



Université du Québec

Institut national de la recherche scientifique

Eau, Terre et Environnement

Northern salmonid habitat in the future: impacts of climate change on the spatial variability of their lentic habitat between 50°N and 75°N.

par

Claude Bélanger¹, Raoul-Marie Couture², Yves Gratton¹, Olivier Chimi Chiadjeu¹
Travis Logan³, Isabelle Laurion¹, André St-Hilaire¹ et Milla Rautio⁴

¹ Institut national de la recherche scientifique, Centre eau, terre et environnement,
Québec, Qc, Canada

² NIVA : Catchment Processes Section, Norwegian Institute for Water Research, Oslo,
Norvège

³ Ouranos, Montréal, Qc, Canada

⁴ UQAC : Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi,
Saguenay, Qc, Canada

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Titre français :

Cartographie des impacts des changements climatiques sur l'habitat des salmonidés dans les lacs nordiques du Québec

Remerciements

Nous aimerions remercier Guillaume Grosbois de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) pour avoir extrait les données du lac Simoncouche et pour nous les avoir transmises. Les données météorologiques locales nous ont été fournies par François Gionet et le Prof. Hubert Morin, tous les deux de l'UQAC. Nous tenons à remercier le Prof. Paul del Giorgio de l'Université du Québec à Montréal pour nous avoir autorisés à utiliser les données de sa bouée limnologique ancrée dans le lac Simoncouche. Les ancres du lac Lac-du-camp ont été déployés par une équipe du Centre d'études nordiques (CEN) sous la supervision de Denis Sarrazin. Simon Charbonneau, Audrey Veillette et Frédéric Bouchard ont contribué aux levées bathymétriques du Lac-du-camp. L'autorisation d'utiliser les données de température du lac Lac-du-camp (que nous n'avons pas utilisées dans ce rapport) nous a été accordée par le Prof. Reinhard Pienitz de l'Université Laval. Les ancres du lac Jacques-Cartier ont été déployés par une équipe du Ministère de la faune, des forêts et des parcs (MFFP) du Québec sous la direction de Jean-Nicolas Bujold. Merci à tous.

Nous désirons aussi remercier les développeurs du modèle MyLake au *Norwegian Institute of Water Research* (Oslo, Norvège) en particulier le Dr. Tuomo Saloranta, pour l'autorisation d'utiliser le modèle. Le script utilisé pour configurer le module d'optimisation génétique a été écrit par le Dr. Magnus Norling.

Ce projet a été financé par une subvention du groupe Ouranos et des subventions du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada à Isabelle Laurion et Yves Gratton, ainsi que par un contrat du Ministère de la faune, des forêts et des parcs.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Liste des Tableaux.....	5
Liste des figures.....	6
1. Introduction	9
2. Contexte / objectifs	10
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	11
4. Méthodologie / données	12
4.1 Le modèle MyLake.....	12
4.2 Influence de la profondeur moyenne et variations latitudinales	13
4.3 Classification des lacs du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik	14
4.4 Cartes des habitats thermiques du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik	14
4.5 Modélisation des concentrations en oxygène dissous.....	15
4.5.1 Données utilisées pour la modélisation du lac Simoncouche	16
4.5.2 Choix des paramètres du modèle	22
5. Résultats et discussion	23
5.1 Influence de la profondeur et variations latitudinales	23
5.2 Classifications des lacs du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik.....	26
5.3 Cartographie des lacs du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik	31
5.4 Influence des changements climatiques sur les concentrations en oxygène dissous.....	32
5.4.1 Simulations des températures de l'eau.....	32
5.4.2 Simulations des concentrations en oxygène dissous	33
5.4.3 Variations latitudinales	36
6. Conclusion et recommandations	42
Références.....	44
Annexes	48
Annexe I : Influence de la profondeur et variations latitudinales	48
Annexe II : Classification des lacs du Québec.....	48
Annexe III : Cartographie des habitats thermiques à l'aide des lacs Jacques-Cartier et Stewart.....	48
Annexe IV : Cartographie des habitats thermiques à l'aide du lac Simoncouche	48
Annexe V : Impacts of climate changes on dissolved oxygen concentrations.....	48

Annexe VI : Habitats des salmonidés : scénarios climatiques.....	48
--	----

Liste des Tableaux

Tableau 1. Caractéristiques de nos trois lacs-tests. "n.d." signifie "données non disponibles". Les dates d'échantillonnage (ligne 9) sont celles des senseurs de température (ligne 10) et d'oxygène dissous (ligne 11), à moins d'indications contraires.	17
Tableau 2. Comparaison des températures observées à l'aide des thermographes avec celles des profils verticaux mensuels. « N.D. » signifie valeur non disponible.	22
Tableau 3. Nombre initial de lacs et nombre de lacs sélectionnés pour chacune des douze zones d'étude.	27
Tableau 4. Statistiques sur les quatre variables morphologiques : superficie, profondeur moyenne, développement du rivage (DL) et altitude.	28
Tableau 5. Médianes des paramètres morphologiques pour chaque classe. Sup, DL et Pmoy signifient superficie, distance linéaire, et profondeur moyenne, respectivement.	29

Liste des figures

Figure 1. Habitats thermiques et / ou oxygènes.....	9
Figure 2. Localisations des lacs réels (BED, JAC, CHI met STW) et hypothétiques (carrées bleus) de la phase I du projet (Bélangier et al., 2013).	12
Figure 3. Position des lacs Simoncouche, Char et Lac-du-camp. La ligne mauve représente la section sud-nord que nous proposons de construire. La figure a été modifiée à partir de la figure de Stern et Gaden (2015) identifiant les différentes régions (IRIS) couvertes par le programme ArcticNet.	13
Figure 4. Nombre moyen de jours avec couvert de glace pour la période de trente ans 1981-2010. Le lac Simoncouche a été placé au centre de 1161 pixels (les tuiles) et le modèle MyLake a été exécuté à chacun de ces points à l'aide des données NARR correspondantes. Les X représentent la position des quatre points choisis pour la section nord-sud décrite dans la section 5.4.3.....	16
Figure 5. Panneau de gauche: la Forêt d'enseignement et de recherche Simoncouche. Le lac Simoncouche est le lac dans la partie supérieure de la figure. Ses contours bathymétriques sont présentés sur le panneau de droite L'eau y pénètre par la rivière Simoncouche au nord, en haut des deux panneaux, et en sort par la décharge Des Îlets (au sud) qu'on peut voir en bas du panneau de droite.....	18
Figure 6. Température de l'eau à 3 m (ligne bleu pâle) et à 5 m (ligne bleu foncée) dans le lac Simoncouche entre 2011 et 2014. La ligne pointillée rouge identifie la température théorique de 4° C en hiver.	19
Figure 7. Profils verticaux d'oxygène dissous (en mg L ⁻¹) entre mai 2011 et août 2012.	20
Figure 8. Carbone organique dissous (COD en mg L ⁻¹) à 3 m (points rouges) et à 5 m points bleus) entre mars 2011 et février 2015.....	20
Figure 9. Comparaison des valeurs de température observées (en noir) et modélisées (en bleu) entre 2011 et 2014. Les valeurs modélisées du panneau du haut sont celles obtenues pour une profondeur de 1.5 m.	21
Figure 10. Comparaison des valeurs de température observées (en noir) et modélisées (en bleu) entre 2011 et 2014. Les valeurs modélisées du panneau du haut sont celles obtenues pour une profondeur de 2,5 m.	21
Figure 11. Différence entre les températures des lacs de petite (no 1) et grande (no 2) profondeurs (période 1981-2010) lorsque placés aux latitudes (a) HL2, (b) HL5, et (c) HL8. La position des latitudes HL2, HL5 et HL8 sont celles de la Figure 2.	24
Figure 12. Différence entre les contenus en chaleur volumique des lacs de petite (no 1) et grande (no 2) profondeurs lorsque placés aux latitudes HL2 (bleu), HL5 (vert), et HL8 (rouge); (a) pour la période 1981-2010, (b) pour la période 2041-2070, et (c) différence entre les périodes future et passée. La position des latitudes HL2, HL5 et HL8 sont celles de la Figure 2.	25
Figure 13. Localisation (en bleu) des douze Unités de Découpage Hydrographique (UDH).	26
Figure 14. Pourcentage de chacune des classes dans les douze zones d'étude.....	30
Figure 15. Validation intrinsèque de la classification : les pourcentages de vrais positifs et de vrais négatifs dominant le diagramme.	31

