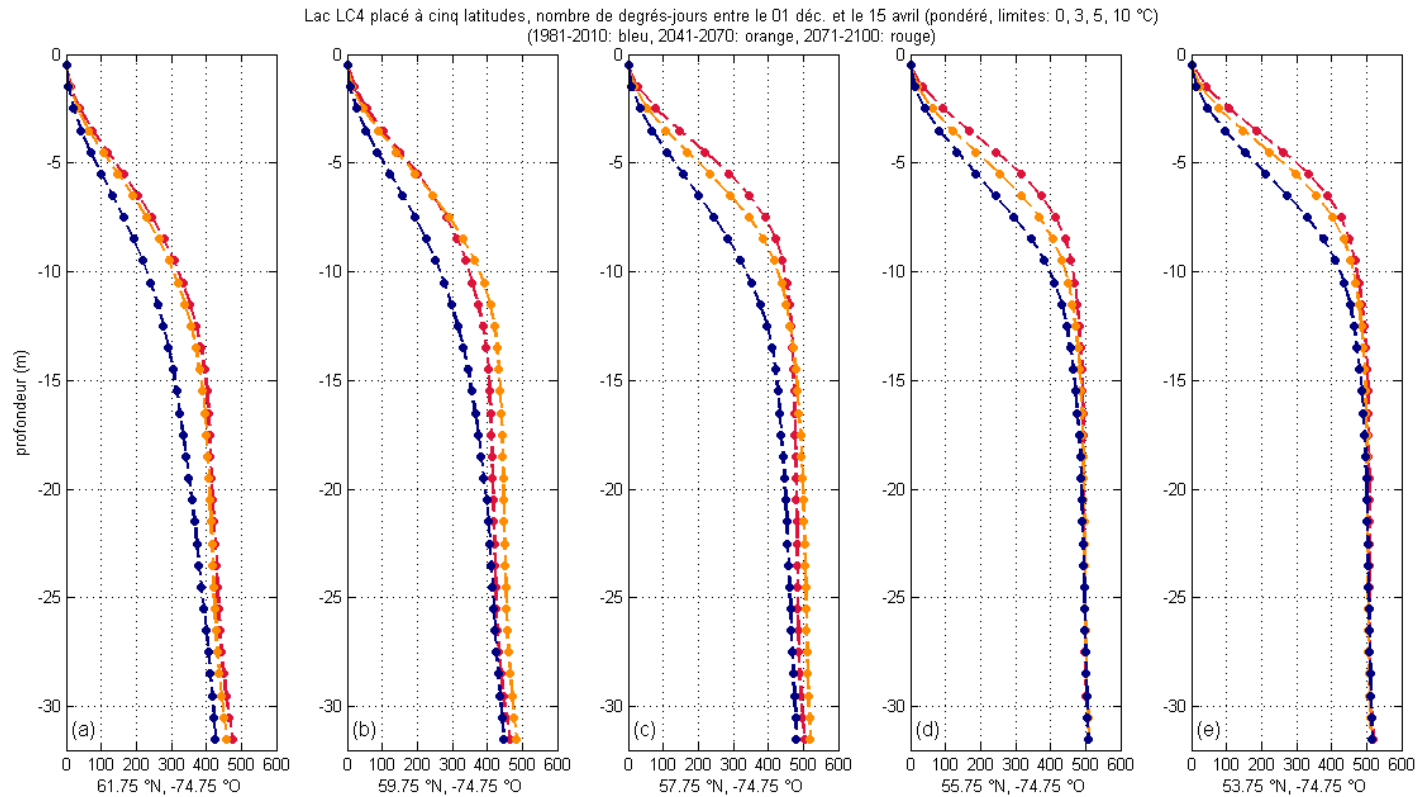


Figure 62. Lac type LC4, profils du nombre de degrés-jours avec température favorable à l'incubation des œufs pour le touladi à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les degrés-jours sont accumulés sur la période allant du 1^{er} décembre au 15 avril. Les contributions journalières à chaque profondeur sont pondérées par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

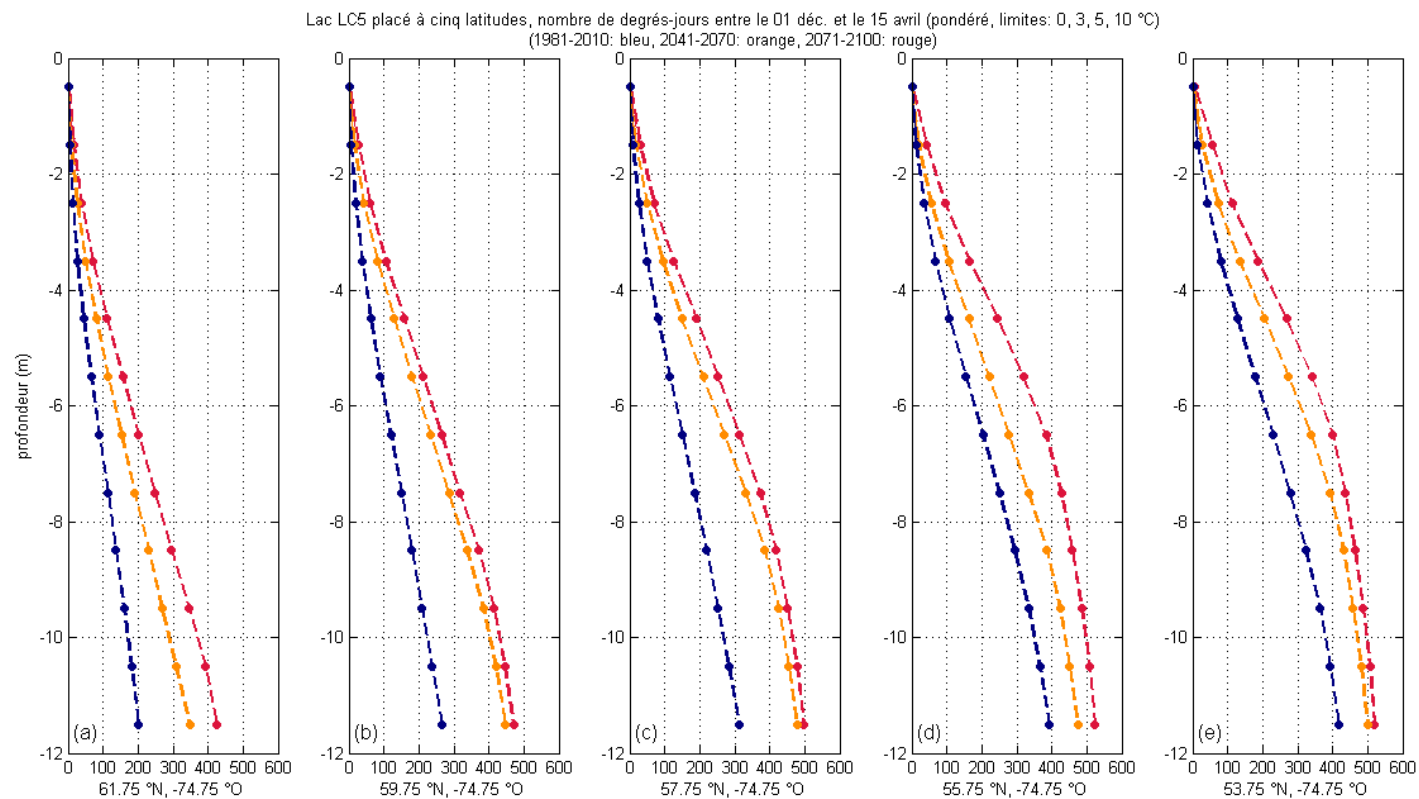


Figure 63. Lac type LC5, profils du nombre de degrés-jours avec température favorable à l'incubation des œufs pour le touladi à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les degrés-jours sont accumulés sur la période allant du 1^{er} décembre au 15 avril. Les contributions journalières à chaque profondeur sont pondérées par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

On remarquera que les évolutions pour le touladi et l'omble chevalier deviennent similaires lorsque les températures passent sous 5 °C puisque les limites *critique froide* et *optimale froide* considérées sont les mêmes. C'est évidemment le cas pour la majeure partie de la période d'incubation des œufs. Les résultats pour l'omble chevalier sont donc identiques à ceux présentés pour le touladi. La fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation varie peu en hiver (Figures 59 et 60) et nous avons donc considéré une moyenne hivernale entre le 1^{er} décembre et le 15 avril pour la représentation cartographique des résultats. Un exemple est fourni à la figure 61. Les valeurs moyennes, minimales et maximales sur le domaine pour les sept lacs-types et les trois horizons sont présentées aux Tableaux 23 et 24 (fraction et augmentation projetée). On constate d'abord que, comme il a été dit pour les séries temporelles, la part du fond avec température favorable à l'incubation est plus petite pour les lacs-types de faible profondeur moyenne (LC1, LC2 et LC5) que pour les lacs-types de grande profondeur moyenne (LC4, LC6 et LC7). On a expliqué cette différence par le fait que les températures inférieures à 3 °C (sous optimales) occupent une plus grande part de la colonne d'eau pour les lacs-types de faible profondeur moyenne. On constate ensuite que, comme il a été dit pour les séries temporelles, les résultats prédisent une augmentation dans le futur de la fraction du fond sous 2,5 m en hiver avec température favorable à l'incubation. Ceci découlerait de températures légèrement supérieures en hiver, la température près du fond se rapprochant ou dépassant 3 °C dans le futur sur une plus grande partie du fond. On constate finalement que l'augmentation projetée est beaucoup plus marquée pour les lacs-types de faible profondeur moyenne. Entre 1981-2010 et 2071-2100, l'augmentation est de 48,1 à 51,6 % pour les lacs-types de faible profondeur moyenne et de 4,2 à 10,4 % pour les lacs-types de grande profondeur moyenne.

Les plus petites fractions du fond avec température favorable à la survie des œufs surviennent tout au nord du domaine (Figure 61) et, comme pour la moyenne, le minimum sur le domaine est aussi obtenu pour les lacs-types de faible profondeur moyenne (Tableau 23). Ce minimum absolu (valeur plancher pour les lacs offrant le moins de fonds thermiquement propices) passe d'environ 22 % en passé de référence à 39 % à l'horizon 2071-2100, indiquant que la disponibilité de fonds propices à la survie des œufs devrait augmenter substantiellement dans le futur pour les cas les moins favorables.

Tableau 23. Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver pour le touladi : valeur moyenne, plus petite valeur et plus grande valeur sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (%). La moyenne hivernale est calculée sur la période du 1er décembre au 15 avril. La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril) (touladi, pondéré, limites: 0, 3, 5, 10 °C)							
Période	Valeur moyenne sur le domaine (% de l'aire du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	40,50	45,72	51,00	76,09	40,76	89,88	86,14
2041-2070	51,86	58,65	63,67	81,93	52,50	92,66	88,94
2071-2100	61,13	67,43	71,09	83,94	61,19	93,71	90,88
	Valeur la plus basse sur le domaine (% de l'aire du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	21,69	24,34	26,15	35,95	21,73	59,37	65,03
2041-2070	33,20	36,04	37,89	47,68	33,57	68,38	73,12
2071-2100	39,69	42,38	43,17	45,90	38,95	59,14	63,18
	Valeur la plus élevée sur le domaine (% de l'aire du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	52,37	58,13	63,62	84,86	52,82	93,33	88,99
2041-2070	62,78	72,52	77,65	89,14	65,10	95,29	91,61
2071-2100	75,93	81,94	85,88	92,95	76,13	97,50	94,93

Tableau 24. Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver pour le touladi : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%). La moyenne hivernale est calculée sur la période allant du 1er décembre au 15 avril. La contribution de l'aire à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 3 °C, égale à 1 entre 3 et 5 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 5 et 10 °C.

Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril) (touladi, pondéré, limites: 0, 3, 5, 10 °C)							
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	29,0	29,4	26,1	8,2	29,8	3,0	3,2
De 1981-2010 à 2071-2100	51,6	48,1	40,0	10,4	50,5	4,2	5,4
De 2041-2070 à 2071-2100	17,7	14,9	11,4	2,3	16,3	1,2	2,2
	Plus petite augmentation sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	14,1	13,4	10,9	-2,1	16,2	1,0	0,9
De 1981-2010 à 2071-2100	29,0	30,3	18,8	-12,2	31,4	-5,2	-4,5
De 2041-2070 à 2071-2100	5,4	0,1	-2,3	-12,5	4,5	-8,1	-7,3
	Plus grande augmentation sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	49,7	50,8	50,4	28,9	50,2	9,3	7,2
De 1981-2010 à 2071-2100	82,5	72,7	63,5	26,5	76,2	10,1	9,9
De 2041-2070 à 2071-2100	34,5	29,9	24,5	13,3	30,4	4,4	5,9

Les Figures 62 et 63 présentent les profils de degrés-jours de température favorable à l'incubation (pondérés suivant les mêmes limites que pour les séries de fraction du fond avec température favorable) accumulés entre le 1^{er} décembre et le 15 avril pour deux lacs-types, soit LC4 pour illustrer les lacs-types de grande profondeur moyenne et LC5 pour illustrer les lacs-types de faible profondeur moyenne. Les profils de degrés-jours présentés reflètent les profils de température en hiver, qui eux dépendent de la quantité de chaleur emmagasinée en été et de la perte de chaleur en automne et en hiver. La perte de chaleur dépend à son tour des conditions météorologiques, dont la température de l'air et la vitesse du vent. Le vent influence le mélange et peut accélérer la perte de chaleur en favorisant le transport de chaleur vers la surface et une température de surface légèrement plus élevée. Le développement d'un couvert de glace influe aussi sur le flux de chaleur. Dans les deux cas présentés la variation du nombre degrés-jours avec la profondeur (gradient vertical) est importante dans les dix premiers mètres sous la surface et diminue par après. Par conséquent, des œufs reposant à 10 m apparaissent exposés à beaucoup plus de degrés-jours favorables que des œufs à 5 m, alors que des œufs reposant à 20 m apparaissent à peine plus exposés que des œufs à 15 m, spécialement dans le futur.

Les profils des Figures 62 et 63 montrent comment les changements projetés varient avec la profondeur et la latitude le long d'un transect nord-sud. Dans les deux cas (lacs-types de grande et faible profondeur moyenne), le nombre de degrés-jours à une profondeur donnée et pour un horizon donné augmente du nord au sud. Pour LC4, les résultats indiquent une augmentation générale du nombre degrés-jours dans le futur mais avec quelques complexités : 1) il n'y aurait pas d'augmentation sous ~18 m aux deux latitudes les plus au sud, et 2) il y aurait une légère diminution en profondeur entre les horizons 2041-2070 et 2071-2100 aux latitudes 59,75 et 57,75 °N, soit sous environ 9 et 16 m respectivement. Ce dernier point résulterait d'un certain nombre de jours avec température hivernale légèrement plus basse en profondeur à l'horizon 2071-2041. La cause de cette particularité pourrait être liée aux forts vents à ces latitudes mentionnées à la section 4.1. Les résultats pour LC5 sont plus simples : les résultats indiquent une augmentation entre un horizon et le suivant à toutes les profondeurs, bien qu'elle soit moins marquée entre 2041-2070 et 2071-2100 aux latitudes 59,75 et 57,75 °N. On peut présumer que l'augmentation projetée du nombre de degrés-jours en hiver avec températures favorables à l'incubation est bénéfique quant à la survie des œufs. Il est d'ailleurs probable que cela modifie la durée de la période d'incubation, menant à une éclosion survenant plus tôt. Cependant, pour déterminer à quel point la période d'incubation pourrait être raccourcie il est nécessaire d'obtenir de l'information plus détaillée quant aux températures dans quelques frayères à diverses profondeurs accompagnées de dates de fraie et d'éclosion. Si la période d'incubation était un peu raccourcie, ceci se combinerait au retard projeté de la fraie pour déterminer le moment de l'éclosion et son impact dans son contexte phénologique (match / mismatch).

9.2.3 Croissance des juvéniles

Les Figures 64 et 65 présentent les variations temporelles de la fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des touladis juvéniles pour deux lacs-

types, soit LC4 pour illustrer les lacs de grande profondeur moyenne et LC5 pour illustrer les lacs de faible profondeur moyenne. Les séries sont présentées pour cinq latitudes et trois horizons. Dans les deux cas les résultats prédisent que la fraction du volume avec température favorable devrait augmenter substantiellement au printemps et l'automne. L'arrivée de températures plus chaudes en surface en été cause une diminution de la fraction du volume avec température favorable. Cette baisse estivale est davantage marquée pour LC5 que pour LC4. Elle est pratiquement absente en passé de référence et devient importante à l'horizon 2071-2100, particulièrement au sud du domaine. Pour un lac de faible profondeur moyenne situé au sud du domaine, la part du volume du lac avec température favorable à la croissance des touladis juvéniles pourrait diminuer jusqu'à ~34 % au cœur de l'été à l'horizon 2071-2100 (LC1 et LC5).