Figure 16. Concentrations en oxygène dissous simulées (ligne bleues) entre le 12 mai 2011 et le 1 ^{er} novembre 2012. Les + rouges sont les observations. La simulation a été réalisée avec les paramètres optimisés : la fraction réactive de DOC pénétrant dans le lac est de 13.70%, $k_{SOD} = 101.6880 \text{ mg m}^{-2}$, et $k_{BOD} = 0.3410 \text{ j}^{-1}$	34
Figure 17. Profils verticaux d'oxygène dissous observés (points bleus) et modélisés (points rouges) entre mai 2011 et août 2012. L'information est la même que sur la Figure 16, mais elle est présentée différemment.	34
Figure 18. Concentrations en oxygène dissous simulées (ligne bleues) entre mai 2011 et le 1 ^{er} novembre 2014. Les + rouges sont les observations. La simulation a été réalisée avec le module d'échange avec les sédiments. La fraction réactive de DOC pénétrant dans le lac est aussi de 13.70% et $k_{BOD} = 0.3410 \text{ j}^{-1}$	35
Figure 19. Influence du gradient latitudinal pour le lac Simoncouche pour la période 1981-2010. Les résultats sont présentés pour quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).	37
Figure 20. Influence du gradient latitudinal pour le lac Simoncouche pour la période 2041-2070. Les résultats sont présentés pour quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).	38
Figure 21. Influence du gradient latitudinal pour le lac Simoncouche pour la période 2070-2100. Les résultats sont présentés pour quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).	39
Figure 22. Impacts des changements climatiques sur la distribution de l'oxygène dissous. La figure présente les différences entre 2041-2070 par rapport à la période 1981-2010. Les différences sont présentées à quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).	40
Figure 23. Impacts des changements climatiques sur la distribution de l'oxygène dissous. La figure présente les différences entre 2071-2100 par rapport à la période 1981-2010. Les différences sont présentées à quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).	41

1. Introduction

Les changements climatiques auront un impact majeur sur les écosystèmes aquatiques d'eau douce et d'eau salée. Pour garantir la pérennité des espèces en milieu aquatique, il faut s'assurer non seulement de la présence des éléments nutritifs et d'une qualité adéquate de l'eau, mais aussi d'une concentration d'oxygène dissous et d'une température de l'eau acceptables. Ultimement, les gestionnaires de la Direction de l'expertise sur la faune aquatique du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs aimeraient développer des outils afin de caractériser les habitats thermiques et oxiques de chacune des Unités de Découpage Hydrographiques du Québec (UDH) à partir de leur base de données des lacs du Québec. Nos recherches s'inscrivent dans ce contexte.

Les salmonidés habitant les lacs boréaux du Québec tolèrent mal les eaux relativement chaudes et pauvres en oxygène. C'est le cas entre autres pour le touladi (*Salvelinus namaycush*) (Evans, 2007; Plumb et Blanchfield, 2009) et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) (Larsson, 2005), deux espèces importantes pour la pêche d'autosubsistance et l'industrie touristique des régions nordiques. L'habitat préférentiel du touladi est limité en surface par une température inférieure à 12 ou 15 °C, selon différents auteurs, et en profondeur par une concentration d'oxygène supérieure à 4 ou 6 mg L⁻¹ (Plumb et Blanchfield, 2009). Le refuge thermique (Figure 1) est défini comme le pourcentage du volume d'eau restant sous la température seuil (différente pour chaque espèce) au plus chaud de la saison estivale et qui permet aux poissons de survivre. Un refuge peut être à la fois thermique et oxique.

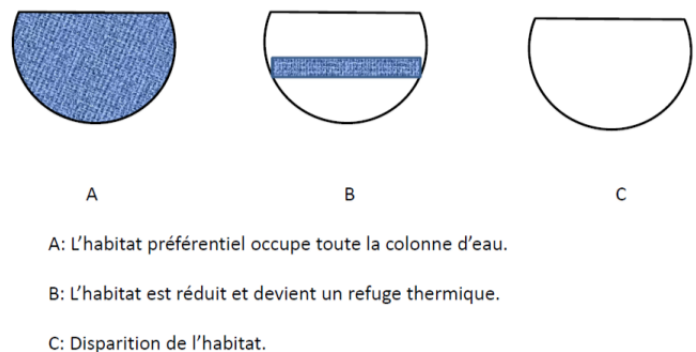


Figure 1. Habitats thermiques et / ou oxiques.

Le refuge thermique (Figure 1) est défini comme le pourcentage du volume d'eau restant sous la température seuil (différente pour chaque espèce) au plus chaud de la saison estivale et qui permet aux poissons de survivre. Un refuge peut être à la fois thermique et oxique.

Ce rapport résume les travaux réalisés entre novembre 2015 et août 2017. Le projet a débuté le 19 novembre 2015 à raison de 3,5 jours par semaine. Le financement des salaires est partagé entre Ouranos, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), ainsi que par le CRSNG. Les opérations de terrain pour les lacs Chibougamau et Jacques-Cartier (novembre 2015 à novembre 2016) ont été financés par le MFFP, tandis que celles du Lac-du-camp (île Bylot; juillet 2015 à juillet 2016) ont été financées par le CRSNG (subventions Découvertes individuelles à Isabelle Laurion et Yves Gratton) et par le Centre d'études nordiques (CEN; observatoire de l'île Bylot). La cueillette des données dans le lac Simoncouche (années 2012 à 2015) a été financée par des subventions à Mme Milla Rautio (UQAC) et à M. Paul del Giorgio (UQAM) dans le cadre des travaux du réseau GRIL (Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique).

2. Contexte / objectifs

L'objectif ultime de notre projet est de déterminer l'impact des changements climatiques sur les habitats thermiques et oxiques des salmonidés des lacs du Québec, du Nunavik, du Nunavut et du Nunatsiavut. Trois objectifs spécifiques avaient été proposés pour la période de financement en cours.

- Mettre au point une classification des lacs du Québec à partir de la banque de données des UDH du MFFP.
- Produire une cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques aux horizons 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 pour trois lacs : un petit (Simoncouche), un moyen (Stewart) et un grand (Jacques-Cartier).
- Estimer l'impact des changements climatiques sur le comportement de l'oxygène dissous dans les mêmes trois lacs et le long d'une section sud-nord.