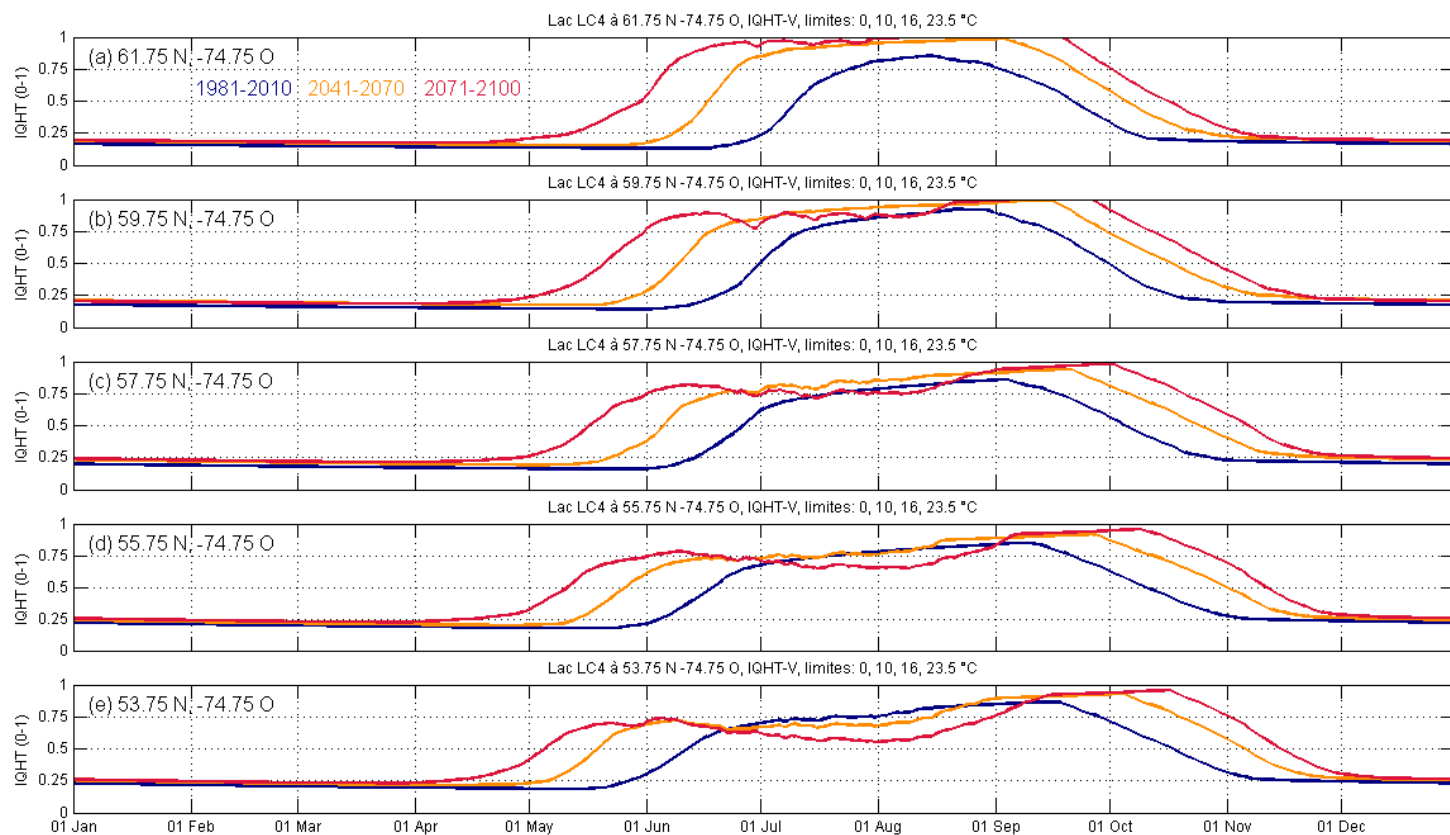


Figure 64. Lac type LC4, fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 10 °C, égale à 1 entre 10 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 23,5 °C.

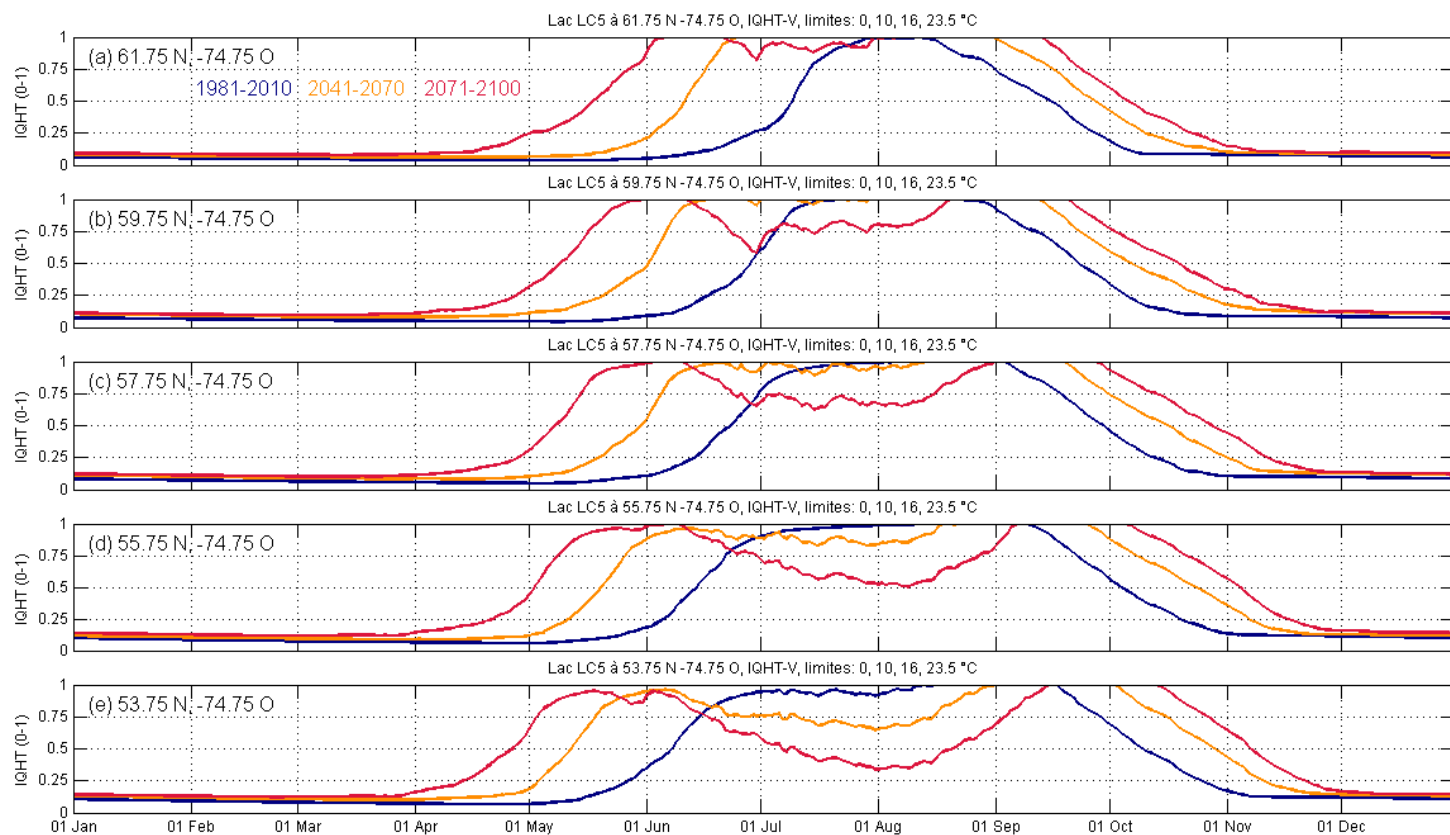


Figure 65. Lac type LC5, fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles pour le touladi : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour trois périodes, soit 1981-2010 (bleu), 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 10 °C, égale à 1 entre 10 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 23,5 °C.

En été, la fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles tend à être plus basse pour l'omble chevalier que pour le touladi, et plus particulièrement pour les cas où il y a une baisse estivale. Cette baisse est alors plus marquée pour l'omble chevalier. Par exemple, pour le lac type LC5 le minimum estival à l'horizon 2071-2100 au pixel 53,75 °N -74,75 °O est 15,7 % pour l'omble chevalier et 33,8 % pour le touladi. Cette différence s'explique par la température critique chaude légèrement plus basse pour l'omble chevalier (21 °C vs 23,5 °C), ce qui fait en sorte que la contribution des volumes avec température au-delà de la limite optimale chaude (16 °C pour les deux espèces) est moins grande pour cette espèce. Par exemple, si le volume V_i de la couche i a une température de 19 °C, sa contribution à la somme des volumes avec température favorable est de 40 % de V_i pour l'omble chevalier et de 60 % de V_i pour le touladi.

On a cartographié le nombre de m^3 -jours avec température favorable à la croissance des juvéniles. Cet indicateur donne une mesure de la disponibilité sur un cycle annuel d'un habitat thermique propice à la croissance des juvéniles. Les changements moyens, minimaux et maximaux sur le domaine pour les sept lacs-types et les trois horizons sont présentés aux Tableaux 25 pour le touladi et 26 pour l'omble chevalier. Les résultats indiquent que le nombre de m^3 -jours avec température favorable à la croissance de juvéniles devrait augmenter substantiellement dans le futur, et ce tant pour le touladi que l'omble chevalier. Cette augmentation de l'habitat thermique favorable aux juvéniles peut être interprété comme un changement probablement positif quant à la pérennité de ces espèces.

L'augmentation projetée du nombre de m^3 -jours avec température favorable semble découler principalement de l'allongement de la période où la fraction du volume avec température favorable est substantielle ($\geq 0,25$) (Figures 64 et 65). L'augmentation de la fraction du volume avec température favorable au cœur de l'été n'y contribue que dans certains cas, soit au nord du domaine et seulement pour le lac-type de grande profondeur moyenne (LC4).

Les augmentations moyennes projetées de m^3 -jours avec température favorable à la croissance des touladis juvéniles sont voisines pour les trois lacs-types de faible profondeur moyenne (LC1, LC2 et LC5), soit pour le touladi environ 52,6 % entre 1981-2010 et 2071-2100 (Tableau 25). L'augmentation est légèrement plus grande pour le lac-type de profondeur moyenne intermédiaire (LC3, 55,9 %) puis diminue avec la profondeur moyenne pour les lacs-types de grande profondeur moyenne (42,5 %, 39,6 % et 27,5 % pour LC4, LC6 et LC7). La variation des augmentations en fonction de la profondeur moyenne suit un patron similaire pour l'omble chevalier (soit 52,5 % pour LC1-LC2-LC5, suivi de 59,2 % pour LC3, suivi de 45,6 %, 43,1 % et 29,2 % pour LC4, LC6 et LC7) (Tableau 26). De manière générale, une plus grande profondeur moyenne entraîne une plus petite augmentation du nombre de m^3 -jours avec température favorable à la croissance des juvéniles. Ceci découle du réchauffement plus faible et de plus courte durée en profondeur pour les lacs de grande profondeur moyenne.

L'augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles n'est pas constante au cours des neuf décennies allant du passé de référence au futur le plus éloigné. Le taux d'augmentation accélère ou ralentit et la profondeur moyenne semble déterminante quant à la direction de ce changement. Pour le touladi, l'accroissement des valeurs moyennes entre 1981-2010 et 2041-2070 (exprimé en m³-jours par décennie) est supérieur à celui entre 2041-2070 et 2071-2100 pour les lacs-types de faible profondeur moyenne (LC1, LC2, LC3 et LC5). Par exemple, l'augmentation de la moyenne sur le domaine passe de 0,76 à 0,59 x 10⁷ m³-jours par décennie pour le lac-type LC5. Contrastant avec cette décélération, il y a cependant accélération pour les lacs-types de grande profondeur moyenne (LC4, LC6 et LC7). Par exemple, l'augmentation de la moyenne sur le domaine passe de 3,20 à 3,94 x 10⁷ m³-jours par décennie pour le lac-type LC6. Des résultats similaires sont observés pour l'omble chevalier, à l'exception d'une faible décélération pour LC4, le moins profond des lacs-types de grande profondeur moyenne. Comme pour le contenu en chaleur maximal (voir section 9.1.1, *Grandeur des changements projetés*), la plus grande augmentation projetée est pour le lac type LC3, c'est-à-dire un lac de profondeur moyenne intermédiaire. On a expliqué ce résultat par l'impact combiné de deux facteurs : 1) la part du volume du lac loin de la surface peu affectée par le réchauffement estival (ce qui expliquerait que l'augmentation pour LC3 est plus grande que pour LC4, LC6 et LC7), et 2) un plus grand gain de chaleur pour un lac de plus grande profondeur moyenne (ce qui expliquerait que l'augmentation pour LC3 est plus grande que pour LC1, LC2 et LC5).

La variation du taux d'augmentation de nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance semble associée au réchauffement accru en surface au cœur de l'été. Pour les lacs de faible profondeur moyenne, la période avec température favorable à la croissance continue de s'allonger entre 2041-2070 et 2071-2100 (plus de m³-jours) mais le réchauffement en surface au cœur de l'été devient important (moins m³-jours). Le gain net par décennie est alors plus petit que le gain entre 1981-2010 et 2041-2070. Pour les lacs de grande profondeur moyenne, la période avec température favorable à la croissance continue d'allonger entre 2041-2070 et 2071-2100 (plus de m³-jours) mais le réchauffement estival induit une moins grande perte de m³-jours. Le gain net par décennie est plus grand que le gain entre 1981-2010 et 2041-2070.

Tableau 25. Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles pour le touladi : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%). La contribution journalière du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 10 °C, égale à 1 entre 10 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 23,5 °C.

Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable (touladi juvénile, pondéré, limites: 0, 10, 16, 23.5 °C)							
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	36,3	37,8	38,9	27,3	37,5	24,5	16,5
De 1981-2010 à 2071-2100	51,7	53,3	55,9	42,5	52,9	39,6	27,5
De 2041-2070 à 2071-2100	10,8	10,8	11,7	11,6	10,6	12,0	9,2
	Plus petite augmentation sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	16,0	17,0	19,4	14,2	16,3	14,3	8,9
De 1981-2010 à 2071-2100	16,4	16,3	20,6	20,0	16,0	21,9	14,6
De 2041-2070 à 2071-2100	0,4	-0,6	1,0	3,7	-0,3	5,9	3,6
	Plus grande augmentation sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	89,0	93,3	95,1	79,6	93,2	68,8	51,5
De 1981-2010 à 2071-2100	133,9	140,3	141,3	124,4	139,9	102,3	73,1
De 2041-2070 à 2071-2100	30,7	31,3	30,9	25,0	31,2	22,1	20,1

Tableau 26. Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles pour l’omble chevalier : augmentation moyenne, plus petite augmentation et plus grande augmentation sur le domaine pour les sept lacs types et trois intervalles (%). La contribution journalière du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 0 et 12 °C, égale à 1 entre 12 et 16 °C, et linéairement variable de 1 à 0 entre 16 et 21 °C.

Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable (omble chevalier, pondéré, limites: 0, 12, 16, 21 °C)							
Période	Augmentation moyenne sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	40,6	42,6	45,2	30,7	42,0	27,2	18,2
De 1981-2010 à 2071-2100	51,4	53,6	59,2	45,6	52,5	43,1	29,2
De 2041-2070 à 2071-2100	6,7	6,6	8,8	11,0	6,3	12,1	9,1
	Plus petite augmentation sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	11,2	12,3	16,8	12,7	11,2	13,9	8,7
De 1981-2010 à 2071-2100	6,2	6,3	13,1	17,1	5,7	20,7	13,4
De 2041-2070 à 2071-2100	-4,8	-5,4	-3,3	2,2	-4,9	4,9	3,0
	Plus grande augmentation sur le domaine (%)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
De 1981-2010 à 2041-2070	101,8	107,5	108,6	88,4	107,4	73,1	52,0
De 1981-2010 à 2071-2100	158,1	165,5	166,5	145,1	165,1	117,3	81,2
De 2041-2070 à 2071-2100	34,1	34,7	34,7	30,1	34,6	27,2	23,4

9.2.4 Stress thermique chez les adultes

Le volume maximal avec température stressante pour les adultes donne une indication de la prévalence des conditions thermiques potentiellement néfastes quant à la pérennité des espèces considérées. On notera que cet indicateur n'informe pas directement sur la durée des conditions difficiles mais on peut raisonnablement présumer d'un lien entre le volume maximal avec température stressante et la durée des températures stressantes. Le seuil des températures stressantes étant plus bas pour le touladi que pour l'omble chevalier (18 °C vs 21 °C), le touladi apparaît davantage susceptible d'être impacté par le réchauffement projeté.

Les Figures 66 et 67 présentent les variations temporelles de la fraction du volume du lac avec température stressante pour les touladis adultes pour deux lacs-types, soit LC4 pour illustrer les lacs de grande profondeur moyenne, et LC5 pour illustrer les lacs de faible profondeur moyenne. Les séries sont présentées pour cinq latitudes et trois horizons. On y voit 1) que les températures stressantes ne surviennent qu'à partir de l'horizon 2041-2070, 2) qu'elles occupent un volume beaucoup plus important et durent plus longtemps à l'horizon 2071-2100, 3) qu'elles sont pratiquement absentes dans la partie nord du domaine, et 4) qu'elles occupent une part de volume plus importante pour un lac de faible profondeur moyenne par rapport à un lac de grande profondeur moyenne. La durée de la période avec température stressante est cependant presque identique pour les lacs-types LC4 et LC5.

On a cartographié le volume maximal avec température stressante. Les valeurs moyennes, minimales et maximales sur le domaine pour les sept lacs-types et les trois horizons sont présentées aux Tableaux 27 pour le touladi et 28 pour l'omble chevalier. Les résultats pour le touladi montrent que les volumes maximaux avec température stressante passent de pratiquement négligeables en passé de référence à substantiels à l'horizon 2071-2100, avec des moyennes sur le domaine allant de 5,5 à 23,0 % du volume du lac. De manière générale, plus la profondeur moyenne du lac-type est grande, plus la fraction maximale du volume avec température stressante est petite. Ceci est essentiellement dû au fait que la part du volume du lac loin de la surface est plus importante pour les lacs profonds. Les lacs de petite profondeur moyenne apparaissent donc plus susceptibles de devenir des milieux de vie difficiles pour le touladi puisque la disponibilité de conditions thermiques favorables devrait y être davantage réduite. Cette possibilité apparaît encore plus vraisemblable lorsqu'on considère les valeurs maximales sur le domaine, le volume maximal avec température stressante pour les lacs-types de faible profondeur moyenne étant de 62,0 % (moyenne des lacs-types LC1, LC2 et LC5).

Tableau 27. Volume maximal avec température stressante pour le touladi adulte : valeur moyenne, plus petite valeur et plus grande valeur sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (% du volume du lac). La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 18 et 23,5 °C.

Volume maximal avec température stressante (touladi adulte, pondéré, limites: 18, 23.5 °C)							
Période	Valeur moyenne sur le domaine (% du volume du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00
2041-2070	2,99	2,83	1,75	1,51	2,98	0,69	0,71
2071-2100	22,32	21,88	16,07	11,25	23,03	6,84	5,51
	Valeur la plus basse sur le domaine (% du volume du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2041-2070	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2071-2100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Valeur la plus élevée sur le domaine (% du volume du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	2,08	2,01	0,94	0,96	2,18	0,05	0,38
2041-2070	24,61	24,54	17,94	14,30	25,69	8,82	7,09
2071-2100	62,69	60,10	48,26	31,97	63,17	22,02	16,03

Tableau 28. Volume maximal avec température stressante pour l’omble chevalier adulte : valeur moyenne, plus petite valeur et plus grande valeur sur le domaine pour les sept lacs types et trois périodes de simulation (% du volume du lac). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour les périodes 1981-2010 et 2041-2070. La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 21 et 24 °C.

Volume maximal avec température stressante (omble chevalier adulte, pondéré, limites: 21, 24 °C)							
Période	Valeur moyenne sur le domaine (% du volume du lac)						
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	–	–	–	–	–	–	–
2041-2070	–	–	–	–	–	–	–
2071-2100	3,68	3,93	2,59	2,21	4,06	1,02	1,03
Valeur la plus basse sur le domaine (% du volume du lac)							
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	–	–	–	–	–	–	–
2041-2070	–	–	–	–	–	–	–
2071-2100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Valeur la plus élevée sur le domaine (% du volume du lac)							
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7
1981-2010	–	–	–	–	–	–	–
2041-2070	–	–	–	–	–	–	–
2071-2100	38,97	38,70	28,53	23,73	40,44	15,22	12,00

Les volumes maximaux avec température stressante sont beaucoup plus petits pour l'omble chevalier en raison du seuil de tolérance plus élevé. On s'attend donc à ce que, du point de vue de la diminution du volume habitable (i.e. avec température non contraignante) l'impact du réchauffement projeté soit moins important que pour le touladi. Les températures stressantes ne surviennent qu'à l'horizon 2071-2100 et les volumes maximaux avec température stressante demeurent relativement petits, avec des moyennes sur le domaine allant de 1,0 à 4,1 % du volume du lac. Dans le sud du domaine, le volume maximal avec température stressante pourrait quand même atteindre 39,4 % (moyenne des lacs-types LC1, LC2 et LC5). L'impact de la profondeur moyenne sur le volume maximal avec température stressante est similaire à ce qui est observé pour le touladi.

Les Figures 68 et 69 présentent les profils de nombre de jours avec température stressante pour les touladis adultes ($T \geq 18$ °C) pour deux lacs-types, soit LC4 pour illustrer les lacs de grande profondeur moyenne, et LC5 pour illustrer les lacs de faible profondeur moyenne. Les profils sont présentés pour cinq latitudes le long d'un transect nord-sud. On y voit que les températures stressantes surviennent près de la surface, c'est-à-dire dans les cinq premiers mètres pour LC4 et dans les six premiers mètres pour LC5. Dans les deux cas, le nombre de jours avec température stressante décroît de la surface vers le fond et du nord au sud. Le nombre de jours avec température stressante de la première couche correspond à la durée de la période avec température stressante pouvant être inférée des Figures 66 et 67. Les différences entre LC4 et LC5 sont petites : pour 2071-2100, 91 vs 94 jours à 53,75 °N, 76 vs 79 jours à 55,75 °N, et 57 vs 61 jours à 57,75 °N. Comme mentionné précédemment, la profondeur moyenne a relativement peu d'impact sur la durée de la période avec température stressante.

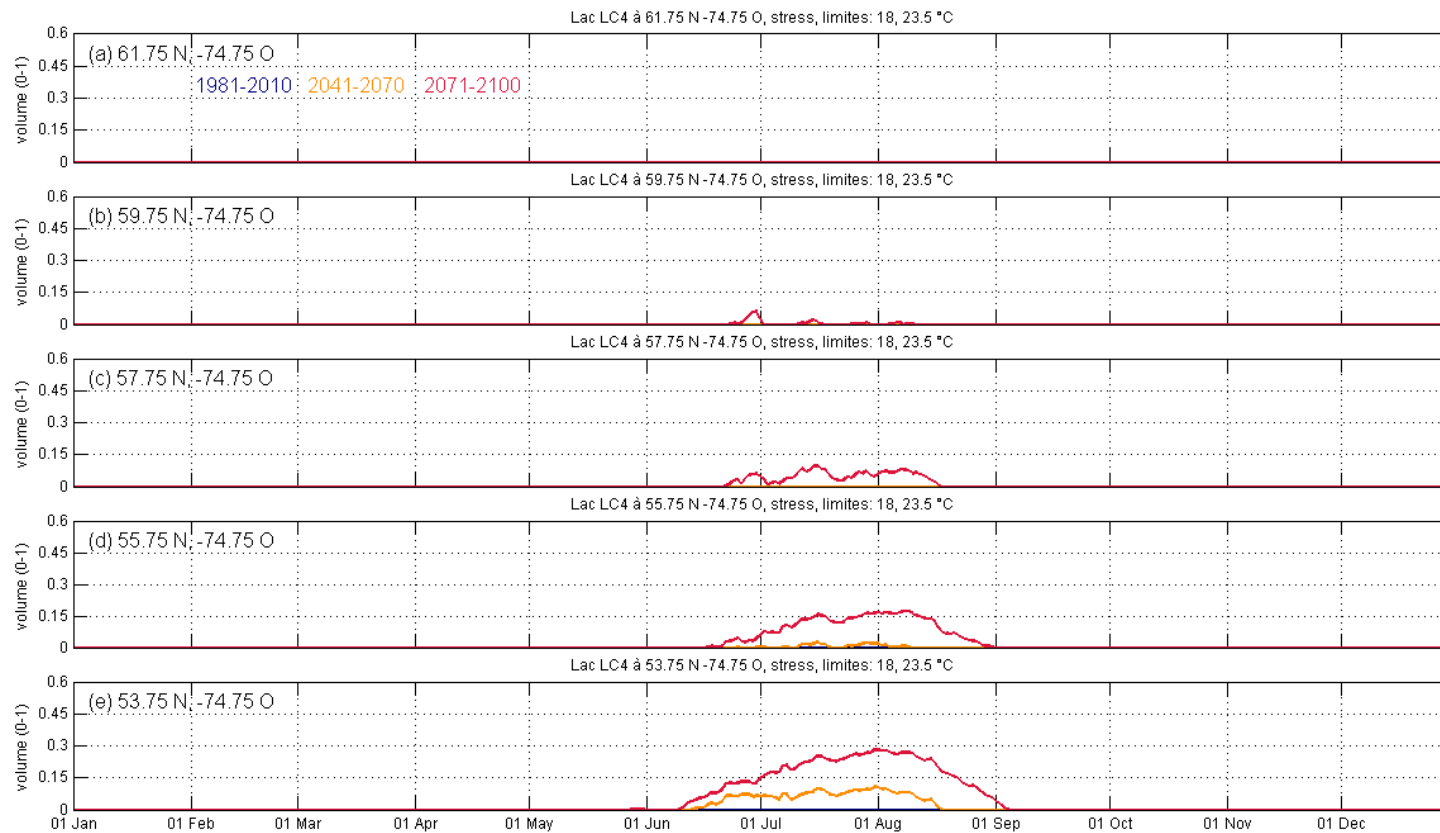


Figure 66. Lac type LC4, fraction du volume du lac avec température stressante pour le touladi adulte : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010. La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 18 et 23,5 °C.

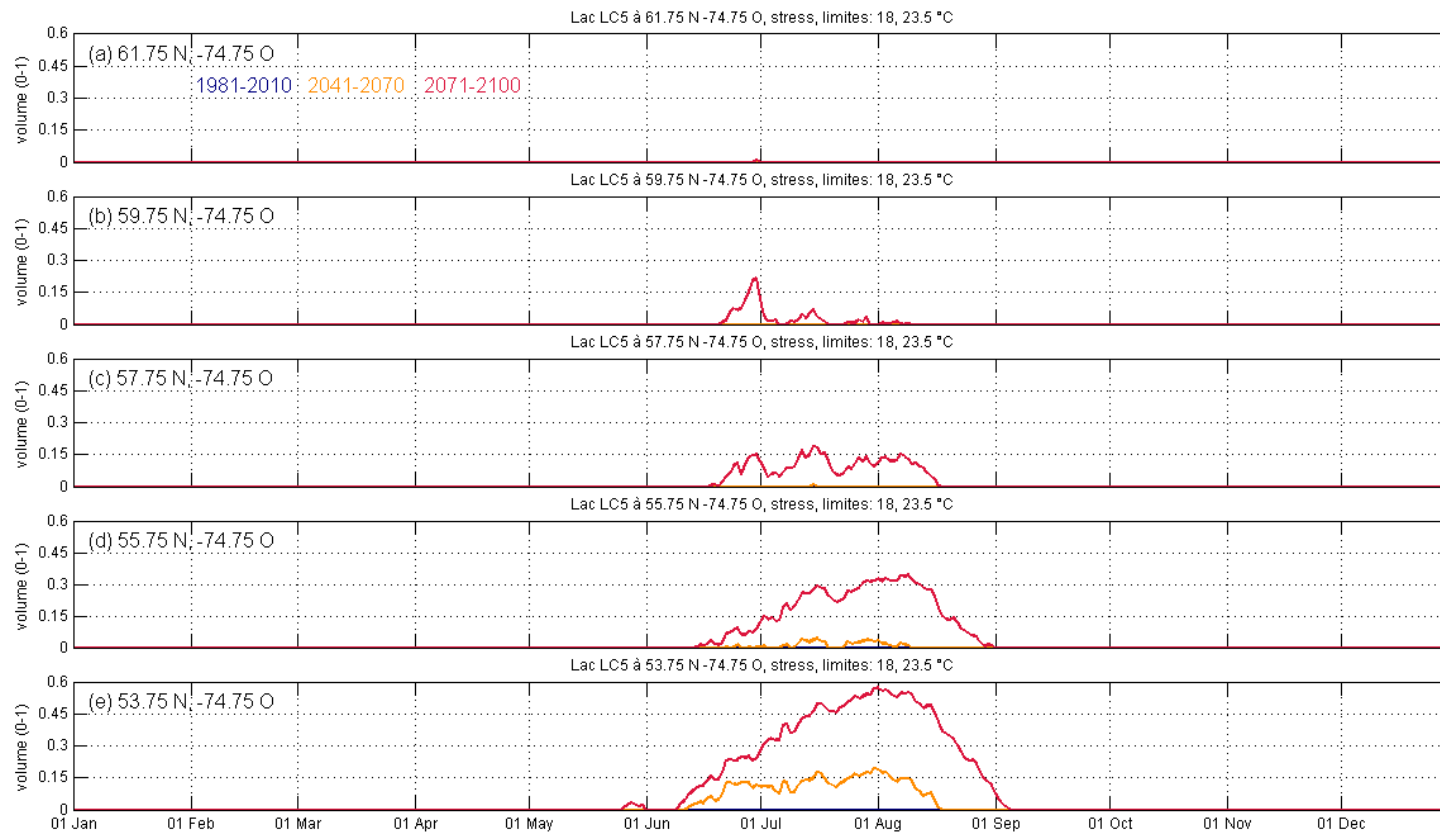


Figure 67. Lac type LC5, fraction du volume du lac avec température stressante pour le touladi adulte : évolution sur un cycle annuel à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010. La contribution du volume à une profondeur donnée est pondérée par la température : linéairement variable de 0 à 1 entre 18 et 23,5 °C.

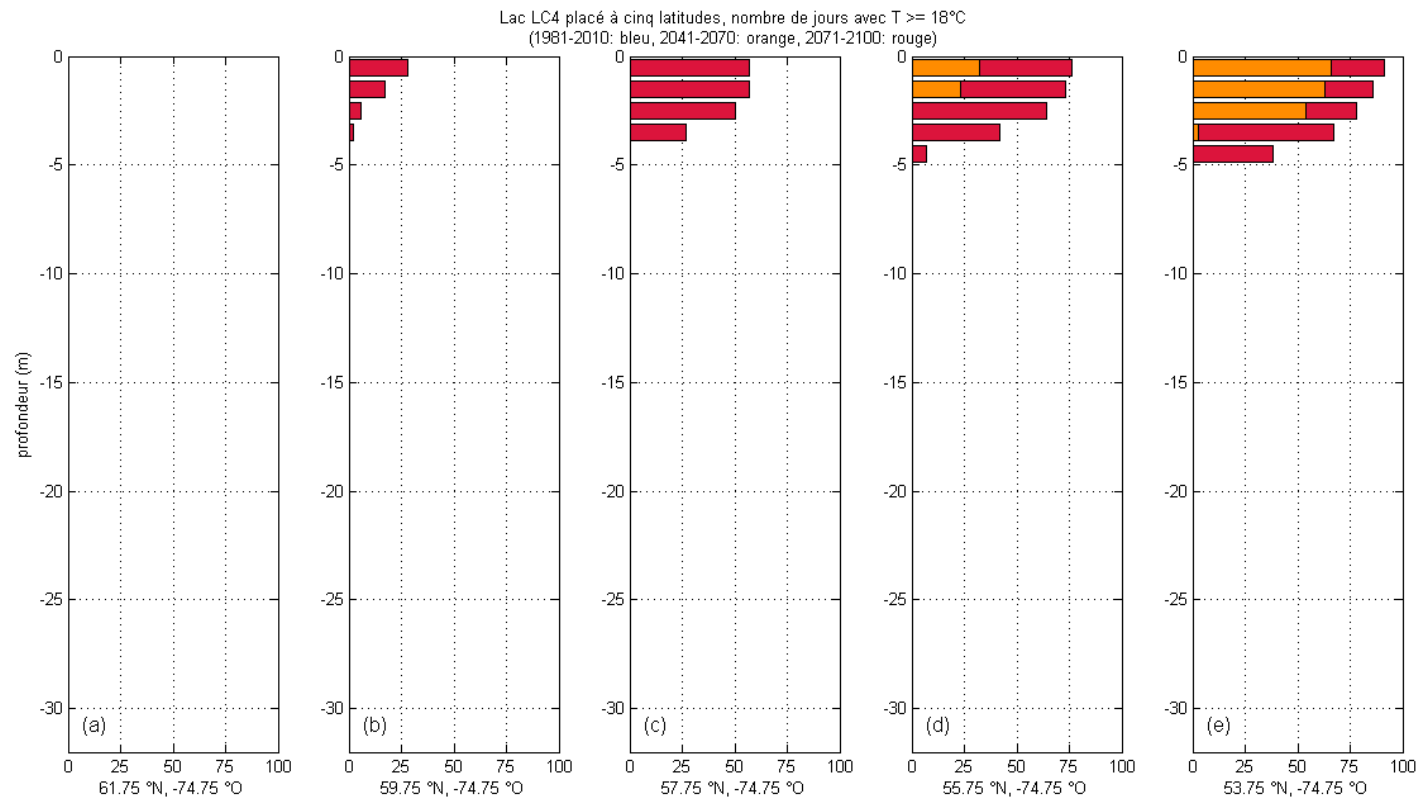


Figure 68. Lac type LC4, profils du nombre de jours avec température stressante pour le touladi adulte ($T \geq 18^\circ\text{C}$) à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010.

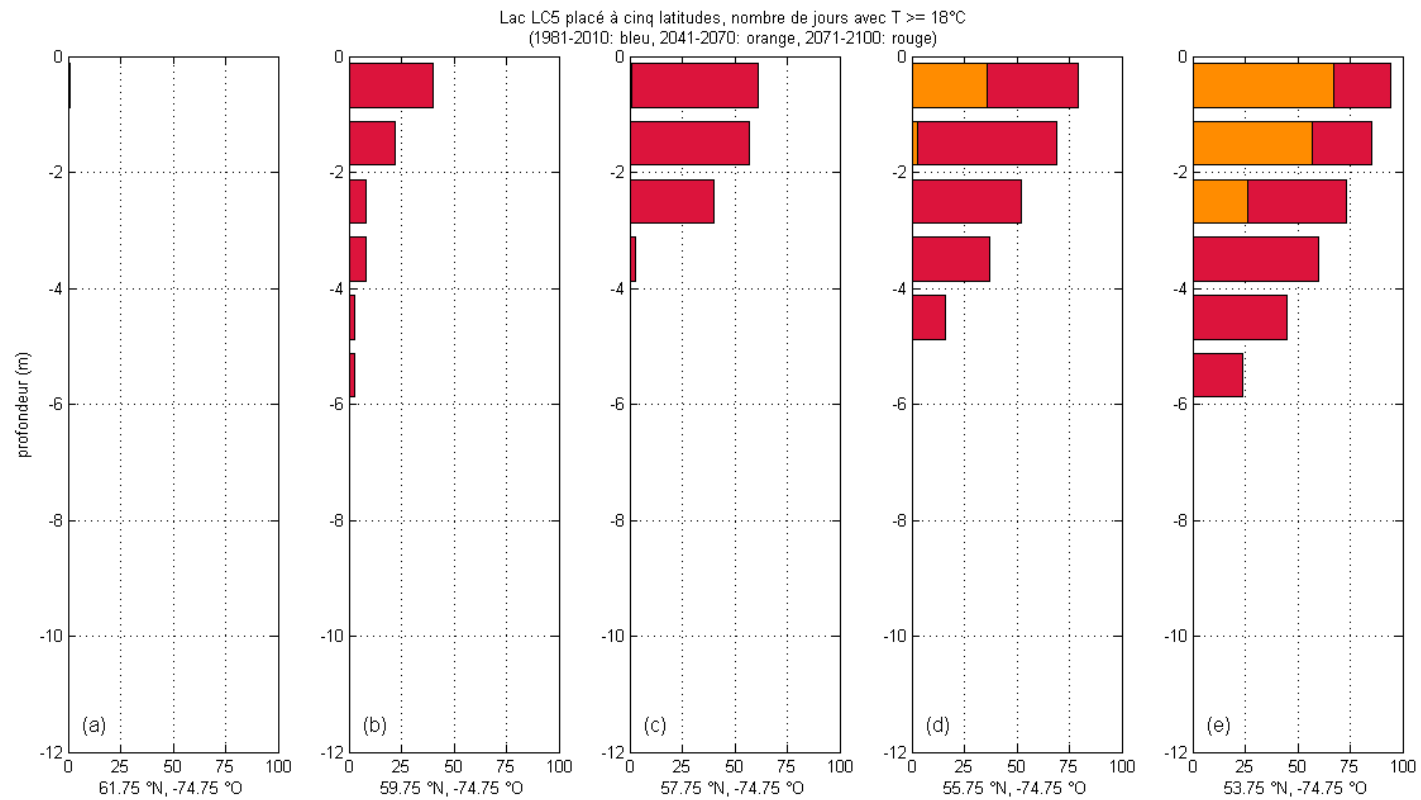


Figure 69. Lac type LC5, profils du nombre de jours avec température stressante pour le touladi adulte ($T \geq 18^\circ\text{C}$) à cinq latitudes le long d'un transect nord-sud et pour deux périodes, soit 2041-2070 (orange) et 2071-2100 (rouge). Les températures stressantes ne sont pas atteintes pour la période 1981-2010.