Nos travaux sont centrés 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. Dans ce deuxième projet (2015-2017), nous devons ajouter le comportement de l'oxygène dissous. Tous nos travaux sont décrits en détails dans les Annexes I, II, III, IV et V. Comme nous l'avons mentionné dans l'Introduction, le MFFP aimerait être en mesure de développer des outils afin de caractériser les habitats des salmonidés à partir de leur base de données des Unités de Découpage Hydrographiques du Québec (UDH). Un des paramètres les plus importants pour la modélisation des habitats thermiques est la bathymétrie. Cette variable est la plupart du temps estimée dans la base de données du MFFP. Une première étude sur l'impact de la profondeur moyenne a été déposée le 15 mars 2016 (Annexe I). Le second travail complété est une classification des lacs du Québec (premier objectif) afin de déterminer les caractéristiques d'un lac-type représentatif de chacune des régions du Québec dans le but ultime de n'avoir à modéliser qu'un seul lac-type pour chacune des régions du Québec. Le rapport a été déposé le 14 octobre 2016 (Annexe II). La cartographie bidimensionnelle des habitats thermiques des lacs du Québec pour les périodes 1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100 (deuxième objectif) a été déposée le 20 février 2017 (Annexe III et <http://espace.inrs.ca/2404/>). Dans notre dernier rapport annuel, les cartes bidimensionnelles étaient limitées aux lacs Stewart (notre moyen lac) et Jacques-Cartier (notre grand lac). Les cartes bidimensionnelles pour le lac Simoncouche (notre petit lac) ont été complétées depuis le dépôt de ce rapport et sont présentées à l'Annexe IV. Le troisième objectif concernait la production d'une version opérationnelle du Modèle MyLake simulant le comportement de l'oxygène dissous dans l'eau des lacs du Québec, du Nunavik, du Nunavut et du Nunatsiavut (Annexe V), mais le temps nous a manqué pour nous rendre jusqu'au Nunavut. Toutes les simulations pour les horizons futurs (2041-2070 et 2071-2100) ont été réalisées à partir des scénarios climatiques produits par Ouranos (Annexe VI). En résumé, le modèle, basé sur les travaux de Couture et al. (2015), simule maintenant convenablement le comportement de l'oxygène dissous, quoiqu'il reste encore beaucoup d'étapes à franchir avant d'obtenir une qualité des simulations semblable à celle obtenue pour les habitats thermiques. Nous avons réussi à étalonner cette version de MyLake pour le lac Simoncouche à l'aide de données *in situ* d'oxygène dissous (OD) et de carbone organique dissous (COD). Le temps nous a manqué pour traiter les lacs Jacques-Cartier, Stewart, Lac-du-camp (Île Bylot) et Char (près de Resolute Bay, au Nunavut).

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Depuis les années 1990, un grand nombre d'études ont été réalisées sur l'impact des changements climatiques sur les lacs de tous les continents. Dans l'Arctique (au nord de 60° N), les modèles prévoient une augmentation de la température de 3.7°C, en moyenne, ainsi qu'une augmentation de -20% à +35% des précipitations entre novembre et avril, pour les années 2071-2090 par rapport à la période de référence 1981-2000 (ACIA 2005). L'impact anticipé le plus notable sera la modification de la couverture de glace, autant pour les couvertures de glace pérennes (Vincent et al., 2008) que pour les couvertures de glace déjà saisonnières (Mueller et al., 2009), rendant la colonne d'eau plus sensible aux échanges avec l'atmosphère et au mélange par le vent. Au Québec, les changements climatiques anticipés auront aussi un effet majeur sur les propriétés physiques des lacs et en particulier les lacs du grand nord (50° N et plus). Selon le rapport de l'ACIA (leur fig. 8.10), les précipitations entre novembre et avril augmenteront de 20 à 25% dans le nord du Québec. Tous ces changements vont provoquer des bouleversements dans la dynamique des écosystèmes d'eau douce dont les réponses aux changements climatiques sont encore mal connues. En effet, la structure et le fonctionnement des écosystèmes nordiques sont intimement liés au cycle gel-dégel, aux processus de mélange et au type de stratification (basée sur la dynamique thermique), à l'intensité de la radiation solaire (influencée par la couverture nuageuse et les propriétés optiques de l'eau), ainsi qu'à d'autres propriétés limnologiques influencées par le climat telles que la concentration en matière organique dissoute (Caplanne et Laurion, 2008), le contenu en oxygène dissous (Stefan et al., 1996) et la concentration en éléments nutritifs. Une fonte plus hâtive au printemps couplée à un gel plus tardif à l'automne va permettre à la couche de surface d'emmagasiner plus de chaleur pendant l'été et au vent de faire pénétrer cette chaleur à une plus grande profondeur en épaississant la couche de surface. La température et le mélange vont aussi affecter les concentrations en oxygène dissous. La solubilité de l'oxygène augmente avec une diminution de la température tandis qu'une période de stratification saisonnière plus longue pourrait accélérer le taux de diminution des concentrations en oxygène dissous dans les eaux de fonds (Stefan et al., 1996). Tous ces impacts varieront avec la latitude, la profondeur des lacs, leur forme et leur superficie.

La température de l'eau et la concentration en oxygène dissous sont considérées comme les deux paramètres les plus limitants pour la croissance et la survie des poissons (Stefan et al., 1996; Christie et Regier, 1988). Nous anticipons que les changements de la stratification verticale modifieront la disponibilité et la répartition des habitats de plusieurs espèces de poissons dans les lacs du Québec, en particulier la famille des salmonidés. Le refuge thermique a été défini comme le faible pourcentage du volume d'eau restant sous la température seuil (un seuil différent pour chaque espèce) au plus chaud de la saison estivale et qui permet aux poissons de survivre. L'importance des refuges thermiques pour le touladi a été confirmée par Mackenzie-Grieve et Post (2006) pour deux lacs du Yukon localisés à environ 60,5° N. Nous nous concentrerons sur l'impact des changements climatiques sur les aspects physiques des lacs en relation avec les habitats préférentiels de deux espèces de salmonidés: le touladi et l'omble chevalier. Le touladi (ou truite grise) est décrit comme une espèce fréquentant des eaux claires, froides et bien oxygénées. L'habitat préférentiel du touladi est défini en surface par une température inférieure à 12°C et en profondeur par une concentration d'oxygène supérieure à 6 ppm (Plumb et Blanchfield, 2009). L'habitat de l'omble chevalier (ou truite rouge) sera aussi considéré dans la présente étude car il est comparable à celui du touladi et nécessitera des ajustements mineurs aux paramètres du modèle.

4. Méthodologie / données

Les méthodes et les résultats des trois premiers rapports (sections 4.2, 4.3 et 4.4) sont décrits en détails dans les Annexes I, II et III. Nous les résumerons brièvement ici. Comme le rapport sur le comportement de l'oxygène dissous (section 4.5) est rédigé en anglais, nous donnerons un peu plus de détails. Nous débuterons cependant par décrire notre outil de travail : le modèle MyLake.

4.1 Le modèle MyLake

Nous utilisons le modèle unidimensionnel 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. Le modèle simule aussi le comportement de la glace et de la neige. Son pas de temps est de 24 h et il nécessite les données suivantes : la bathymétrie du lac (en surface par mètre de profondeur dans notre version), les conditions thermiques initiales observées, ainsi que les valeurs météorologiques journalières de sept variables : 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). Le modèle a été testé dans la phase I de notre projet, après avoir été modifié pour les lacs suivants (Fig. 2) : Bédard (BED: 47,27°N, 71,12°O), Jacques-Cartier (JAC: 47,58°N and 71,22°O), Chibougamau (CHI: 49,83°N, 74,28°O) and Stewart (STW: 58,19°N, 68,43°O). Dans Bélanger et al. (2013) 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 étaient surprenamment similaires aux températures observées (Bélanger et al. 2013). Nous utiliserons donc MyLake de nouveau pour estimer les climatologies (dans le sens des climatologies de 30 ans) annuelles passées et futures des températures de l'eau dans une série de lacs : un petit lac du sud du Québec (le lac Simoncouche; SIM, Fig. 3), un petit lac du Nunavut (le lac Lac-du-camp sur l'île Bylot; BYL, Fig. 3), un moyen lac (le lac Stewart au Nunavik; STW, Fig. 2) et un grand lac du sud du Québec (le lac Jacques-Cartier; JAC, Fig. 2).

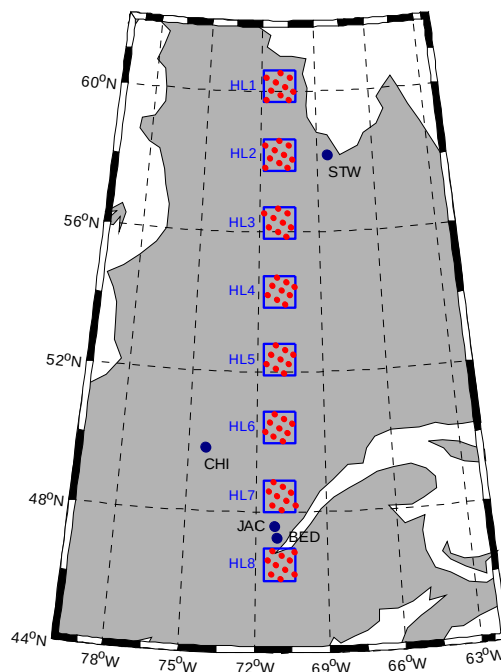


Figure 2. Localisations des lacs réels (BED, JAC, CHI et STW) et hypothétiques (carrées bleues) de la phase I du projet (Bélanger et al., 2013).

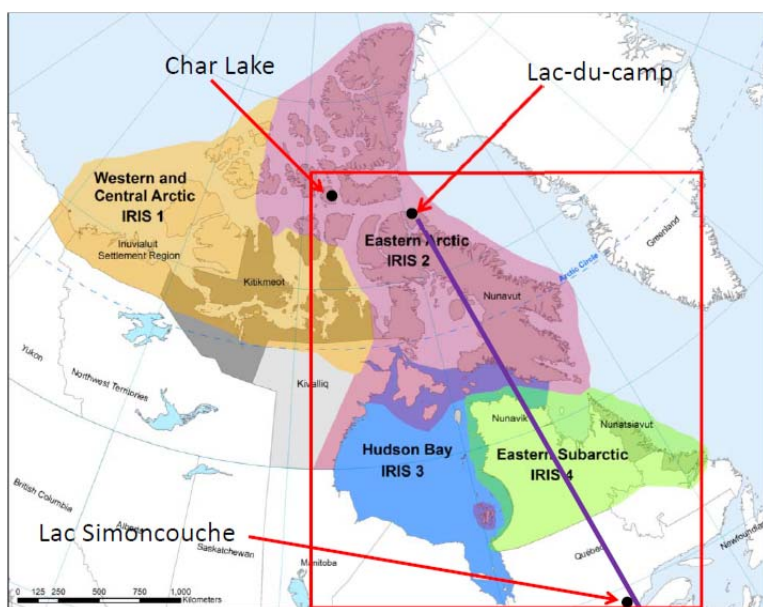


Figure 3. Position des lacs Simoncouche, Char et Lac-du-camp. La ligne mauve représente la section sud-nord que nous proposons de construire. La figure a été modifiée à partir de la figure de Stern et Gaden (2015) identifiant les différentes régions (IRIS) couvertes par le programme ArcticNet.

4.2 Influence de la profondeur moyenne et variations latitudinales

Les caractéristiques morphométriques d'un lac donné sont susceptibles d'influencer sa réponse aux changements climatiques. Elles pourraient influencer la stratification et la dynamique thermique (Kraemer et al., 2015; Butcher et al. 2015). Cette étude est spécialement importante pour le MFFP car elle nous aidera à comprendre comment le choix de la profondeur maximale et de la forme du lac influenceront le comportement des lacs-types de la section suivante (section 4.3).

La profondeur moyenne d'un lac correspond au rapport de son volume sur sa surface. Dans notre étude, nous utilisons le modèle MyLake pour étudier l'impact de la profondeur moyenne sur la température de l'eau et pour déterminer comment les différences induites par une différence de profondeur moyenne devraient évoluer dans le futur. Dans une première étude de sensibilité, la différence de profondeur moyenne résulte d'une différence de volume induite par une différente variation de l'aire avec la profondeur (les profondeurs maximums étant identiques). Dans une seconde étude, la différence de profondeur moyenne résulte d'une différence de volume associée à une différence de profondeur maximum. La température de l'eau, présente et future, est d'intérêt parce qu'elle peut être favorable ou défavorable aux diverses espèces de salmonidés habitant les lacs du Québec. Dans ce contexte, l'impact de la profondeur moyenne sur le dépassement des seuils de 12 °C et 15 °C est aussi considéré.

4.3 Classification des lacs du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik

Ce rapport (Annexe II) décrit une classification statistique des lacs de la province du Québec à partir de paramètres morphologiques (superficie, profondeur moyenne, développement du rivage (DL) et altitude). Pour un meilleur résultat et afin de pallier aux inconvénients liés à l'utilisation d'une seule méthode, les études récentes encouragent l'utilisation des méthodes dites mixtes. Une méthode mixte est une méthode qui regroupe plusieurs algorithmes de classification. Dans cette étude, l'algorithme de classification comprend trois analyses différentes:

1. Une analyse préliminaire des données, incluant une analyse canonique de correspondance (ACC) (Saporta, 2011)
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. Nous vérifions aussi, à l'aide d'une analyse canonique de correspondance (ACC), s'il est pertinent d'utiliser aussi des variables météorologiques pour la classification des lacs. La seconde étape nous permet non seulement de réduire la dimension des données, mais aussi de définir un sous-espace dans lequel nos données seront facilement représentées. En plus de conserver les informations contenues dans l'espace des données initiales, les variables projetées sur 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.

4.4 Cartes des habitats thermiques du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik

Des cartes du Québec ont été produites d'une façon similaire à celle utilisée pour les sections sud-nord dans Bélanger et al. (2013). L'étalonnage du modèle MyLake pour les lacs Jacques-Cartier (JAC) et Stewart (STW) est aussi décrite dans Bélanger et al. (2013). Le lac Stewart est situé à 58,2 °N et 68,4 °O, il a une superficie de 8,52 km² et sa profondeur moyenne est de 5,0 m. Le lac Jacques-Cartier est situé à 47,6 °N et 71,2 °O, il a une superficie de 12,57 km² et sa profondeur moyenne est de 22,3 m. Dans ce rapport de 2013, la section sud-nord a été obtenue en déplaçant le lac Jacques-Cartier à huit positions uniformément espacées, de 46,50 °N à 60,15 °N, le long du méridien 071° O. La méthodologie de production des cartes est décrite dans Bélanger et al. (2017a) que le lecteur trouvera à l'Annexe III. Il y a cependant une différence entre les scénarios climatiques utilisés en 2013 et ceux que nous avons utilisés en 2017. Dans Bélanger et al. (2013), nous avons utilisé les scénarios d'émission A2 et A1b (IPCC 2000). Depuis, la nomenclature des scénarios climatiques a été modifiée. Dans les deux études, nous avons utilisé les mêmes données météorologiques pour le passé de référence (1981-2010). Ces données météorologiques ont été obtenues des réanalyses NARR (North American Regional Reanalysis; voir Mesinger et al., 2005). Pour les horizons futurs, les données météorologiques utilisées pour forcer le modèle sont les données pour la période de référence modifiées selon la méthode des deltas (voir Huard et al., 2014, par exemple). Les nouveaux deltas sont décrits dans l'Annexe III. En résumé, des deltas sont obtenus en comparant les résultats pour une