9.3 Oxygène dissous

Le traitement des concentrations, passées et futures, en oxygène dissous n'était pas dans le mandat qui nous a été confié par le MFFP. Cependant, il est possible de faire quelques inférences basées sur les travaux de Bélanger et al. (2017b) sur le touladi. Toutefois, les résultats de Bélanger et al. (2017b) ont été obtenus à l'aide des données de réanalyses NARR et nous avons vu (section 4.1) qu'il y a des différences parfois importantes entre les réanalyses NARR et CFSR. Les simulations futures pour l'oxygène dissous n'ont été obtenues que pour un petit lac : le lac Simoncouche. Ce lac est caractérisé par une profondeur maximale de 9 m, une profondeur moyenne de 2,16 m, une surface de 0,833 km² (ou 83.3 ha) et un volume de 1.80 x 10⁶ m³ (Tableau 3). Il entre donc dans la catégorie des lacs-types LC1, la catégorie qui représente le plus grand nombre de lacs du Nunavik, soit 35 971 lacs ou 37,71% des lacs. Le Lac-du-camp a été préféré au lac Simoncouche pour les simulations des lacs LC1 parce qu'il est situé plus au nord, soit sur l'île Bylot (Figure 20) et est donc plus caractéristique des petits lacs qui gèlent plus tôt en hiver. Si la discussion se limite aux différences entre 2071-2100 et 1980-2010 ainsi qu'entre 2041-2070 et 1981-2010, les biais devrait s'annuler et les tendances générales devraient être les mêmes, mêmes si les valeurs absolues pourraient varier légèrement.

Les habitats oxiques préférés (ou optimaux) du touladi seraient les régions où les concentrations en oxygène dissous dépasseraient les 6 mg L⁻¹ (Martin et Oliver, 1980) ou 7 mg L⁻¹ (Evans 2007) ou même 9 mg L⁻¹ (Plumb et Blanchfield, 2009). Evans affirme que l'oxygène dissous serait un meilleur indicateur que la température pour prédire l'habitat du touladi. Dans sa revue de la littérature récente, Duchesne (2020) résume ainsi l'impact des faibles concentrations en oxygène dissous : des concentrations sous les 3 mg L⁻¹ seraient létales tandis que des concentrations entre 3 mg L⁻¹ et 6 (ou 7) mg L⁻¹ seraient stressantes.

Les variables ayant le plus grand impact sur les concentrations en oxygène dissous sont la température, les dates de gel et de dégel, et le carbone organique dissous. La version du modèle MyLake avec l'oxygène dissous que nous avons utilisée est celle de Couture et al. (2015). Cette version nécessite beaucoup plus d'intrants que celle de Saloranta et Anderson (2007), entre autres les concentrations de carbone organique dissous (COD). Les concentrations de COD, locales et entrantes, varient très peu dans le lac Simoncouche : la moyenne des concentrations à 3 m et à 5 m entre 2011 et 2015 est de 6,01 ± mg L⁻¹. Tous les autres paramètres nécessaires au modèle sont décrits dans Bélanger et al. (2017b). Quatre pixels sont utilisés dans Bélanger et al. (2017b) pour analyser la variabilité nord-sud des concentrations en oxygène dissous. Les positions des pixels sont présentées à la Figure 70.

Une comparaison entre les observations et les simulations du 1^{er} mai 2011 au 1^{er} novembre 2012 est présentée à la figure 71. Les estimations des concentrations en oxygène dissous sont généralement bonnes, sauf près du fond. Les échanges d'oxygène en hiver entre l'air et la glace ainsi qu'entre l'eau et les sédiments près du fond devront être améliorés. Améliorer le modèle et traiter l'oxygène dissous pour les sept lacs-types prendrait de huit à dix mois.

Les Figures 72 et 73 présentent les différences à 1 m, 3 m et 5 m entre les concentrations en oxygène dissous pour la période 1981-2010 et celles des horizons futurs 2041-2070 et 2071-2100, respectivement. Même si les valeurs absolues estimées à l'aide des réanalyses NARR risquent d'être légèrement différentes de celles qui auraient été estimées à l'aide des réanalyses CFSR, les différences entre la situation présente et les horizons futurs des Figures 72 et 73 devraient être réalistes. Comme prévue, la glace fondra plus tôt au printemps et les concentrations commenceront à augmenter dès la fin du mois de mai dans le sud et les lacs demeureront oxygénés plus tard à l'automne. Au nord, les lacs sont légèrement plus oxygénés à toutes les profondeurs que les lacs plus au sud jusqu'à ce qu'un point tournant soit atteint, du moins pour les lacs de type LC1. La même situation prévaudra en 2041-2070 et en 2071-2100. Cependant, le début de l'oxygénation débutera au début mai en 2041-2070 mais à la fin avril en 2071-2100. Les patrons des comportements futurs sont similaires, mais l'intensité augmente avec le temps. Il est à noter que tous les panneaux ont une échelle verticale de 0 à 7 mg L⁻¹, à l'exception du premier panneau de la Figure 73 dont l'échelle varie de 0 à 9 mg L⁻¹.

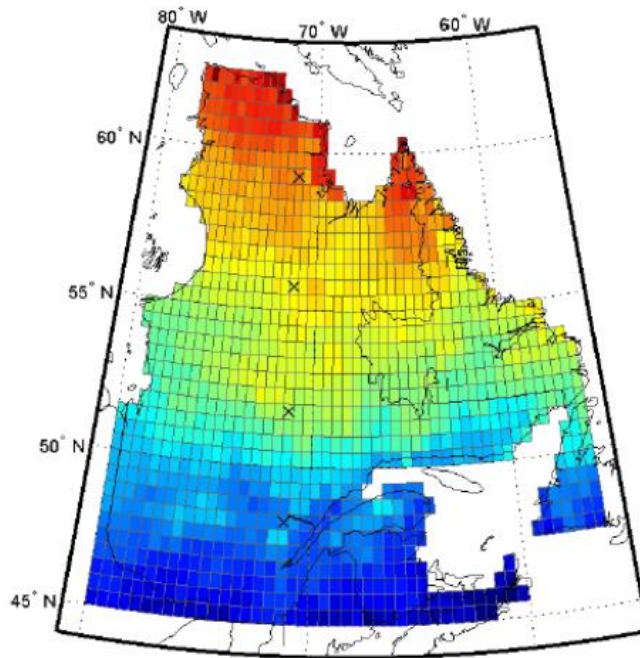


Figure 70. Positions des quatre pixels (les « x ») utilisés dans les comparaisons nord-sud de l'oxygène dissous présentées aux Figures 72 et 73. Tiré de Bélanger et al. (2017b)

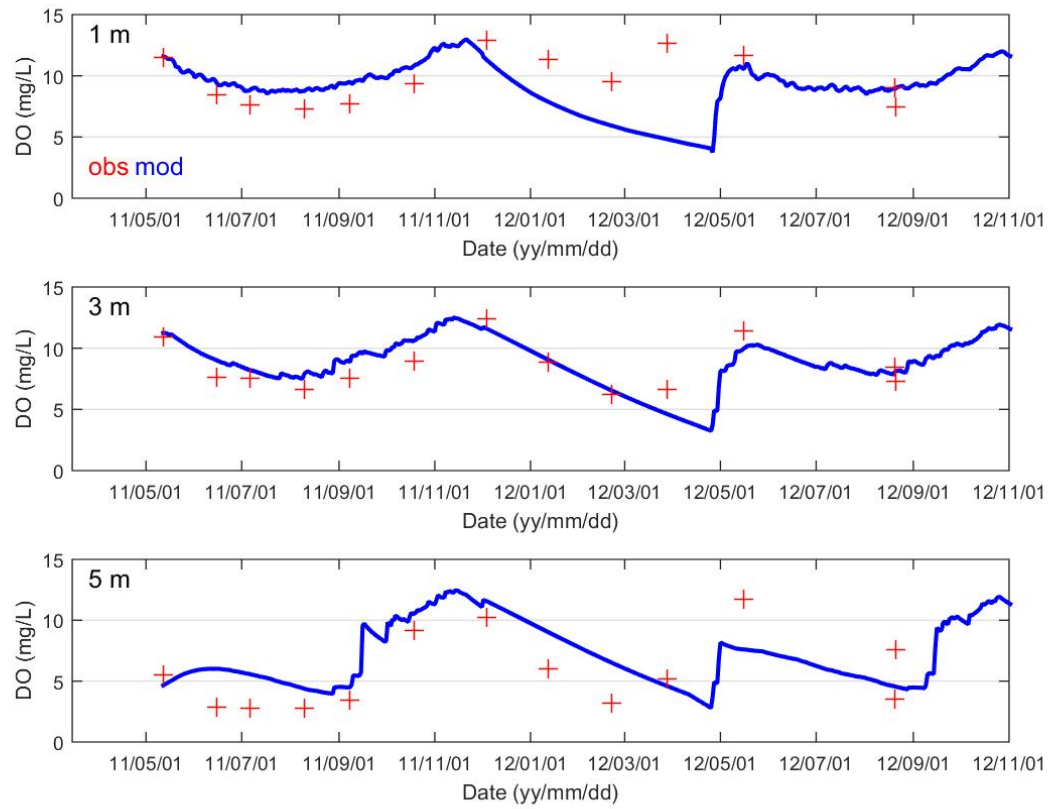


Figure 71. Comparaison des concentrations en oxygène dissous observées (+ rouges) et simulées (lignes bleues) dans le lac Simoncouche. Tiré de Bélanger et al. (2017b).

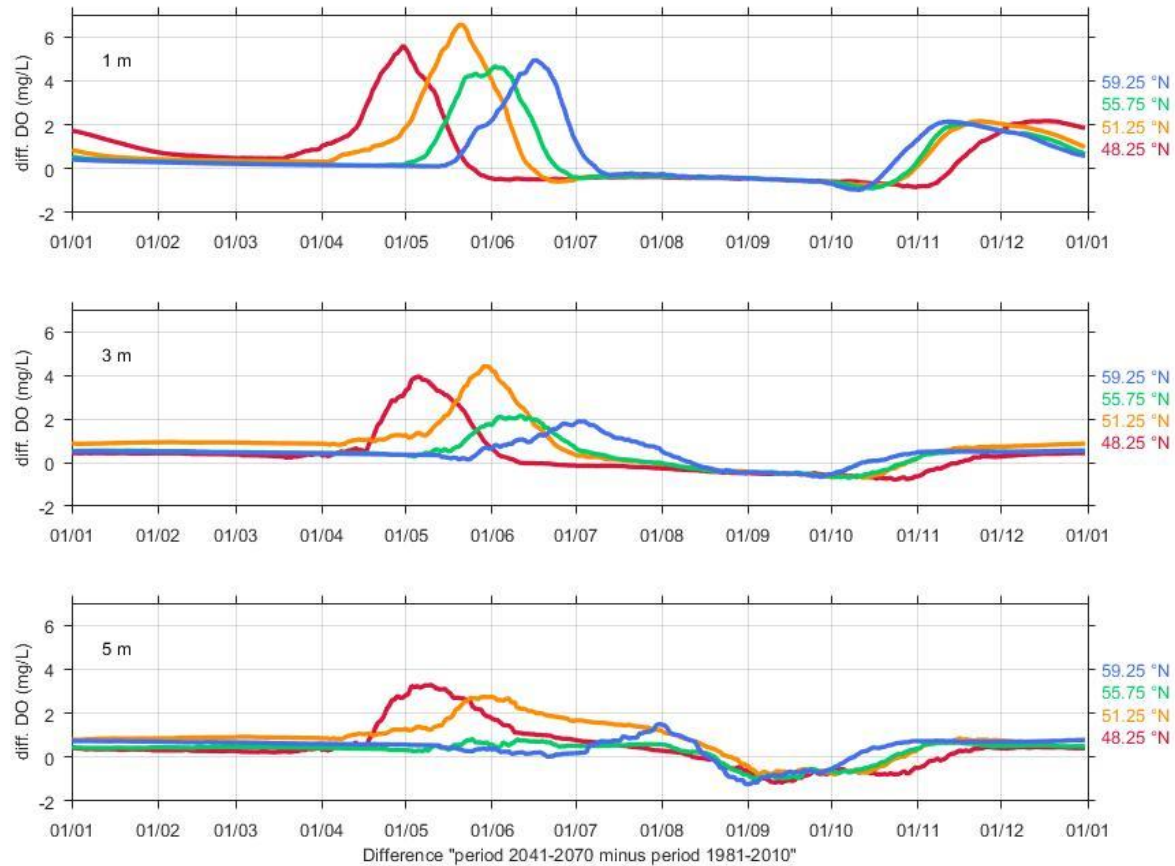


Figure 72. Différences dans les concentrations en oxygène dissous estimées entre les périodes 2041-2070 et 1981-2010 (futur moins passé) à quatre latitudes : 48.25 °N (en rouge), 51.25 °N (en orange), 55.75 °N (en vert) et 59.25 °N (en bleu). Tiré de Bélanger et al. (2017b).

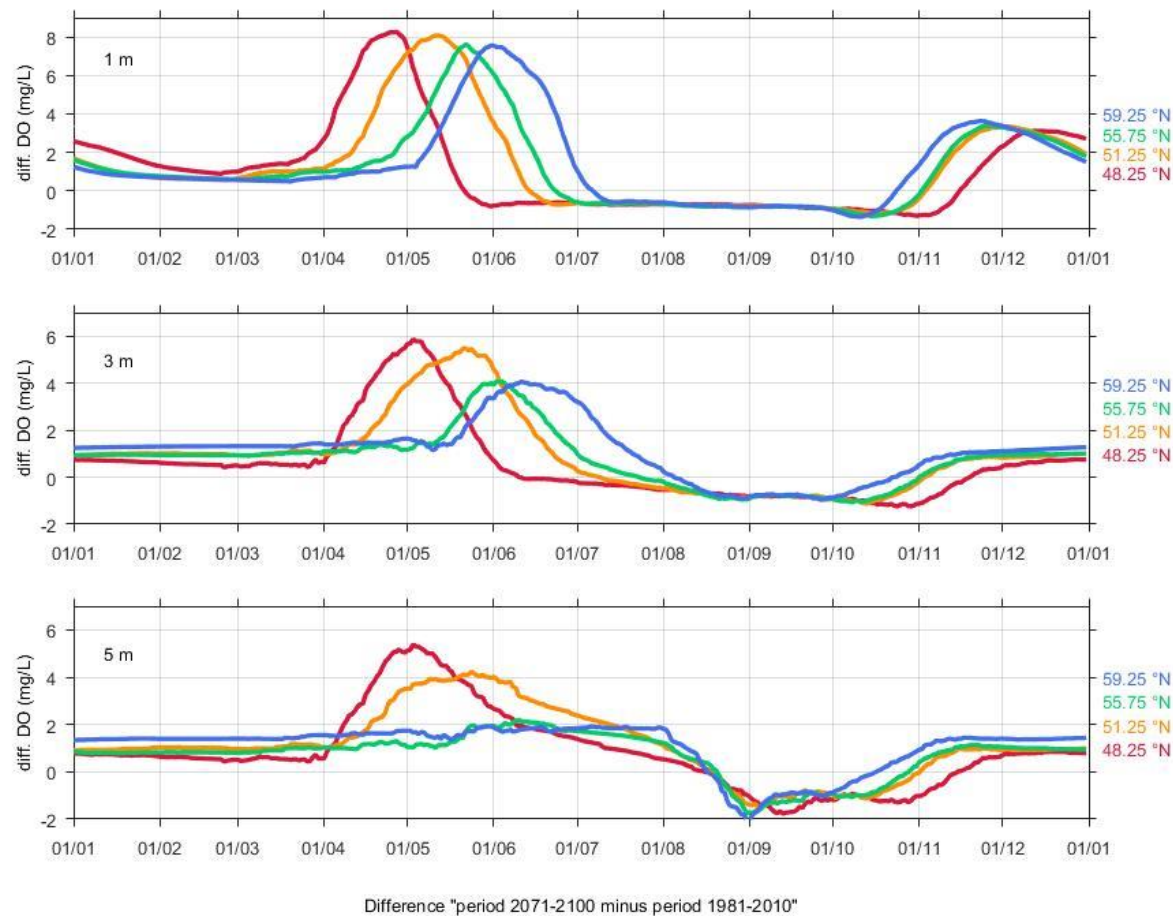


Figure 73. Différences dans les concentrations en oxygène dissous estimées entre les périodes 2071-2100 et 1981-2010 (futur moins passé) à quatre latitudes : 48.25 °N (en rouge), 51.25 °N (en orange), 55.75 °N (en vert) et 59.25 °N (en bleu). Tiré de Bélanger et al. (2017b).

10. Sommaire et Conclusion

L'objectif de ce projet était de déterminer l'impact des changements climatiques sur les habitats thermiques des salmonidés des lacs du Nunavik (au nord de 55° N). Plus particulièrement nous devons produire une cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques des salmonidés en lacs aux horizons 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour un nombre limité de lacs-types du nord du Québec. Nous avons réparti les 95 395 lacs retenus dans cette région en sept classes de lacs-types à l'aide d'une analyse en composantes principales suivie d'une classification ascendante hiérarchique. Les superficies et profondeurs moyennes des lacs-types considérés ont été obtenues de la classification de lacs réels sur le territoire d'étude. Suite à une modification du mandat, nous avons identifié un ensemble d'indicateurs physiques et biologiques des habitats du touladi et de l'omble chevalier basés sur la thermie des lacs. Ce sont ces indicateurs qui ont été présentés au chapitre précédent.

Le modèle MyLake, le Modèle régional canadien du climat (MRCC), des données bathymétriques et météorologiques pour trois lacs réels et des données de réanalyse Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) ont été utilisés pour dériver les cycles annuels de températures climatologiques passé (1981-2010) et futurs (2041-2070 et 2071-2100) pour sept lacs-types conceptuellement placés sur tout le territoire du Nunavik. Les projections utilisent le scénario de concentration en gaz à effet de serre RCP 8.5. Pour fin de modélisation, le territoire a été divisé en 410 pixels de 0,5° de latitude par 0,5° de longitude. Les résultats de la modélisation sont présentés sous forme de cartes pour quatre indicateurs physiques et cinq indicateurs biologiques.

Les conditions thermiques propices à la fraie devraient arriver plus tard dans le futur et le déclenchement de la fraie devrait aussi survenir plus tard. Les résultats ne laissent présager aucun problème particulier à venir quant à la survie des œufs advenant un retard de la fraie. Dans un contexte de réchauffement climatique, ce serait plutôt une fraie à date constante qui pourrait possiblement devenir problématique, exposant les œufs à des températures trop élevées. Quant à l'éclosion des œufs en dehors des conditions optimales pour la survie des alevins, ceci semble dans le domaine du possible, mais difficilement prévisible puisque résultant de la combinaison de divers facteurs biotiques et abiotiques. La disponibilité des fonds avec température favorable à la fraie devrait augmenter dans le futur pour le touladi alors qu'elle est toujours excellente pour l'omble chevalier en raison d'une gamme de températures adéquates beaucoup plus basse. Les températures propices à l'incubation devraient aussi arriver plus tard dans le futur et la disponibilité des fonds thermiquement favorables à l'incubation devraient aussi augmenter, plus spécialement pour les lacs de faible profondeur moyenne. Le nombre de degrés-jours avec température favorables à la survie des œufs accumulés en hiver devrait aussi augmenter dans le futur. Les changements projetés n'annoncent donc aucun préjudice direct particulier quant à la fraie et l'incubation des œufs, le tout se déroulant simplement plus tard. S'il y a préjudice, ce pourrait être d'ordre phénologique, l'occurrence de l'éclosion des œufs étant décalé sur le cycle annuel (i.e. match / mismatch avec divers facteurs biologiques et abiotiques). Ce

décalage découlerait du retard de la fraie modulé par un éventuel raccourcissement de la période d'incubation.

La disponibilité d'un habitat thermique favorable à la croissance des juvéniles devrait augmenter dans le futur, principalement à cause de l'allongement de la période avec une thermie favorable au printemps et à l'automne. Cependant, pour les lacs de faible profondeur moyenne, la part du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles pourrait diminuer considérablement au cœur de l'été au sud du domaine à l'horizon 2071-2100, soit jusqu'à ~34 % pour le touladi et ~16 % pour l'omble chevalier. Cette baisse estivale pourrait potentiellement être préjudiciable, surtout si elle continue de s'accroître au-delà de 2071-2100. On peut spéculer sur les conséquences d'une saison de croissance en deux parties entrecoupées d'une période défavorable.

Les températures létales pour le touladi et l'omble chevalier ne devraient jamais être atteintes à l'horizon 2071-2100, même au sud du domaine. Le touladi adulte apparaît davantage exposé aux températures stressantes que l'omble chevalier adulte puisque son seuil de stress thermique est plus bas (18 vs 21 °C). Les températures stressantes pour le touladi devraient devenir plus fréquentes à l'horizon 2071-2100. Elles devraient par contre restées confinées aux cinq ou six premiers mètres sous la surface. Le volume maximal du lac avec température stressante (exprimé en % du volume du lac) pourrait atteindre 62 % pour les lacs de faible profondeur moyenne lorsque situés au sud du domaine. En comparaison, le volume maximal pour l'omble chevalier n'est que de 39 %.

Si les changements projetés relativement à la fraie, la survie des œufs et la croissance des juvéniles apparaissent en général plutôt bénéfiques, par contre l'exposition à des températures stressantes au cœur de l'été apparaît plus potentiellement préjudiciable à ces espèces, particulièrement au touladi. Les situations problématiques devraient d'abord se développer dans les lacs de faible profondeur moyenne au sud du domaine et puis progresser par la suite vers le nord. Cela semble d'autant plus inquiétant si on considère 1) que les volumes projetés avec température stressante sont des valeurs pondérées entre les limites de stress et létale, 2) que les projections sont pour un cycle annuel moyen et que les poissons seront exposés à des conditions encore plus préjudiciables certaines années, 3) que certaines études proposent pour le touladi des limites de confort et de tolérance pour une occupation à long terme plus basses que le seuil de stress considéré (respectivement 12 et 15 °C; Plumb and Blanchfield, 2009), et 4) que les changements projetés tendent à s'accroître au cours des neuf décennies entre 1981-2010 et 2071-2100 et qu'il semble peu probable qu'ils s'arrêtent à la fin du siècle. Cependant, il n'est heureusement pas encore certain que les concentrations en gaz à effet de serre finissent par suivre le scénario RCP 8.5.

Références

- Allard, M. and M. Lemay, 2012. Nunavik and Nunatsiavut: An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate change and modernization. ArcticNet Inc., Québec City, Canada, 303 p.
- Arora, V.K., J. F. Scinocca, G. J. Boer, J. R. Christian, K. L. Denman, G. M. Flato, V. Kharin, W. G. Lee, and W. J. Merryfield, 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases, *Geophys. Res. Lett.* 38, L05805, doi:10.1029/2010GL046270.
- Bélangier, C., Y. Gratton, A. St-Hilaire et I. Laurion, 2017a. Cartographie des variations spatiales et futures de la disponibilité des habitats thermiques favorables aux salmonidés dans les lacs du Québec : méthodologie et exemples. Rapport No R1715, INRS-ETE, Québec (Qc), 152 p.
- Bélangier, C., R.-M. Couture, Y. Gratton, I. Laurion, T. Logan, M. Rautio and A. St-Hilaire, 2017b. Impacts of climate changes on dissolved oxygen concentrations in Québec Province lakes. Report No R1752, INRS-ETE, Québec (QC): viii + 48 p.
- Bélangier, C., Y. Gratton, A. St-Hilaire et I. Laurion, 2016. Influence de la profondeur moyenne d'un lac sur la température de l'eau et variations latitudinales : Une étude de sensibilité menée à l'aide du modèle unidimensionnel MyLake. Rapport (non-publié) soumis au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parc, Mars 2016, 40 p.
- Bélangier, C., D. Huard, Y. Gratton, D.I. Jeong, A. St-Hilaire, J.-C. Auclair¹ et I. Laurion, 2013 Impacts des changements climatiques sur l'habitat des salmonidés dans les lacs nordiques du Québec. Rapport de recherche (R1514) présenté à Ouranos (juin 2013, 167 p. <http://espace.inrs.ca/2404/>
- 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
- Chimi Chiadjeu, O., Y. Gratton et A. St-Hilaire, 2016. Analyse multivariée des paramètres morphologiques des lacs de la province de Québec. Rapport No R1684, INRS-ETE, Québec (QC): vi + 23 p.
- Couture, R.-M., H.A. de Wit, K. Tominaga, P. Kiuru, and I. Markelov, 2015. Oxygen dynamics in a boreal lake responds to long-term changes in climate, ice phenology and DOC inputs. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 120, 2441-2456, doi :10.1002/2015JG003065.

- 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/10.1080/02626667.2016.124286>.
- Duchesne, V., 2020. Préférences thermiques et en oxygène du touladi *Salvelinus Namaycush*: Juvéniles-Adults-Oeufs. Québec.
- Evans, D.O. 2007. « Effects of hypoxia on scope-for-activity and power capacity of lake trout (*Salvelinus namaycush*). » *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64 (2). NRC Research Press: 345-361.
- Ford, D.E. and H. Stefan, 1980. Stratification variability in three morphometrically different lakes under identical meteorological forcing. *Water Res. Bul.* 16, 243-247.
- Gratton, Y. and C. Bélanger, 2018. Alberta Lakes Thermodynamic Modelling. Report No R1788, INRS-ETE, Québec (QC): 91 p + V.
- Grubbs, F. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in samples. *Technometrics*, **11** (1): 1–21. [doi:10.2307/1266761](https://doi.org/10.2307/1266761).
- Hersbach, H., B. Bell and thirty-six other co-authors, 2020. The ERA5 Global Reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* p. 1–51.
- Huard D., D. Chaumont, T. Logan, M.-F. Sottile, R.D. Brown, B. Gauvin St-Denis, P. Grenier, M. Braun, 2014. A decade of climate scenarios – The Ouranos Consortium modus operandi. *B. Am. Meteorol. Soc.*, I:10.1175/BAMS-D-12-00163.1.
- 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>.
- Lin, S.-J., 2004. A vertically Lagrangian finite-volume dynamical core for global models. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2293–2307.
- Mailhot, A. et D. Chaumont, 2017. Élaboration du portrait bioclimatique futur du Nunavik – Tome I. Rapport présenté au Ministère de la forêt, de la faune et des parcs. Ouranos, 216 p.
- Martin, N. V et C.H. Olver. 1980. « The lake charr, *Salvelinus namaycush*. » In *Charrs: salmonid fishes of the genus Salvelinus*, sous la dir. de Balon Ek, 205-277. s.l.: Dr. W. Junk Publishing.
- Mesinger F., G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P.C. Shafran, W. Ebisuzaki, D. Jović, J.

- Woollen J, E. Rogers, E.H. Berbery, M.B. Ek, Y. Fan, R. Grumbine, W. Higgins, H. Li, Y. Lin, G. Manikin, D. Parrish, W. Shi, 2006. North American Regional Reanalysis. B. Am. Meteorol. Soc., DOI:10.1175/BAMS-87-3-343.
- Nelitz, M., C. Alexander, K. Wieckowski et P. Council, 2007. «Helping Pacific salmon survive the impact of climate change on freshwater habitats: Case Studies».
- 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.
- Saha, S., and Coauthors, 2014. The NCEP Climate Forecast System Version 2. J. Climate, 27, 2185-2208
- 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)
- Plumb, J.M. and P.J. Blanchfield. 2009. « Performance of temperature and dissolved oxygen criteria to predict habitat use by lake trout (*Salvelinus namaycush*). » *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66 (2011-2023).
- Rapaić, M. R. Brown, M. Markovic and D. Chaumont, 2015. An Evaluation of Temperature and Precipitation Surface-Based and Reanalysis Datasets for the Canadian Arctic, 1950–2010, *Atmosphere-Ocean*, 53:3, 283-303, DOI: 10.1080/07055900.2015.1045825
- Rienecker, M.M., M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takacs, GéK. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A.da Silva W. Gu, J. Joiner, R. D. Koster, R. Lucchesi, A. Molod, T. Owens, S. Pawson, P. Pegion, DC. Redder, R. Reichle, RF. R. Robertson, A.G. Ruddick, M. Sienkiewicz, and J. Woollen, 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624-3648.
- Saloranta, T.M. and T. Andersen, 2007. MyLake – a multi-year lake simulation model suitable for uncertainty and sensitivity analysis simulations. *Ecol. Model.*, 207, 45-60.
- Saloranta, T.M. and T. Andersen, 2005. MyLake (v.1.2): Technical model documentation and user's guide for version 1.2. NIVA, Oslo, Unpublished report, 32 p.
- Sheffield, J., G. Goteti, and E.F. Wood, 2006: Development of a 50-yr high-resolution

global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *J. Climate*, **19(13)**, 3088-3111.

Ward, J. Jr, 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58 (1301): 236-244.

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.

Annexe I: Bathymétrie des lacs-types

A1.1 Dérivation des bathymétries

Le modèle MyLake simule la température à plusieurs couches et requiert l'aire et l'épaisseur de chacune de ces couches. L'aire des couches est obtenue de données bathymétriques. Les bathymétries des lacs types ont été dérivées à partir de bathymétries réelles et des valeurs médianes de superficie et de profondeur moyenne des sept classes identifiées par le processus de classification. On notera que le développement du rivage a été considéré pour la classification mais n'intervient pas dans la dérivation de la bathymétrie des lacs types. Chimi Chiadjeu et al. (2016) ont montré que statistiquement les valeurs médianes représentaient mieux une classe que les valeurs moyennes.

La superficie en surface, le volume, la profondeur maximum et la profondeur moyenne des lacs-types modélisés sont donnés dans le Tableau 29. Comme les profondeurs maximales des lacs-types sont inconnues, le choix du lac réel pouvant être « transformé » en lac-type est uniquement basé sur la superficie en surface et la profondeur moyenne (soit le volume divisé par la superficie en surface). Le nombre de couches d'un lac-type donné est fixé par le nombre de couches du lac réel à partir duquel sa bathymétrie a été dérivée. La superficie de chacune des couches d'un lac-type est obtenue par application d'un facteur « superficie désirée en surface / superficie du lac réel en surface » aux superficies du lac réel. La superficie en surface du lac-type est donc telle que désirée. Les superficies des couches sous-jacentes sont ensuite ajustées de manière à ce que 1) la profondeur moyenne du lac-type soit celle désirée, 2) le pourcentage du volume d'une couche donnée par rapport au volume total soit au plus près possible du pourcentage estimé pour le lac réel, et 3) la superficie des couches décroît de la surface vers le fond.

Nous avons modélisé les lacs-types correspondant aux sept classes du Tableau 29. Les bathymétries des lacs-types ont été dérivées à partir des valeurs médianes d'aire en surface et de profondeur moyenne pour la classe considérée. Les valeurs médianes pour l'aire en surface sont toujours plus petites que les valeurs moyennes, suggérant qu'il y a plus de grands lacs avec une superficie largement supérieure à la médiane qu'il y a de petits lacs avec une superficie largement inférieure à la médiane. Les écarts entre valeurs médianes et moyennes sont différents pour la profondeur moyenne : la valeur médiane n'est inférieure à la moyenne que pour deux des quatre classes considérées et les écarts sont moins marqués.

Les bathymétries des lacs-types LC1, LC3 et LC5 ont été dérivées à partir de la bathymétrie du Lac-du-Camp sur l'Île Bylot (BLC). Les bathymétries de trois des quatre autres lacs ont été dérivées à partir de celles des lacs albertains que nous avons modélisés dans le passé. La bathymétrie du lac LC2 a été dérivée à partir de la bathymétrie du lac Nakamun (NKM), la bathymétrie du lac LC4 à partir de la bathymétrie du lac Ethel (ETL) et les bathymétries des lacs LC6 et LC7 à partir de la bathymétrie des lacs Baptiste-sud (BPTS) et Jacques-Cartier (JAC), respectivement. Les bathymétries des modèles des lacs LC1, LC3 et LC5 comprennent donc douze couches de 1 m, et celle du lac LC2 neuf

couches de 1 m. Les lacs LC4, LC6 et LC7 possèdent 32, 27 et 56 couches, respectivement. Les Tableaux 30, 31, 32, 33 et 34 présentent les bathymétries des lacs-types modélisés au côté de celles des lacs réels à partir desquels elles ont été dérivées : le Tableau 30 pour LC1, LC3 et LC5, le Tableau 33 pour LC2, le Tableau 32 pour LC4 et le Tableau 33 pour LC6 et le Tableau 34 pour LC7. La Figure 74 présente l'aire en fonction de la profondeur pour chacun des lacs types, de même que le rayon en fonction de la profondeur supposant une surface circulaire à toutes les profondeurs.

A1.2 Modélisation du lac Ethel

Le lac Ethel (ETL) est un lac d'Alberta situé à 54.533 °N et -110.350 °O. Sa superficie est de 535,3 ha, sa profondeur maximale est de ~30 m et sa profondeur moyenne est de 7,0 m. Les données bathymétriques utilisées pour construire le modèle et les données de température utilisées pour fin de comparaison ont été fournies par M. Paul Drevnick (Alberta Environment and Parks). Le modèle pour ETL a 30 couches de 1 m d'épaisseur. La période de calibration va du 13 mai 1980 au 28 août 1985 (cinq ans). Les séries de température ont été construites à partir de 62 profils échantillonnés sur cette période. Les données météorologiques de la station Cold Lake (~13,6 km de ETL) ont été utilisées pour forcer le modèle, à l'exception de la radiation globale et de la couverture nuageuse pour lesquelles des données NARR au point de grille le plus près (~8,8 km) ont été utilisées. Pour plus d'information sur la calibration ETL, voir Gratton et Bélanger (2018). La Figure 75 présente une comparaison des températures observées et simulées à six profondeurs pour le lac ETL. Le modèle reproduit de manière satisfaisante les températures observées sur toute la colonne d'eau.

A1.3 Modélisation du lac Baptiste South

Le lac Baptiste (BPT) est un lac d'Alberta avec deux bassins (nord et sud) séparés par passage relativement étroit et les deux bassins ont été modélisés séparément. Le lac Baptiste South (BPTS) est situé à 54.737 °N et -113.550 °O. Sa superficie est de 485,3 ha, sa profondeur maximale est de ~27 m et sa profondeur moyenne est de 12,8 m. Les données bathymétriques utilisées pour construire le modèle et les données de température utilisées pour fin de comparaison ont été fournies par M. Paul Drevnik (Alberta Environment and Parks). Le modèle pour BPTS a 27 couches de 1 m d'épaisseur. La période de calibration va du 27 mai 2003 au 26 février 2008 (presque cinq ans). Les séries de température ont été construites à partir de 28 profils échantillonnés sur cette période. Les données météorologiques utilisées pour forcer le modèle proviennent de trois stations : Dapp AGDM, Athabasca 2 et Athabasca 1 (à environ 60,8 km, 7,5 km et 24,1 km du lac Baptiste). Les données de réanalyse NARR au point de grille le plus près (~13,6 km de BPT) ont été utilisées pour la radiation globale et la couverture nuageuse, de même que pour la pression atmosphérique puisqu'aucune donnée à moins de 100 km n'était disponible pour la période simulée. Pour plus d'information sur la calibration BPTS, voir Gratton et Bélanger (2018). La Figure 76 présente une comparaison des températures observées et simulées à six profondeurs pour le lac BPTS. Le modèle reproduit de manière satisfaisante les températures observées sur toute la colonne d'eau.

Tableau 29. Superficie en surface, volume, profondeur maximale et profondeur moyenne des sept lacs types et des lacs réels ayant servi à dériver les bathymétries des lacs types. Le lac réel utilisé est indiqué entre parenthèses à côté du nom du lac type.

Lac	Latitude	Longitude	Superficie en surface (ha)	Volume (m ³)	Profondeur maximale (m)	Profondeur moyenne (m)
Baptiste South	54.737 °N	113.550 °O	485.3	6.22E+07	~27	12.82
Bylot (Camp)	73.1544 °N	79.9693 °O	21.0	7.97E+05	~12	3.80
Chibougamau	49.8262 °N	74.2781 °O	21305.7	1.90E+09	~59	8.93
Jacques-Cartier	47.5836 °N	71.2200 °O	1256.6	2.81E+08	~68	22.34
Nakamun	53.884 °N	114.210 °O	276.3	1.10E+07	~9	3.97
LC1 (BLC)	–	–	15.2	4.30E+05	~12	2.828 (visée : 2.828)
LC2 (NKM)	–	–	185.4	7.30E+06	~9	3.939 (visée : 3.940)
LC3 (BLC)	–	–	26.2	1.41E+06	~12	5.384 (visée : 5.384)
LC4 (CHI)	–	–	2186.1	1.81E+08	~32	8.274 (visée : 8.274)
LC5 (BLC)	–	–	29.7	1.11E+06	~12	3.733 (visée : 3.733)
LC6 (BPTS)	–	–	42.0	5.82E+06	~27	13.879 (visée : 13.879)
LC7 (JAC)	–	–	14177.0	2.43E+09	~56	17.138 (visée : 17.138)

Tableau 30. Bathymétrie du modèle du lac BLC et bathymétries des modèles des lacs-types LC1, LC3 et L5 dérivées à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.