période de référence, ici 1981-2010, d'un modèle climatique avec les résultats du même modèle pour une ou des périodes futures, ici 2041-2070 et 2071-2100. Les valeurs obtenues sur une période de trente ans, passées et futures, sont ensuite moyennées par jour de l'année. Les deltas sont obtenus en soustrayant les résultats futurs des résultats de référence pour chacun des jours de l'année. Les deltas sont soit additifs (radiation solaire, couverture nuageuse, température de l'air, pression atmosphérique), soit multiplicatifs (vitesse du vent et précipitations). Pour les résultats présentés ici, on a utilisé des deltas mensuels calculés à partir d'une seule simulation du modèle régional canadien du climat (MRCC5) réalisée à Ouranos (simulation bbF / bbG; Logan 2016). Cette simulation est pilotée par le modèle global CanESM2 et utilise le scénario d'émission de gaz à effet de serre RCP 8,5 (IPCC 2014), soit le plus pessimiste des quatre scénarios RCP (*Representative Concentration Pathways, en anglais*).

Le lac considéré (petit, moyen ou grand) est placé à un grand nombre de positions sur l'ensemble du territoire québécois (résolution de 0,5° en latitude et en longitude, allant de 45,25 à 62,25 °N, et de 79,25 à 56,25 °O). Il y a 1680 positions au total (35x48) mais le modèle n'est utilisé qu'aux positions « terrestres » (1156 positions) pour sauver du temps de calcul. Pour chaque pixel de 0,5° x 0,5°, la valeur d'une variable météorologique passée au modèle est celle de la moyenne de toutes les valeurs NARR incluses dans le pixel (soient 1, 2 ou 3 valeurs, correspondant respectivement à 36,5%, 52,0% et 11,5% des cas). Les deltas mensuels considérés pour dériver les séries météorologiques futures sont ceux du point de grille du modèle climatique régional le plus près du lac. La distance moyenne entre la position du centre du lac et le point de grille d'où proviennent les deltas est de 9,32 km, avec une distance maximum de 16,86 km. Un exemple de carte est présenté à la Figure 4.

4.5 Modélisation des concentrations en oxygène dissous

Notre étude des comportements présents et futurs des concentrations en oxygène dissous dans les lacs comporte trois étapes : un échantillonnage de l'oxygène dissous (et des autres variables) dans nos lacs-tests, le contrôle de qualité de ces données et l'étalonnage de la version de MyLake avec oxygène dissous de Couture et al. (2015). Les lacs Jacques-Cartier et Lac-du-camp ont été échantillonnés en 2015-2016. Le MFFP a déployé des thermographes (TidbiT) et des senseurs d'oxygène dissous (MiniDOT) dans les lacs Jacques-Cartier (Fig. 2) et Chibougamau (Fig. 2). L'INRS-ETE (Isabelle Laurion), en collaboration avec le CEN (Denis Sarrazin), a déployé des thermographes (Vemco) et des senseurs d'oxygène dissous (MiniDOT) dans le Lac-du-camp sur l'Île Bylot (Fig. 3). Ces données sont discutées plus en détails à l'Annexe V. Le lac Stewart n'a pas été échantillonné faute de temps et d'argent. Le lac Simoncouche, quant à lui, a été échantillonné entre 2011 et 2015 par des membres du GRIL (M. Rautio et P. del Giorgio). Le Tableau 1 présente les caractéristiques des données disponibles pour les trois lacs.

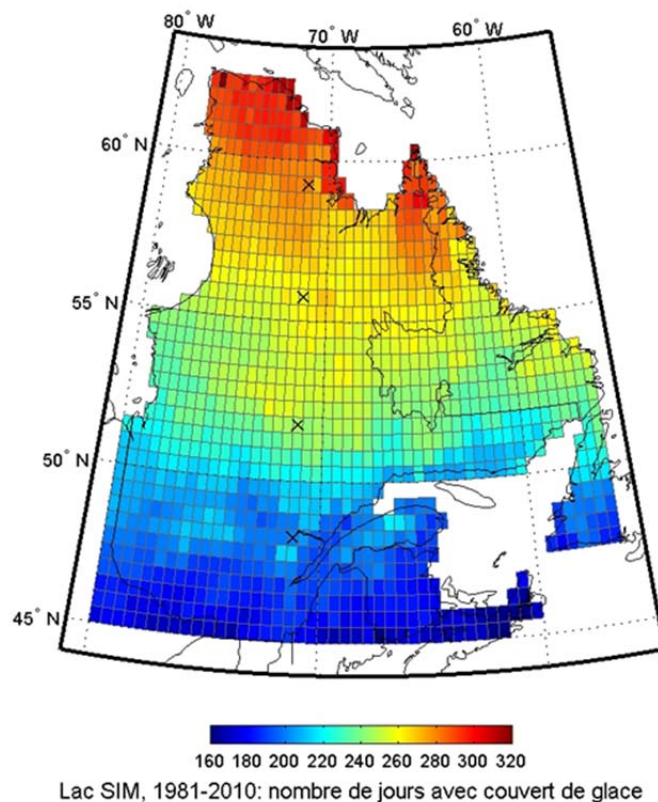


Figure 4. Nombre moyen de jours avec couvert de glace pour la période de trente ans 1981-2010. Le lac Simoncouche a été placé au centre de 1161 pixels (les tuiles) et le modèle MyLake a été exécuté à chacun de ces points à l'aide des données NARR correspondantes. Les X représentent la position des quatre points choisis pour la section nord-sud décrite dans la section 5.4.3.

4.5.1 Données utilisées pour la modélisation du lac Simoncouche

Le lac Simoncouche est située dans la « Forêt d'enseignement et de recherche Simoncouche » (FERS; Figure 5) de l'Université du Québec à Chicoutimi, près de la ville de Saguenay. C'est un lac peu profond composé de deux bassins reliés par un goulot d'étranglement (Fig. 5). Sa profondeur maximale est de 8,5 m. Toutes les données proviennent du bassin le plus profond, à l'exception des débits entrant et sortant. Ce lac est idéal pour un projet de modélisation car les chercheurs du GRIL ont accumulé une quantité très importante de données physiques, biologiques, chimiques et météorologiques entre 2011 et 2015 (Tableau 1). Le lecteur trouvera une discussion de la qualité de ces données dans l'Annexe V. Les données de température de l'eau, d'oxygène dissous et de carbone organique dissous sont présentées sur les figures 6, 7 et 8, respectivement. Nous mentionnerons

Tableau 1. Caractéristiques de nos trois lacs-tests. "n.d." signifie "données non disponibles". Les dates d'échantillonnage (ligne 9) sont celles des senseurs de température (ligne 10) et d'oxygène dissous (ligne 11), à moins d'indications contraires.