Profondeur (m)	Aire à profondeur (m ²)			
	BLC	LC1	LC3	LC5
0,0	209611,5	152140,4	261711,5	297184,5
0,5	192488,1	103959,6	261000,6	268104,1
1,5	170612,1	92144,7	254557,2	237634,3
2,5	154681,2	83540,8	253963,4	215445,3
3,5	121820,5	65793,2	232560,2	169675,7
4,5	50943,9	27514,0	151255,8	70956,5
5,5	35577,1	19214,6	103409,6	49553,0
6,5	26667,6	14402,7	66192,4	37143,5
7,5	20633,5	11143,8	45083,7	28739,1
8,5	14304,1	7725,4	25539,0	19923,2
9,5	7395,7	3994,3	13112,2	10301,0
10,5	1389,7	750,6	2342,5	1935,7
11,5	10,4	5,6	19,4	14,7
12,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Couche	% du volume total			
	BLC	LC1	LC3	LC5
1	24,17	24,17	18,52	24,17
2	21,42	21,42	18,07	21,42
3	19,42	19,42	18,02	19,42
4	15,29	15,29	16,50	15,29
5	6,40	6,40	10,73	6,40
6	4,47	4,47	7,34	4,47
7	3,35	3,35	4,70	3,35
8	2,59	2,59	3,20	2,59
9	1,80	1,80	1,81	1,80
10	0,93	0,93	0,93	0,93
11	0,17	0,17	0,17	0,17
12	0,001	0,001	0,001	0,001

Tableau 31. Bathymétrie du modèle du lac NKM et bathymétrie du modèle du lac-type LC2 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.

Profondeur (m)	Aire à profondeur (m²)	
	NKM	LC2
0,0	2762500,0	1853508,0
0,5	2613750,0	1736166,7
1,5	2283750,0	1516966,3
2,5	1923750,0	1277838,6
3,5	1555000,0	1032898,8
4,5	1151250,0	772434,8
5,5	777500,0	521666,1
6,5	465000,0	311993,2
7,5	176250,0	118255,5
8,5	20000,0	13419,1
9,5	0,0	0,0
Couche	% volume total	
	NKM	LC2
1	23,83	23,78
2	20,83	20,78
3	17,54	17,50
4	14,18	14,15
5	10,50	10,58
6	7,09	7,14
7	4,24	4,27
8	1,61	1,62
9	0,18	0,18

Tableau 32. Bathymétrie du modèle du lac CHI et bathymétrie du modèle du lac-type LC4 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.

Profondeur (m)	Aire à profondeur CHI (m²)	Aire à profondeur LC4 (m²)		Couche (LC4)	% volume total (LC4)
0,0	213056877,0	21861316,5		1	10,59
0,5	199293432,2	20449078,5		2	9,13
1,5	171766542,8	17624602,4		3	8,08
2,5	152052130,6	15601748,2		4	7,45
3,5	140150195,7	14380515,8		5	6,84
4,5	128572865,4	13192590,4		6	6,24
5,5	117320139,6	12037971,9		7	5,64
6,5	106067413,8	10883353,5		8	5,04
7,5	94814688,1	9728735,0		9	4,57
8,5	85971417,9	8821345,8		10	4,23
9,5	79537603,3	8161185,6		11	3,89
10,5	73103788,8	7501025,5		12	3,54
11,5	66669974,2	6840865,3		13	3,20
12,5	60236159,6	6180705,2		14	2,86
13,5	53802345,1	5520545,1		15	2,52
14,5	47368530,5	4860384,9		16	2,18
15,5	40934715,9	4200224,8		17	1,92
16,5	36143517,5	3708610,1		18	1,75
17,5	32994935,3	3385540,7		19	1,59
18,5	29846353,1	3062471,3		20	1,42
19,5	26697770,9	2739401,9		21	1,25
20,5	23549188,7	2416332,6		22	1,08
21,5	20400606,5	2093263,2		23	0,92
22,5	17252024,2	1770193,8		24	0,75
23,5	14103442,0	1447124,4		25	0,63
24,5	11938481,1	1224982,3		26	0,57
25,5	10757141,6	1103767,6		27	0,51
26,5	9575802,0	982552,8		28	0,45
27,5	8394462,4	861338,1		29	0,38
28,5	7213122,8	740123,3		30	0,32
29,5	6031783,3	618908,6		31	0,26
30,5	4850443,7	497693,8		32	0,20
31,5	3669104,1	376479,0			
32,0	0,0	0,0			

Tableau 33. Bathymétrie du modèle du lac Baptiste-sud et bathymétrie du modèle du lac-type LC6 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.

Profondeur (m)	Surface BPTS (m2)	Surface LC6 (m2)		Couche (LC6)	% volume total
0	4852500	419521,7			
0,5	4790000	414118,2778		1	7,12
1,5	4656250	402554,9543		2	6,98
2,5	4495000	388614,125		3	6,81
3,5	4275000	369594,0788		4	6,57
4,5	4018750	347440,0478		5	6,30
5,5	3756250	324745,6745		6	6,00
6,5	3492500	301943,2328		7	5,63
7,5	3282500	283787,7342		8	5,31
8,5	3116250	269414,6311		9	5,09
9,5	2962500	256122,2125		10	4,86
10,5	2821250	243910,4783		11	4,65
11,5	2680000	231698,7442		12	4,44
12,5	2555000	220891,8997		13	4,25
13,5	2425000	209652,7816		14	4,05
14,5	2285000	197549,1158		15	3,83
15,5	2147500	185661,587		16	3,62
16,5	1977500	170964,2786		17	3,36
17,5	1763750	152484,5746		18	3,01
18,5	1512500	130762,8174		19	2,59
19,5	1203750	104069,9117		20	2,07
20,5	845000	73054,26821		21	1,46
21,5	490000	42362,83009		22	0,85
22,5	270000	23342,78393		23	0,47
23,5	181250	15669,92439		24	0,32
24,5	118750	10266,50219		25	0,21
25,5	67500	5835,695981		26	0,12
26,5	20000	1729,095106		27	0,03
27	0	0		28	0

Tableau 34. Bathymétrie du modèle du lac Jacques-Cartier et bathymétrie du modèle du lac-type LC7 dérivée à partir de celle-ci : aire et pourcentage de la part du volume du lac-type pour chacune des couches de 1 m d'épaisseur.

Profondeur (m)	Aire à profondeur JAC (m²)	Aire à profondeur LC7 (m²)		Couche (LC7)	% volume total (LC7)
0	12566000	141769772,3			
0,5	12565935	141769039		1	5,66
1,5	10539486	118906615,5		2	4,55
2,5	10034253	113206570,3		3	4,19
3,5	9567711	107943037,6		4	3,87
4,5	9132354	103031334,3		5	3,60
5,5	8771490	98960062,07		6	3,36
6,5	8474067	95604531,99		7	3,23
7,5	8218197	92717803,39		8	3,11
8,5	7978068	90008664,95		9	3,00
9,5	7793064	87921447,46		10	2,91
10,5	7618473	85951709,57		11	2,83
11,5	7466454	84236629,27		12	2,76
12,5	7310889	82481542,96		13	2,68
13,5	7133391	80479008,26		14	2,60
14,5	6948927	78397883,06		15	2,52
15,5	6734385	75977417,48		16	2,42
16,5	6514677	73498669,02		17	2,33
17,5	6320691	71310116,49		18	2,25
18,5	6133563	69198936,01		19	2,16
19,5	5963076	67275499,5		20	2,09
20,5	5804739	65489139,45		21	2,02
21,5	5644971	63686634,83		22	1,95
22,5	5493024	61972366,84		23	1,89
23,5	5353461	60397815,29		24	1,83
24,5	5216931	58857482,09		25	1,77
25,5	5086530	57386296,35		26	1,71
26,5	4953051	55880384,57		27	1,66
27,5	4799142	54143981,26		28	1,59
28,5	4643568	52388793,41		29	1,53
29,5	4496913	50734229,83		30	1,47
30,5	4366206	49259591,79		31	1,42
31,5	4234536	47774089,17		32	1,37
32,5	4118436	46464247,49		33	1,32
33,5	3982554	44931225,03		34	1,27

34,5	3845034	43379722,64		35	1,21
35,5	3716712	41931992,2		36	1,16
36,5	3590676	40510052,44		37	1,12
37,5	3439377	38803095,19		38	1,07
38,5	3268152	36871332,55		39	1,02
39,5	3100365	34978357,48		40	0,96
40,5	2916090	32899364,58		41	0,91
41,5	2722599	30716396,65		42	0,85
42,5	2514942	28373607,73		43	0,78
43,5	2329371	26279993,34		44	0,72
44,5	2155671	24320307,72		45	0,67
45,5	2006631	22638836,54		46	0,62
46,5	1838322	20739972,25		47	0,57
47,5	1688202	19046316,5		48	0,53
48,5	1547496	17458869,61		49	0,48
49,5	1419831	16018551,45		50	0,44
50,5	1294362	14603008,6		51	0,40
51,5	1198476	13521221,52		52	0,37
52,5	1106271	12480963,53		53	0,34
53,5	1007271	11364044,27		54	0,31
54,5	902250	10179196,01		55	0,28
55,5	788418	8894941,934		56	0,25
56	0	0			

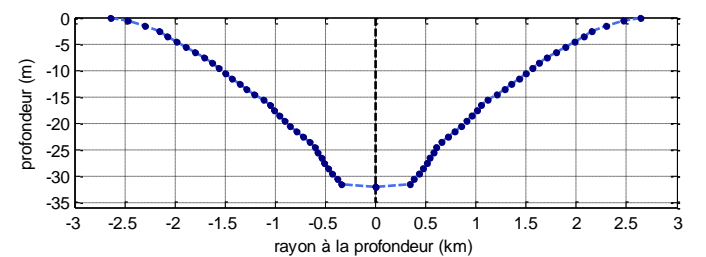
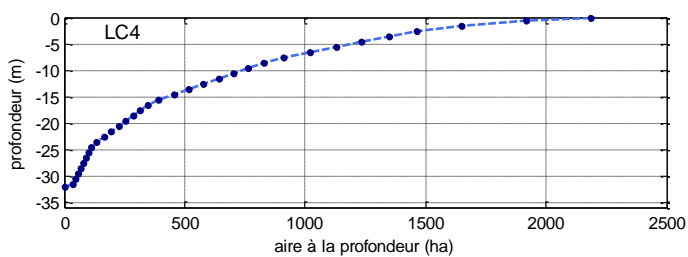
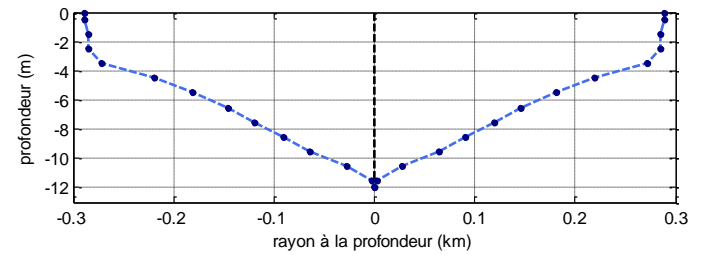
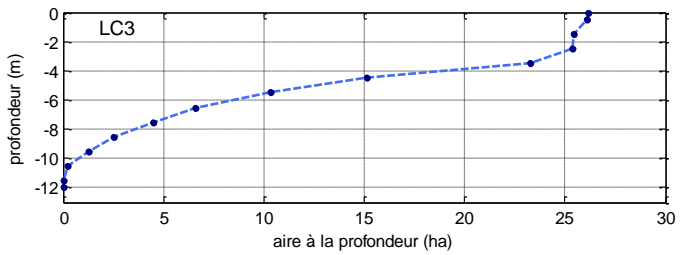
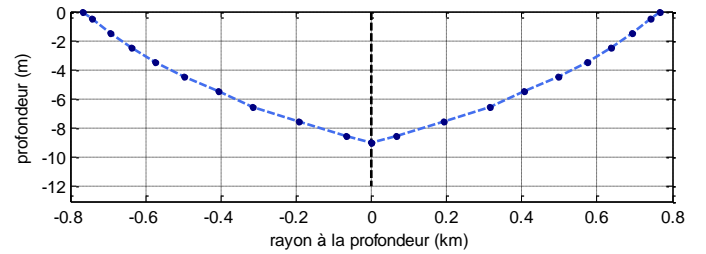
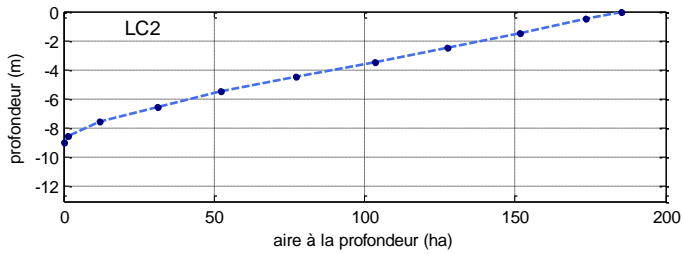
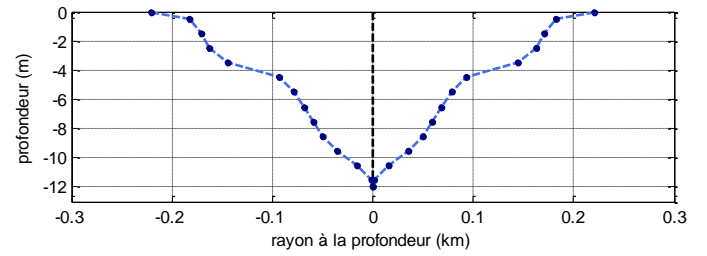
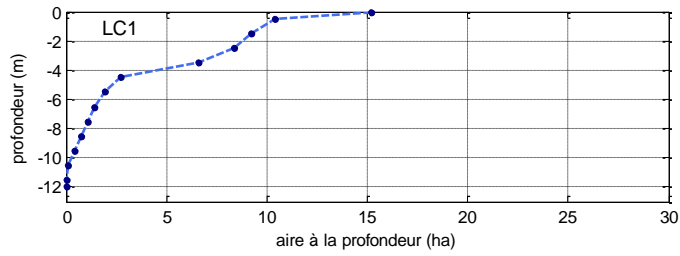


Figure 74. Bathymétrie des lacs-types LC1, LC2, LC3 et LC4. Colonne de gauche : l'aire (en ha) en fonction de la profondeur (en m); colonne de droite : rayon (en km) du lac en fonction de la profondeur (en m).

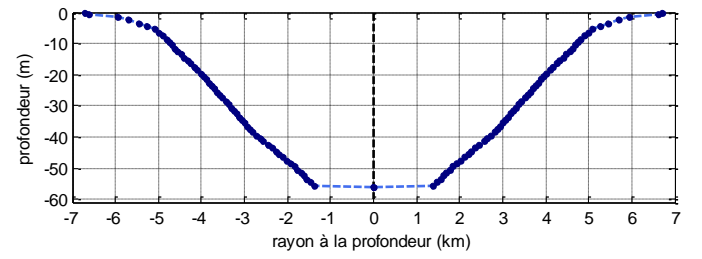
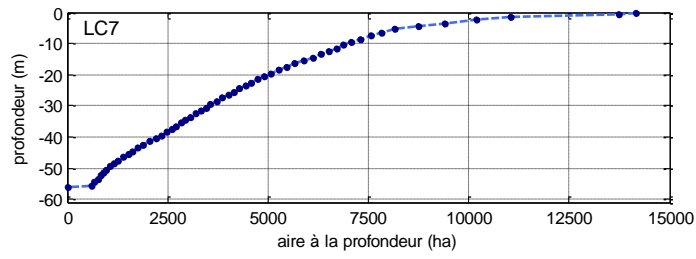
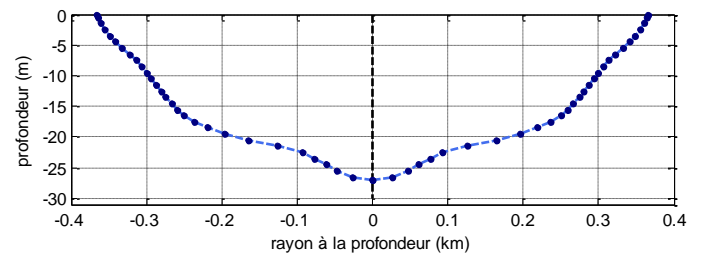
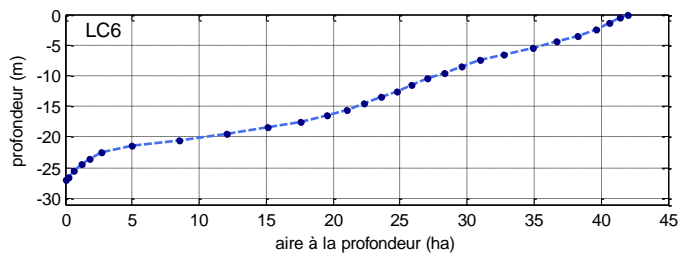
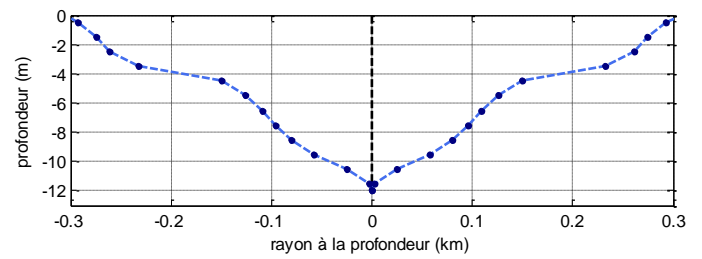
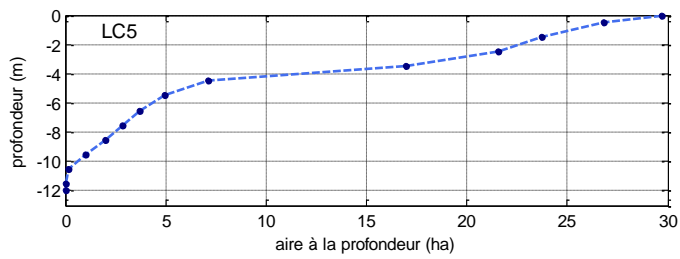


Figure 75. Bathymétrie des lacs-types LC5, LC6 et LC7. Colonne de gauche : l'aire (en ha) en fonction de la profondeur (en m); colonne de droite : rayon (en km) du lac en fonction de la profondeur (en m).

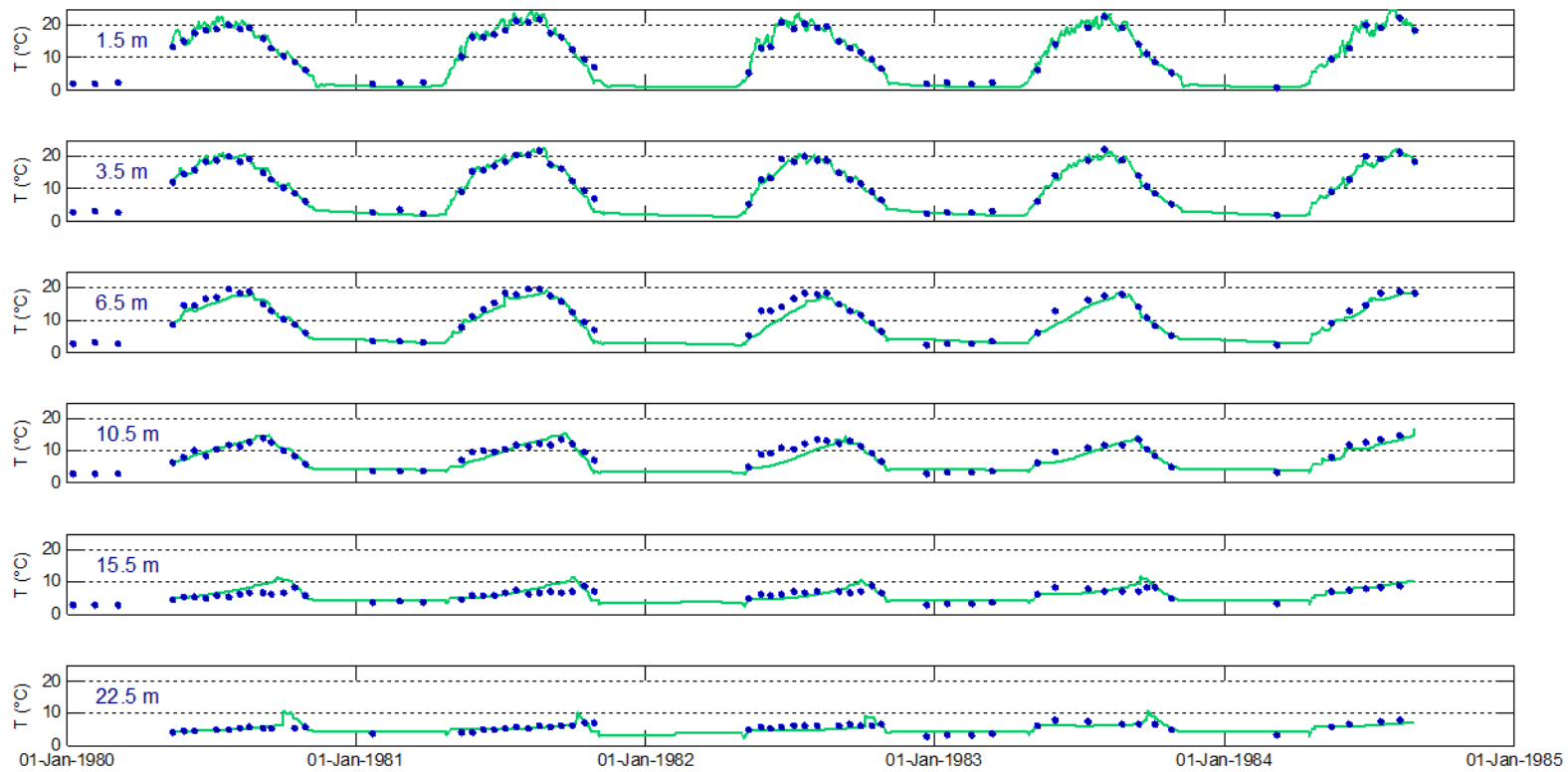


Figure 76. Lac Ethel (Alberta) : températures observées (points bleus) et températures modélisées (lignes vertes) à six profondeurs.

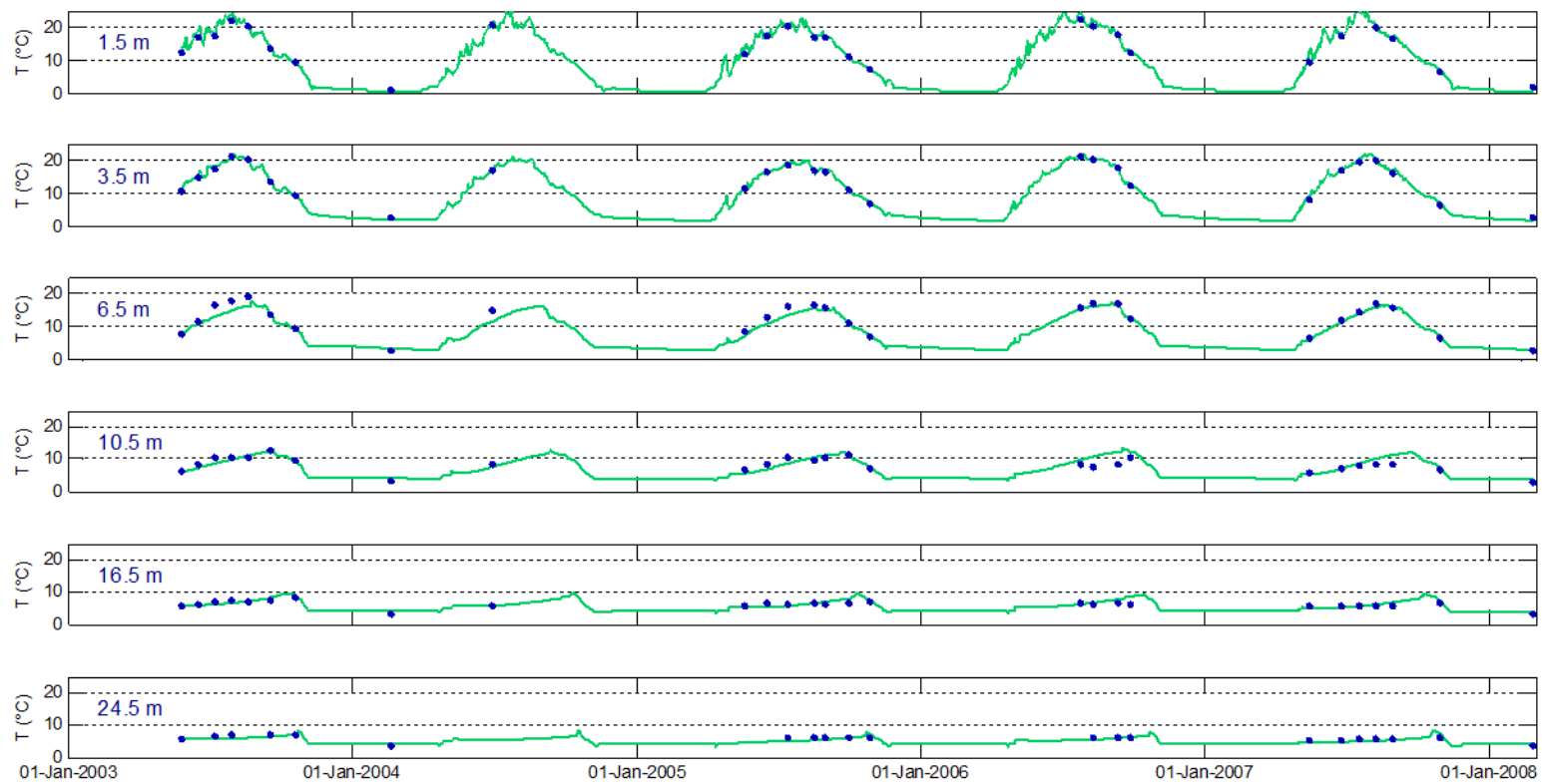


Figure 77. Lac Baptiste-sud (Alberta) : températures observées (points bleus) et températures modélisées (lignes vertes) à six profondeurs.

Annexe II : Liste des figures des indicateurs physiques

Toutes les figures électroniques sont livrées sous trois formats : « emf », « png » et « eps ». Le format « emf » est un format de type vectoriel tandis que le format « png » est un format graphique de type « bitmat ». La résolution des figures en format « emf » et « png » est de 120 et de 96 ppp, respectivement. Le format « eps » a été créé par Adobe Acrobat et est un format vectoriel. Cela veut dire qu'il est possible, avec la version Pro d'Adobe Acrobat, de générer des fichiers « jpg » de 300 dpi de n'importe quelle figure à partir des versions « eps ».

Voici la liste des figures livrées en format électronique. Les noms de fichiers ont été choisis de telle sorte qu'ils ne nécessitent pas d'explications supplémentaires. Les noms sont en anglais pour des raisons historiques.

1a Contenu en chaleur maximal (**maximum heat content**)

Les contenus en chaleur dans les fichiers *matrices* sont exprimées en térajoules (TJ) pour les lacs types LC1, LC2, LC3, LC5 et LC6, et en pétajoules (PJ) pour les lacs types LC4 et LC7. Un térajoule vaut 10^{12} joules et un pétajoule vaut 10^{15} joules.

Répertoire 1a maxheatc

1	figure_maxheatc_LC1_19812010
2	figure_maxheatc_LC1_20412070_rcp85_sim4
3	figure_maxheatc_LC1_20712100_rcp85_sim4
4	figure_maxheatc_LC2_19812010
5	figure_maxheatc_LC2_20412070_rcp85_sim4
6	figure_maxheatc_LC2_20712100_rcp85_sim4
7	figure_maxheatc_LC3_19812010
8	figure_maxheatc_LC3_20412070_rcp85_sim4
9	figure_maxheatc_LC3_20712100_rcp85_sim4
10	figure_maxheatc_LC4_19812010
11	figure_maxheatc_LC4_20412070_rcp85_sim4
12	figure_maxheatc_LC4_20712100_rcp85_sim4
13	figure_maxheatc_LC5_19812010
14	figure_maxheatc_LC5_20412070_rcp85_sim4
15	figure_maxheatc_LC5_20712100_rcp85_sim4
16	figure_maxheatc_LC6_19812010
17	figure_maxheatc_LC6_20412070_rcp85_sim4
18	figure_maxheatc_LC6_20712100_rcp85_sim4
19	figure_maxheatc_LC7_19812010
20	figure_maxheatc_LC7_20412070_rcp85_sim4

21 figure_maxheatc_LC7_20712100_rcp85_sim4

1b **Évolution projetée du maximum de contenu en chaleur
(change in maximum heat content)**

Répertoire 1b maxheatc change

22 figure_change_in_maxheatc_LC1_a_past_to_fut2
23 figure_change_in_maxheatc_LC1_b_past_to_fut3
24 figure_change_in_maxheatc_LC1_c_fut2_to_fut3
25 figure_change_in_maxheatc_LC2_a_past_to_fut2
26 figure_change_in_maxheatc_LC2_b_past_to_fut3
27 figure_change_in_maxheatc_LC2_c_fut2_to_fut3
28 figure_change_in_maxheatc_LC3_a_past_to_fut2
29 figure_change_in_maxheatc_LC3_b_past_to_fut3
30 figure_change_in_maxheatc_LC3_c_fut2_to_fut3
31 figure_change_in_maxheatc_LC4_a_past_to_fut2
32 figure_change_in_maxheatc_LC4_b_past_to_fut3
33 figure_change_in_maxheatc_LC4_c_fut2_to_fut3
34 figure_change_in_maxheatc_LC5_a_past_to_fut2
35 figure_change_in_maxheatc_LC5_b_past_to_fut3
36 figure_change_in_maxheatc_LC5_c_fut2_to_fut3
37 figure_change_in_maxheatc_LC6_a_past_to_fut2
38 figure_change_in_maxheatc_LC6_b_past_to_fut3
39 figure_change_in_maxheatc_LC6_c_fut2_to_fut3
40 figure_change_in_maxheatc_LC7_a_past_to_fut2
41 figure_change_in_maxheatc_LC7_b_past_to_fut3
42 figure_change_in_maxheatc_LC7_c_fut2_to_fut3

1c **Occurrence du maximum de contenu en chaleur
(timing of maximum heat content)**

Répertoire 1c maxheatc timiming

43 figure_max_heatc_timing_LC1_19812010_v1
44 figure_max_heatc_timing_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
45 figure_max_heatc_timing_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
46 figure_max_heatc_timing_LC2_19812010_v1
47 figure_max_heatc_timing_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
48 figure_max_heatc_timing_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
49 figure_max_heatc_timing_LC3_19812010_v1
50 figure_max_heatc_timing_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
51 figure_max_heatc_timing_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
52 figure_max_heatc_timing_LC4_19812010_v1

53 figure_max_heatc_timing_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
54 figure_max_heatc_timing_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
55 figure_max_heatc_timing_LC5_19812010_v1
56 figure_max_heatc_timing_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
57 figure_max_heatc_timing_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
58 figure_max_heatc_timing_LC6_19812010_v1
59 figure_max_heatc_timing_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
60 figure_max_heatc_timing_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
61 figure_max_heatc_timing_LC7_19812010_v1
62 figure_max_heatc_timing_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
63 figure_max_heatc_timing_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

1d **Évolution projetée de l'occurrence du maximum de contenu en chaleur
(change in timing of maximum heat content)**

Répertoire 1d maxheatc timing change

64 figure_change_in_maxheatc_timing_LC1_a_past_to_fut2_v1
65 figure_change_in_maxheatc_timing_LC1_b_past_to_fut3_v1
66 figure_change_in_maxheatc_timing_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
67 figure_change_in_maxheatc_timing_LC2_a_past_to_fut2_v1
68 figure_change_in_maxheatc_timing_LC2_b_past_to_fut3_v1
69 figure_change_in_maxheatc_timing_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
70 figure_change_in_maxheatc_timing_LC3_a_past_to_fut2_v1
71 figure_change_in_maxheatc_timing_LC3_b_past_to_fut3_v1
72 figure_change_in_maxheatc_timing_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
73 figure_change_in_maxheatc_timing_LC4_a_past_to_fut2_v1
74 figure_change_in_maxheatc_timing_LC4_b_past_to_fut3_v1
75 figure_change_in_maxheatc_timing_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
76 figure_change_in_maxheatc_timing_LC5_a_past_to_fut2_v1
77 figure_change_in_maxheatc_timing_LC5_b_past_to_fut3_v1
78 figure_change_in_maxheatc_timing_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
79 figure_change_in_maxheatc_timing_LC6_a_past_to_fut2_v1
80 figure_change_in_maxheatc_timing_LC6_b_past_to_fut3_v1
81 figure_change_in_maxheatc_timing_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
82 figure_change_in_maxheatc_timing_LC7_a_past_to_fut2_v1
83 figure_change_in_maxheatc_timing_LC7_b_past_to_fut3_v1
84 figure_change_in_maxheatc_timing_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

2a **Température moyenne de la couche 0-5 m pour JJA
(average temperature, layer 0-5m in June-July-August)**

Répertoire 2a avgtemp 0-5m JJA

85 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC1_19812010_v1
86 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
87 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
88 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC2_19812010_v1
89 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
90 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
91 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC3_19812010_v1
92 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
93 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
94 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC4_19812010_v1
95 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
96 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
97 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC5_19812010_v1
98 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
99 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
100 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC6_19812010_v1
101 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
102 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
103 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC7_19812010_v1
104 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
105 figure_avgtemp_0-5m_JJA_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

2b **Évolution projetée de la température moyenne de la couche 0-5 m pour JJA
(change in average temperature layer 0-5m in June-July-August)**

Répertoire 2b_avgtemp_0-5m_JJA change

106 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC1_a_past_to_fut2_v1
107 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC1_b_past_to_fut3_v1
108 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
109 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC2_a_past_to_fut2_v1
110 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC2_b_past_to_fut3_v1
111 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
112 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC3_a_past_to_fut2_v1
113 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC3_b_past_to_fut3_v1
114 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
115 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC4_a_past_to_fut2_v1
116 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC4_b_past_to_fut3_v1
117 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
118 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC5_a_past_to_fut2_v1
119 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC5_b_past_to_fut3_v1
120 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
121 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC6_a_past_to_fut2_v1
122 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC6_b_past_to_fut3_v1
123 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC6_c_fut2_to_fut3_v1

- 124 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC7_a_past_to_fut2_v1
- 125 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC7_b_past_to_fut3_v1
- 126 figure_change_in_avgt_0-5m_JJA_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

3a **Température maximale à 1,5 m**
(maximum temperature at 1.5 m)

Répertoire 3a_maxtemp_surface

- 127 figure_temp_max_at_1.5m_LC1_19812010_v1
- 128 figure_temp_max_at_1.5m_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
- 129 figure_temp_max_at_1.5m_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
- 130 figure_temp_max_at_1.5m_LC2_19812010_v1
- 131 figure_temp_max_at_1.5m_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
- 132 figure_temp_max_at_1.5m_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
- 133 figure_temp_max_at_1.5m_LC3_19812010_v1
- 134 figure_temp_max_at_1.5m_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
- 135 figure_temp_max_at_1.5m_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
- 136 figure_temp_max_at_1.5m_LC4_19812010_v1
- 137 figure_temp_max_at_1.5m_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
- 138 figure_temp_max_at_1.5m_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
- 139 figure_temp_max_at_1.5m_LC5_19812010_v1
- 140 figure_temp_max_at_1.5m_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
- 141 figure_temp_max_at_1.5m_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
- 142 figure_temp_max_at_1.5m_LC6_19812010_v1
- 143 figure_temp_max_at_1.5m_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
- 144 figure_temp_max_at_1.5m_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
- 145 figure_temp_max_at_1.5m_LC7_19812010_v1
- 146 figure_temp_max_at_1.5m_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
- 147 figure_temp_max_at_1.5m_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

3b **Évolution projetée de la température maximale à 1,5 m**
(change in maximum temperature at 1.5 m)

Répertoire 3b_maxtemp_surface change

- 148 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC1_a_past_to_fut2_v1
- 149 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC1_b_past_to_fut3_v1
- 150 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
- 151 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC2_a_past_to_fut2_v1
- 152 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC2_b_past_to_fut3_v1
- 153 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
- 154 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC3_a_past_to_fut2_v1

155 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC3_b_past_to_fut3_v1
156 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
157 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC4_a_past_to_fut2_v1
158 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC4_b_past_to_fut3_v1
159 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
160 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC5_a_past_to_fut2_v1
161 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC5_b_past_to_fut3_v1
162 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
163 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC6_a_past_to_fut2_v1
164 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC6_b_past_to_fut3_v1
165 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
166 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC7_a_past_to_fut2_v1
167 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC7_b_past_to_fut3_v1
168 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