Lacs	Simoncouche	Jacques-Cartier	Lac-du-camp
Région	Saguenay	Sud du Québec	Nunavut
Latitude	48.23°N	47.58°N	73.15°N
Longitude	71.25°O	71.22°O	79.98°O
Surface	0.83 km ²	12.57 km ²	n.d.
Profondeur moyenne	6 m	22.3 m	n.d.
Profondeur maximale	8.4 m	50 m	9.6 m
Épaisseur de la glace	Rares observations en fev. et mars 2012	Rares observations in 2015-2016	n.d.
Dates d'échantillonnage	Aux 3 h du 2010/12/21 au 2014/10/29	Aux 1 h du 2015/10/26 au 2016/10/27	Aux 1 h du 2015/07/08 au 2016/07/12
Température	Dans l'épilimnion (3 m) et le métalimnion (5 m)	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 21, 24, 27, 30, 35 40 et 45 m	1, 3, 5, 7, 9 m du 2015/07/08 au 2016/07/12
Oxygène dissous (OD)	Profil mensuels du 2011/05/12 au 2012/07/21	2 m de la surface et 2 m du fond (48 m)	0.5 m de la surface et 1 m du fond
Carbone Organique Dissous (COD)	Mensuel dans l'épilimnion et le métalimnion du 2011/03/22 au 2015/04/01	n.d.	Valeurs en surface 5.3 mg L ⁻¹ (2011) 5.2 mg L ⁻¹ (2013) 5.2 mg L ⁻¹ (2016)
Volume entrant (m ³ s ⁻¹) Courant à l'entrée (m s ⁻¹)	<u>Chaque jour</u> du 1989/02/13 au 1995/09/30 <u>En 2011-2012</u> Mai 5, Juin 13 and 2 Avr. 2012	n.d.	n.d.
DO entrant	<u>En 2011</u> : mai 5, juin 13 juil 6, août 8, Sept. 7, oct. 17, nov. 28 <u>En 2012</u> jan. 10, fev. 20, avr. 2, mai 14	n.d.	n.d.
COD entrant	<u>En 2011</u> avr. 5 and 15, mai 5, juin 13 and 15, juil 4 août 8, sept. 7, oct. 17, nov. 28	n.d.	n.d.
Température entrante	Aux 3 h du 2011/09/11 au 2012/10/07	n.d.	n.d.

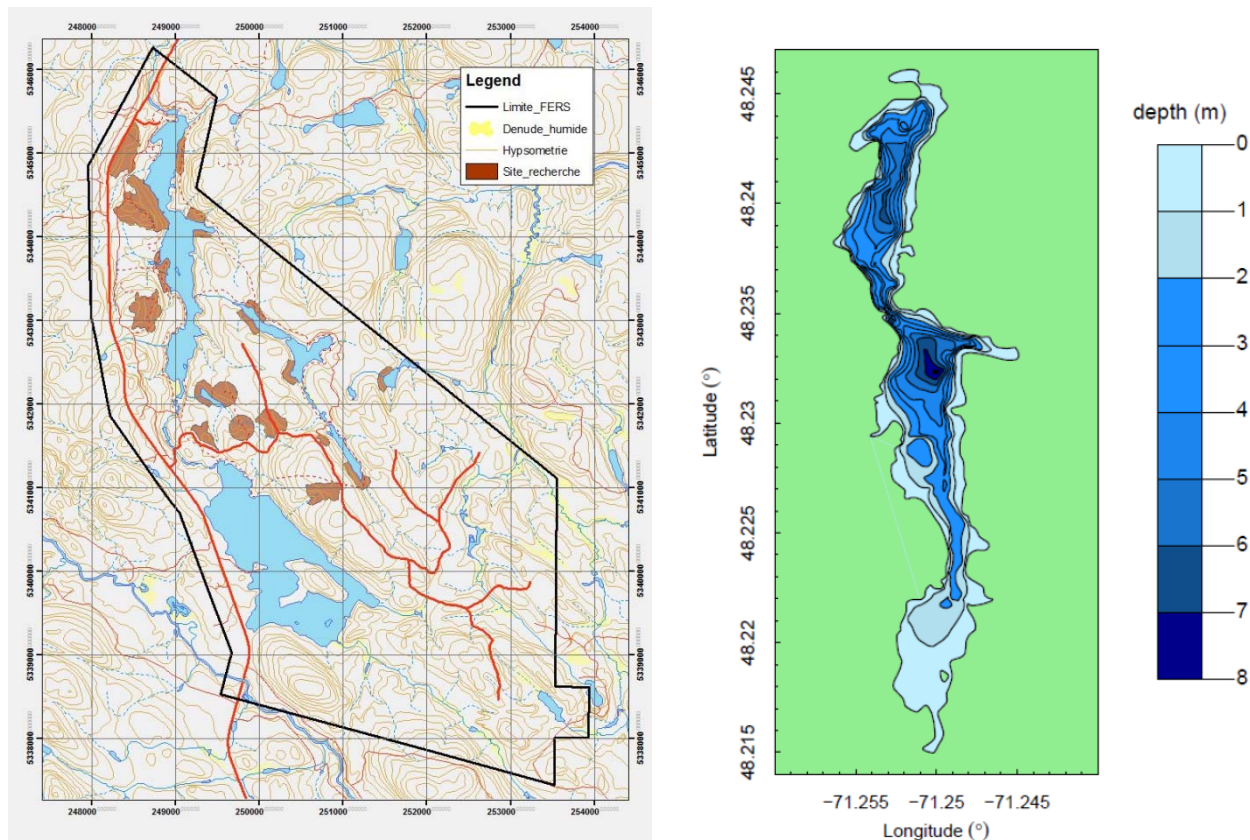


Figure 5. Panneau de gauche: la Forêt d’enseignement et de recherche Simoncouche. Le lac Simoncouche est le lac dans la partie supérieure de la figure. Ses contours bathymétriques sont présentés sur le panneau de droite. L’eau y pénètre par la rivière Simoncouche au nord, en haut des deux panneaux, et en sort par la décharge Des Îlets (au sud) qu’on peut voir en bas du panneau de droite.

simplement ici que le mouillage des thermographes a été déployé le 5 avril 2011, retiré et redéployé le 21 septembre 2011, retiré et redéployé le 10 octobre 2012, puis retiré une dernière fois le 29 octobre 2014. On observe, sur la Figure 6, que les températures de l’été 2012 sont différentes de celles des autres années. Il est tout-à-fait normal que les profondeurs diffèrent légèrement lors de déploiements successifs. C’est ce que nous croyons qui s’est passé lors du déploiement du 21 septembre 2011. En effet, les valeurs modélisées pendant cette période sont semblables à celles des autres années (Figures 9 et 10). Quelles sont les profondeurs probables des deux thermographes? C’est ce que nous avons tenté de déterminer à l’aide du Tableau 2. Selon le Tableau 2, la profondeur moyenne de l’instrument près de la surface serait environ 2,37 m, tandis que la profondeur de l’instrument près du fond serait toujours supérieure à 5,5 m. Nous choisirons donc 5,5 m pour le capteur du fond et 2,0 ou 2,5 m pour le capteur près de la surface. Pourquoi est-ce important? Parce qu’il faut choisir deux profondeurs parmi les valeurs modélisées de température avec lesquelles effectuer les comparaisons. Le modèle MyLake est un modèle dit « à niveau ». C’est-à-dire que certaines variables sont évaluées à l’interface entre les couches (0 m, 1 m, 2 m, etc.) tandis que les variables d’état (température et oxygène dissous) sont évaluées entre les niveaux. Les figures 9 et 10 comparent les valeurs des températures à 5,5 m. La Figure 9 présente une comparaison entre le

thermographe du haut (2-2,5 m) et la température modélisée à 1,5 m, tandis que la Figure 10 présente une comparaison entre le thermographe du haut (2-2,5 m) et la température modélisée à 2,5 m. On observe que l'ajustement est bien meilleur si on utilise 1,5 m. Il ne faut pas oublier que MyLake est un modèle unidimensionnel, donc imparfait. Nous utiliserons donc la température modélisée à 1,5 m lors des comparaisons.