3c Occurrence de la température maximale à 1,5 m (timing of maximum temperature at 1.5 m)

Répertoire 3c_maxtemp_surface timing

169 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC1_19812010_v1
170 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
171 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
172 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC2_19812010_v1
173 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
174 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
175 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC3_19812010_v1
176 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
177 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
178 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC4_19812010_v1
179 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
180 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
181 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC5_19812010_v1
182 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
183 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
184 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC6_19812010_v1
185 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
186 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
187 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC7_19812010_v1
188 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
189 figure_max_temp_at_1.5m_timing_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

3d Évolution projetée de l'occurrence la température maximale à 1,5 m (change in timing of maximum temperature at 1.5 m)

Répertoire 3d_maxtemp_surface timing change

190 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC1_a_past_to_fut2_v1
191 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC1_b_past_to_fut3_v1
192 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
193 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC2_a_past_to_fut2_v1
194 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC2_b_past_to_fut3_v1
195 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
196 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC3_a_past_to_fut2_v1
197 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC3_b_past_to_fut3_v1
198 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
199 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC4_a_past_to_fut2_v1
200 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC4_b_past_to_fut3_v1
201 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
202 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC5_a_past_to_fut2_v1
203 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC5_b_past_to_fut3_v1
204 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
205 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC6_a_past_to_fut2_v1
206 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC6_b_past_to_fut3_v1
207 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
208 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC7_a_past_to_fut2_v1
209 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC7_b_past_to_fut3_v1
210 figure_change_in_maxtemp_at_1.5m_timing_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

4a [Température maximale en profondeur](#)

(maximum temperature at depths: 9.5 m for shallow lakes, 20.5 m for deep lakes)

Répertoire 4a_maxtemp_at depths

211 figure_temp_max_at_9.5m_LC1_19812010_v1
212 figure_temp_max_at_9.5m_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
213 figure_temp_max_at_9.5m_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
214 figure_temp_max_at_8.5m_LC2_19812010_v1
215 figure_temp_max_at_8.5m_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
216 figure_temp_max_at_8.5m_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
217 figure_temp_max_at_9.5m_LC3_19812010_v1
218 figure_temp_max_at_9.5m_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
219 figure_temp_max_at_9.5m_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
220 figure_temp_max_at_20.5m_LC4_19812010_v1
221 figure_temp_max_at_20.5m_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
222 figure_temp_max_at_20.5m_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
223 figure_temp_max_at_9.5m_LC5_19812010_v1
224 figure_temp_max_at_9.5m_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1

225 figure_temp_max_at_9.5m_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
226 figure_temp_max_at_20.5m_LC6_19812010_v1
227 figure_temp_max_at_20.5m_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
228 figure_temp_max_at_20.5m_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
229 figure_temp_max_at_20.5m_LC7_19812010_v1
230 figure_temp_max_at_20.5m_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
231 figure_temp_max_at_20.5m_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

4b **Évolution projetée de la température maximale en profondeur (change in maximum temperature at depths)**

Repertoire 4b_maxtemp_at depths change

232 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC1_a_past_to_fut2_v1
233 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC1_b_past_to_fut3_v1
234 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
235 figure_change_in_maxtemp_at_8.5m_LC2_a_past_to_fut2_v1
236 figure_change_in_maxtemp_at_8.5m_LC2_b_past_to_fut3_v1
237 figure_change_in_maxtemp_at_8.5m_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
238 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC3_a_past_to_fut2_v1
239 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC3_b_past_to_fut3_v1
240 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
241 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC4_a_past_to_fut2_v1
242 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC4_b_past_to_fut3_v1
243 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
244 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC5_a_past_to_fut2_v1
245 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC5_b_past_to_fut3_v1
246 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
247 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC6_a_past_to_fut2_v1
248 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC6_b_past_to_fut3_v1
249 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
250 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC7_a_past_to_fut2_v1
251 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC7_b_past_to_fut3_v1
252 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

4c **Occurrence de la température maximale en profondeur (timing of maximum temperature at depths)**

Répertoire 4c_maxtemp_at depths timing

253 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC1_19812010_v1
254 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
255 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
256 figure_max_temp_at_8.5m_timing_LC2_19812010_v1

257 figure_max_temp_at_8.5m_timing_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
258 figure_max_temp_at_8.5m_timing_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
259 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC3_19812010_v1
260 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
261 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
262 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC4_19812010_v1
263 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
264 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
265 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC5_19812010_v1
266 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
267 figure_max_temp_at_9.5m_timing_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
268 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC6_19812010_v1
269 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
270 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
271 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC7_19812010_v1
272 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
273 figure_max_temp_at_20.5m_timing_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

4d Évolution projetée de l'occurrence de la température maximale en profondeur

(change in timing of maximum temperature at depths

Répertoire : 4d_maxtemp_at_depths_timing_change

274 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC1_a_past_to_fut2_v1
275 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC1_b_past_to_fut3_v1
276 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
277 figure_change_in_maxtemp_at_8.5m_timing_LC2_a_past_to_fut2_v1
278 figure_change_in_maxtemp_at_8.5m_timing_LC2_b_past_to_fut3_v1
279 figure_change_in_maxtemp_at_8.5m_timing_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
280 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC3_a_past_to_fut2_v1
281 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC3_b_past_to_fut3_v1
282 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
283 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC4_a_past_to_fut2_v1
284 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC4_b_past_to_fut3_v1
285 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
286 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC5_a_past_to_fut2_v1
287 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC5_b_past_to_fut3_v1
288 figure_change_in_maxtemp_at_9.5m_timing_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
289 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC6_a_past_to_fut2_v1
290 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC6_b_past_to_fut3_v1
291 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
292 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC7_a_past_to_fut2_v1
293 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC7_b_past_to_fut3_v1
294 figure_change_in_maxtemp_at_20.5m_timing_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

Annexe III : liste des figures des indicateurs biologiques pour le touladi

Toutes les figures électroniques sont livrées sous trois formats : « emf », « png » et « eps ». Le format « emf » est un format de type vectoriel tandis que le format « png » est un format graphique de type « bitmat ». La résolution des figures en format « emf » et « png » est de 120 et de 96 ppp, respectivement. Le format « eps » a été créé par Adobe Acrobat et est un format vectoriel. Cela veut dire qu'il est possible, avec la version Pro d'Adobe Acrobat, de générer des fichiers « jpg » de 300 dpi de n'importe quelle figure à partir des versions « eps ».

Voici la liste des figures livrées en format électronique. Les noms de fichiers ont été choisis de telle sorte qu'ils ne nécessitent pas d'explications supplémentaires. Les noms sont en anglais pour des raisons historiques.

1.1 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température près du fond favorable à la fraie

Répertoire « 1 a NS fraction area okT spawning »

figure_LC1_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_part_area_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2

1.2 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie

Répertoire « 1 b NS fraction area below2,5m okT spawning »

figure_LC1_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1
figure_LC2_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1
figure_LC3_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1
figure_LC4_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1
figure_LC5_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1
figure_LC6_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1
figure_LC7_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v1

1.3 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie et occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie

Répertoire « 1 c NS fraction area below2,5m okT spawning with start dates »

figure_LC1_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_6_14C_transectNS_v2

2.1 Cartes 2D : Occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie

Répertoire « 2 2D start spawning »

figure_1stday_spawning_11C_LC1_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC2_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC3_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC4_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC5_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC6_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC7_19812010_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_11C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

2.2 Cartes 2D : Retard projeté du déclenchement de la fraie

Répertoire « 2 2D start spawning change »

figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC1_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC2_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC3_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC3_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC4_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC4_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC5_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC6_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC6_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC7_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC7_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_TLD_LC7_c_fut2_to_fut3_v2

3.1 Cartes 2D : Durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m présente une température favorable à la fraie

Répertoire « 3 2D ndays allA below2,5m okT spawning »

figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC1_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC2_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC3_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC4_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC5_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC6_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC7_19812010_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_ndays_allA_below2,5m_bottomT_between_6_14C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

3.2 Cartes 2D : Changement projeté de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m a une température favorable à la fraie

Répertoire « 3 2D ndays allA below2,5m okT spawning change »

figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC1_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC2_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC3_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC3_b_past_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC4_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC4_b_past_to_fut3_v1

figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC5_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC6_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC7_a_past_to_fut2_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_ndays_allA_below2,5m_okT_spawning_TLD_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

4.1 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température au fond favorable à la survie des œufs

Répertoire « 4 a NS fraction fraction area okT eggs »

figure_LC1_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_THQI_A_0_3_5_10C_transectNS_v2

4.2 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température au fond favorable à la survie des œufs

Répertoire « 4 b NS fraction fraction area below2,5m okT eggs »

figure_LC1_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_5_10C_transectNS_v2

5. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Degrés-jours pondérés (incubation) au fond du lac accumulés entre le 1er décembre et le 15 avril

Répertoire « 5 NS weighted degdays okT eggs »

figure_LC1_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC2_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC3_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC4_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC5_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC6_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC7_profiles_weighted_degdays_0_3_5_10C_01dec-15apr_transectNS_v2

6.1 Cartes 2D : Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril)

Répertoire « 6 2D fraction area below2,5m winter okT eggs »

figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC1_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC2_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC3_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC4_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC5_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC6_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC7_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_5_10C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

6.2 Cartes 2D : Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril)

Répertoire « 6 2D fraction area below2,5m winter okT eggs change »

figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC1_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC1_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC1_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC2_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC2_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC2_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC3_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC3_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC3_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC4_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC4_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC4_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC5_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC5_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC5_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC6_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC6_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC6_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC7_a_past_to_fut2_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC7_b_past_to_fut3_v2
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_TLD_LC7_c_fut2_to_fut3_v2

7. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles

Répertoire « 7 NS fraction_vol okT juveniles »

figure_LC1_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_THQI_V_0_10_16_23,5C_transectNS_v2

8.1 Cartes 2D : Nombre de m3-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles

Nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles » : les m³-jours dans les fichiers *matrices* sont divisés par 10⁷ pour les lacs types LC1, LC2, LC3, LC5 et LC6, et par 10⁹ pour les lacs types LC4 et LC7.

Répertoire « 8_2D_m3days_okT_juveniles »

figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC1_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC2_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC3_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC4_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC5_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC6_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC7_19812010_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_TLD_0_10_16_23,5C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

8.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du nombre de m3-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles

Répertoire « 8_2D_m3days_okT_juveniles_change »

figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC1_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC2_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC2_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC3_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC3_b_past_to_fut3_v1

figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC4_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC4_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC5_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC5_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC6_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC7_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_TLD_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

9. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Nombre de jours avec température au-dessus de la limite de stress pour les adultes

Répertoire « 9_NS_ndays_T_above_stress_limit »

figure_LC1_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1
figure_LC2_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1
figure_LC3_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1
figure_LC4_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1
figure_LC5_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1
figure_LC6_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1
figure_LC7_profile_ndays_T_above_18C_transectNS_v1

10. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température stressante pour les adultes

Répertoire « 10_NS_fraction_vol_stress_temp »

figure_LC1_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3
figure_LC2_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3
figure_LC3_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3
figure_LC4_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3
figure_LC5_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3
figure_LC6_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3
figure_LC7_timeseries_vstress_18_23,5C_transectNS_v3

11.1 Cartes 2D : Volume maximal avec température stressante pour les adultes

Répertoire « 11 2D maxvolume stress »

figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_18_23,5C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

11.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du volume maximal avec température stressante pour les adultes

Répertoire « 11 2D maxvolume stress volume »

figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC1_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC2_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC3_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC3_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC4_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC4_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC5_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC6_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC7_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_TLD_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

Annexe IV : liste des figures des indicateurs biologiques pour l'omble chevalier

Toutes les figures électroniques sont livrées sous trois formats : « emf », « png » et « eps ». Le format « emf » est un format de type vectoriel tandis que le format « png » est un format graphique de type « bitmat ». La résolution des figures en format « emf » et « png » est de 120 et de 96 ppp, respectivement. Le format « eps » a été créé par Adobe Acrobat et est un format vectoriel. Cela veut dire qu'il est possible, avec la version Pro d'Adobe Acrobat, de générer des fichiers « jpg » de 300 dpi de n'importe quelle figure à partir des versions « eps ».

Voici la liste des figures livrées en format électronique. Les noms de fichiers ont été choisis de telle sorte qu'ils ne nécessitent pas d'explications supplémentaires. Les noms sont en anglais pour des raisons historiques.

1.1 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température près du fond favorable à la fraie

Répertoire « 1_a_NS_fraction_area_okT_spawning »

figure_LC1_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC2_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC3_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC4_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC5_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC6_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC7_timeseries_part_area_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1

1.2 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie

Répertoire « 1_b_NS_fraction_area_below2,5m_okT_spawning »

figure_LC1_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC2_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC3_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC4_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC5_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC6_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1
figure_LC7_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v1

1.3 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température près du fond favorable à la fraie et occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie

Répertoire « 1 c NS fraction area below2,5m okT spawning with start dates »

figure_LC1_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_part_area_below2,5m_bottomtemp_between_0,5_7C_transectNS_v2

2.1 Cartes 2D : Occurrence de la température de surface synchrone au déclenchement de la fraie

Répertoire « 2 2D start spawning »

figure_1stday_spawning_8C_LC1_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC2_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC3_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC4_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC5_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC6_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC7_19812010_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_1stday_spawning_8C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

2.2 Cartes 2D : Retard projeté du déclenchement de la fraie

Répertoire « 2 2D start spawning change »

figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC1_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC2_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC3_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC3_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC4_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC4_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC5_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC6_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC6_c_fut2_to_fut3_v2
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC7_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC7_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_1stday_spawning_OCH_LC7_c_fut2_to_fut3_v2

3.1 Cartes 2D : Durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m a une température favorable à la fraie

Aucune figure

3.2 Cartes 2D : Changement projeté de la durée de la période automnale où 100 % du fond sous 2,5 m a une température favorable à la fraie

Aucune figure

4.1 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac avec température au fond favorable à la survie des œufs

Répertoire « 4 a NS fraction fraction area okT eggs »

figure_LC1_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC2_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC3_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC4_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC5_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC6_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC7_timeseries_THQI_A_0_3_6_8C_transectNS_v2

4.2 Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction de l'aire du lac sous 2,5 m avec température au fond favorable à la survie des œufs

Répertoire « 4 b NS fraction fraction area below2,5m okT eggs »

figure_LC1_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC2_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC3_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC4_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC5_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC6_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

figure_LC7_timeseries_THQI_A_below2,5m_0_3_6_8C_transectNS_v2

5. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Degrés-jours pondérés (incubation) au fond du lac accumulés entre le 1er décembre et le 15 avril

Répertoire « 5_NS_weighted_degdays_okT_eggs »

figure_LC1_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2

figure_LC2_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2

figure_LC3_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC4_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC5_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC6_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2
figure_LC7_profiles_weighted_degdays_0_3_6_8C_01dec-15apr_transectNS_v2

6.1 Cartes 2D : Fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril)

Répertoire « 6 2D fraction area below2,5m winter okT eggs »

figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC1_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC2_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC3_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC4_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC5_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC6_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC7_19812010_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_0_3_6_8C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

6.2 Cartes 2D : Augmentation projetée de la fraction du fond sous 2,5 m avec température favorable à l'incubation en hiver (moyenne entre le 1er décembre et le 15 avril)

Répertoire « 6 2D fraction area below2,5m winter okT eggs change »

figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC1_a_past_to_fut2_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC1_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC1_c_fut2_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC2_a_past_to_fut2_v3

figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC2_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC2_c_fut2_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC3_a_past_to_fut2_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC3_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC3_c_fut2_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC4_a_past_to_fut2_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC4_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC4_c_fut2_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC5_a_past_to_fut2_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC5_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC5_c_fut2_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC6_a_past_to_fut2_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC6_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC6_c_fut2_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC7_a_past_to_fut2_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC7_b_past_to_fut3_v3
figure_change_fraction_Abottom_winter_okT_eggs_OCH_LC7_c_fut2_to_fut3_v3

7. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température favorable à la croissance des juvéniles

Répertoire « 7 NS fraction vol okT juveniles »

figure_LC1_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_THQI_V_0_12_16_21C_transectNS_v2

8.1 Cartes 2D : Nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles

Répertoire « 8 2D m3days okT juveniles »

figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC1_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC1_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC2_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC2_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1

figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC3_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC3_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC4_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC4_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC5_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC5_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC6_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC6_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC7_19812010_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC7_20412070_rcp85_sim4_v1
figure_m3days_okT_OCH_0_12_16_21C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

8.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du nombre de m³-jours avec température favorable à la croissance des juvéniles

Répertoire « 8 2D m3days okT juveniles change »

figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC1_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC2_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC3_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC3_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC4_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC4_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC5_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC6_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC7_a_past_to_fut2_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_m3days_okT_OCH_LC7_c_fut2_to_fut3_v1

9. Transect nord-sud, profils à cinq latitudes : Nombre de jours avec température au-dessus de la limite de stress pour les adultes

Répertoire « 9 NS ndays T above stress limit »

figure_LC1_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1
figure_LC2_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1
figure_LC3_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1
figure_LC4_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1
figure_LC5_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1
figure_LC6_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1
figure_LC7_profile_ndays_T_above_21C_transectNS_v1

10. Transect nord-sud, séries temporelles à cinq latitudes : Fraction du volume du lac avec température stressante pour les adultes

Répertoire « 10 NS fraction vol stress temp »

figure_LC1_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2
figure_LC2_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2
figure_LC3_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2
figure_LC4_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2
figure_LC5_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2
figure_LC6_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2
figure_LC7_timeseries_vstress_21_24C_transectNS_v2

11.1 Cartes 2D : Volume maximal avec température stressante pour les adultes

Répertoire « 11 2D maxvolume stress »

figure_maxvolume_stress_21_24C_LC1_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_21_24C_LC2_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_21_24C_LC3_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_21_24C_LC4_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_21_24C_LC5_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_21_24C_LC6_20712100_rcp85_sim4_v1
figure_maxvolume_stress_21_24C_LC7_20712100_rcp85_sim4_v1

11.2 Cartes 2D : Augmentation projetée du volume maximal avec température stressante pour les adultes

Répertoire « 11_2D_maxvolume_stress_volume »

figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC1_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC1_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC2_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC2_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC3_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC3_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC4_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC4_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC5_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC5_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC6_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC6_c_fut2_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC7_b_past_to_fut3_v1
figure_change_in_maxvolume_stress_OCH_LC7_c_fut2_to_fut3_v1