Le volume journalier d'eau entrant dans le lac a été calculé à partir des données du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) pour la période 1989-1995, les seules données disponibles pour ce lac. Pour les valeurs entrantes d'OD, nous avons utilisé la moyenne des observations à l'embouchure de la rivière, soit 8 mg L^{-1} , et la moyenne des observations de la Fig. 8 pour le COD, soit, $6,01 \text{ mg L}^{-1}$.

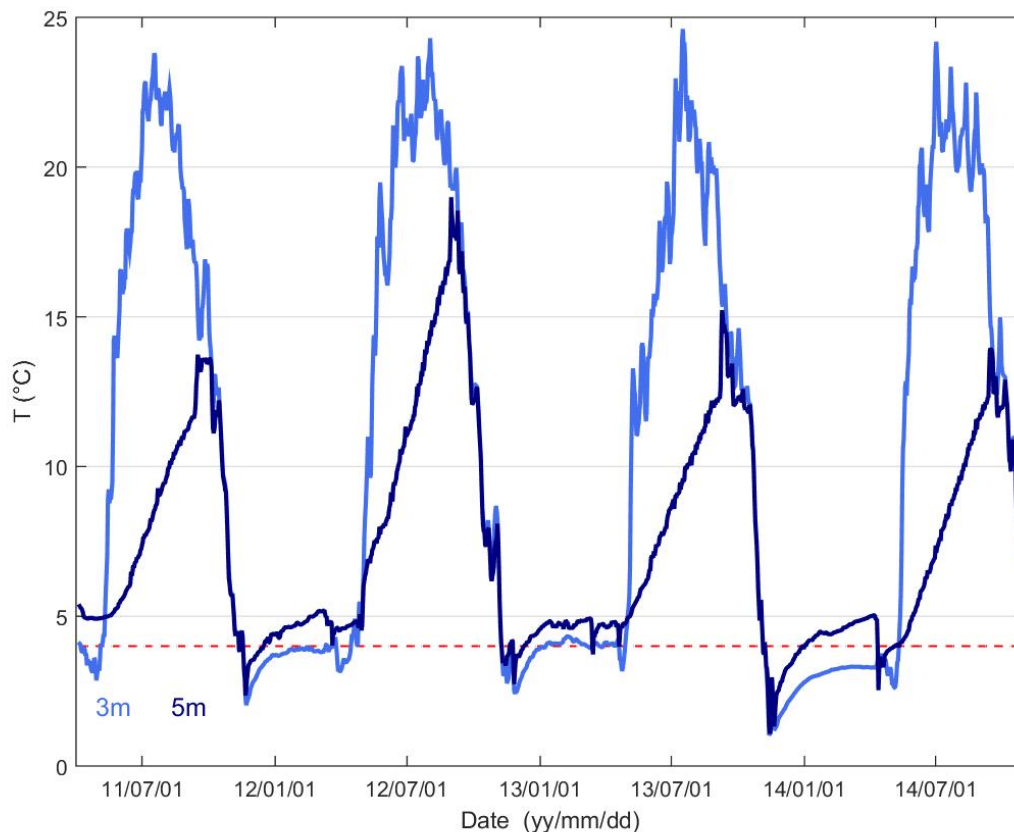


Figure 6. Température de l'eau à 3 m (ligne bleu pâle) et à 5 m (ligne bleu foncée) dans le lac Simoncouche entre 2011 et 2014. La ligne pointillée rouge identifie la température théorique de 4° C en hiver.

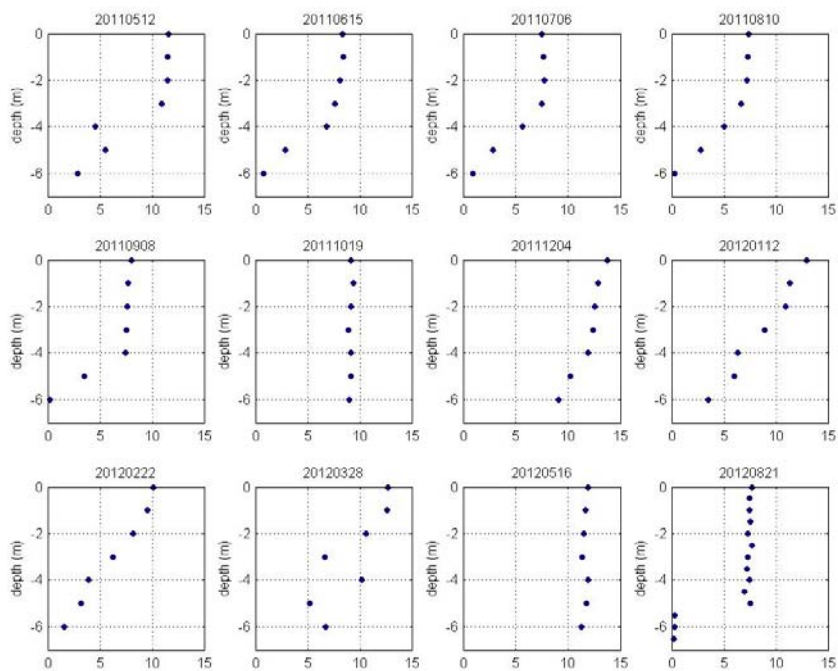


Figure 7. Profils verticaux d'oxygène dissous (en mg L^{-1}) entre mai 2011 et août 2012.

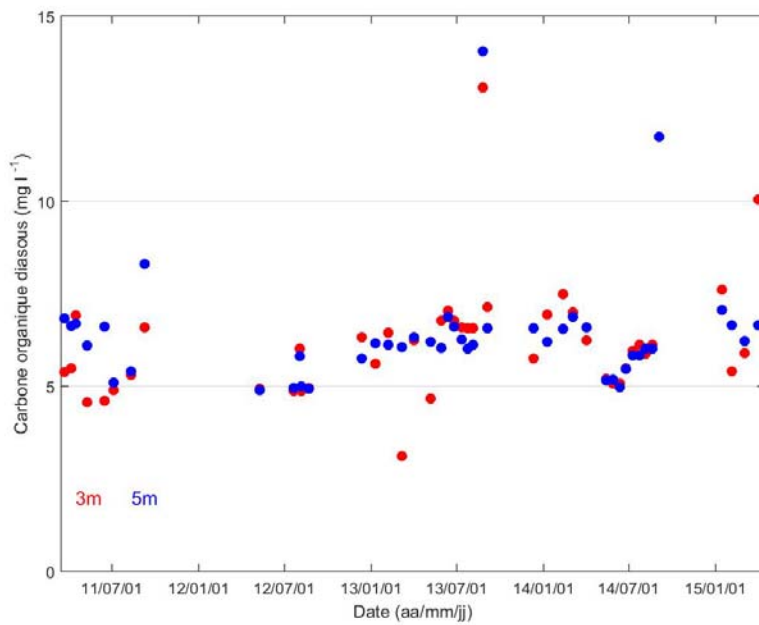


Figure 8. Carbone organique dissous (COD en mg L^{-1}) à 3 m (points rouges) et à 5 m (points bleus) entre mars 2011 et février 2015.

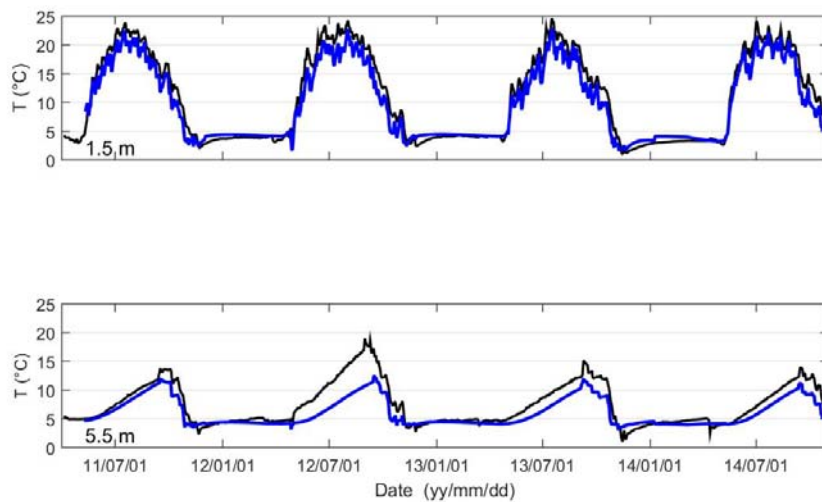


Figure 9. Comparaison des valeurs de température observées (en noir) et modélisées (en bleu) entre 2011 et 2014. Les valeurs modélisées du panneau du haut sont celles obtenues pour une profondeur de 1.5 m.

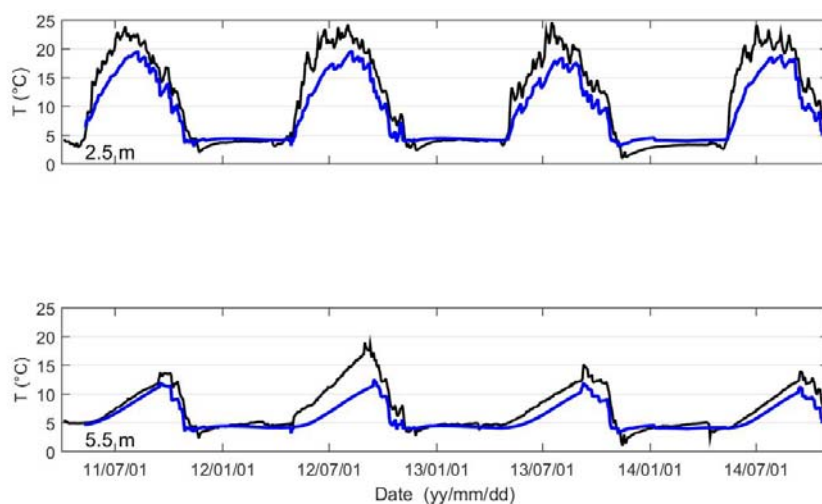


Figure 10. Comparaison des valeurs de température observées (en noir) et modélisées (en bleu) entre 2011 et 2014. Les valeurs modélisées du panneau du haut sont celles obtenues pour une profondeur de 2,5 m.

Tableau 2. Comparaison des températures observées à l'aide des thermographes avec celles des profils verticaux mensuels. « N.D. » signifie valeur non disponible.

Date et heure des profils				T° près de la surface		Profondeur estimée de l'instrument		T° près du fond		Profondeur estimée de l'instrument	
				(~ 3 m)		à partir du profil vertical		(~ 5 m)		à partir du profil vertical	
				(°C)		(m)		(°C)		(m)	
2011	Mai	12	08:45	6,276		2,59		4,943		5,81	
2011	Juin	15	09:10	17,705		2,00		6,120		> 6	
2011	Juil	6	10:00	22,751		2,16		7,754		> 6	
2011	Août	10	08:45	22,044		2,85		10,227		> 6	
2011	Sep	8	10:15	17,231		4,12		11,469		> 6	
Redéploiement de l'ancrage											
2011	Oct	19	10:40	10,699		6,00		10,513		> 6	
2011	Déc	4	10:25	2,865		2,41		3,634		4,45	
2012	Jan	12	10:10	3,738		1,96		4,529		3,65	
2012	Fév	22	09:15	3,887		2,32		4,993		3,59	
2012	Mars	28	08:24	3,102		2,00		4,579		5,93	
2012	Mai	16	09:20	13,908		3,08		7,530		> 6	
2012	Août	20	09:45	20,500		4,00		15,797		5,80	
2012	Août	21	N.D.	20,272		3,64		15,835		5,73	
Profondeur moyenne après avoir retiré les quatre plus grandes valeurs (en jaune)						2,37					

4.5.2 Choix des paramètres du modèle

Nous avons utilisé la version de MyLake de Couture et al. (2015) sans le module d'échange avec les sédiments et sans le module de production phytoplanctonique. L'échange avec les sédiments a plutôt été paramétré à la façon de Walker et Snodgrass (1986). Tous les paramètres, constantes, équations des réactions chimiques et description des modules de calcul sont décrits dans le papier de Couture et al. (2015) et dans les informations supplémentaires publiées avec le papier (sur le site de l'American Geophysical Union). Plus de détails sur le modèle de base sont disponibles dans Saloranta et Anderson (2005) et Saloranta et al. (2007). Nous aussi avons utilisé une méthode d'optimisation afin de déterminer les valeurs optimales de plusieurs constantes. Nous avons choisi l'algorithme génétique disponible dans le « Global Optimization Toolbox » de Matlab®, version 2017a (<https://www.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html>) (Deb, 2000).

5. Résultats et discussion

5.1 Influence de la profondeur et variations latitudinales

Nous avons effectué deux études visant à mieux comprendre l'impact de la profondeur moyenne d'un lac sur le cycle annuel de température de l'eau. Ces études de sensibilité comparent les cycles annuels de lacs hypothétiques ayant des profondeurs moyennes différentes. Dans les deux cas, les différences de profondeur moyenne résultent uniquement de volumes différents sous la surface (aire en surface invariable). Pour la première étude, la profondeur maximum est identique et la différence de volume est induite par une variation différente de l'aire avec la profondeur (deux lacs considérés). Pour la deuxième étude, la profondeur maximum est différente pour chaque lac (trois lacs considérés). Les variations latitudinales de l'impact de la profondeur moyenne sont aussi considérées en plaçant les lacs hypothétiques à trois latitudes le long du méridien 071 °O.

Le rapport complet est disponible à l'Annexe I. En résumé, on observe que les différences entre le contenu en chaleur des lacs de petite et grande profondeurs moyennes augmentent avec la latitude (Figure 11). Les résultats montrent aussi qu'à une latitude donnée les différences de contenu en chaleur volumique entre des lacs de petite et grande profondeurs moyennes devraient augmenter dans le futur (Figure 12). Les augmentations de différences positives sont plus marquées au début de l'été en raison du réchauffement plus hâtif dans le futur. Les augmentations de différences négatives tard à l'automne apparaissent associées à l'arrivée plus tardive du refroidissement dans le futur de même qu'à la différence accrue entre les quantités de chaleur accumulée par les deux lacs.

Dans le contexte des changements climatiques, considérer ce qui se passe plus au sud revient beaucoup à considérer ce qui se passera dans le futur. Ainsi, les variations latitudinales nous renseignent indirectement sur l'évolution future des différences entre les cycles de température des lacs de petite et grande profondeurs moyennes (Figure 11). Ici aussi les résultats laissent entrevoir que les différences de température augmenteront dans le futur, que les différences positives débiteront plus tôt, et que les différences négatives à l'automne se termineront plus tard.

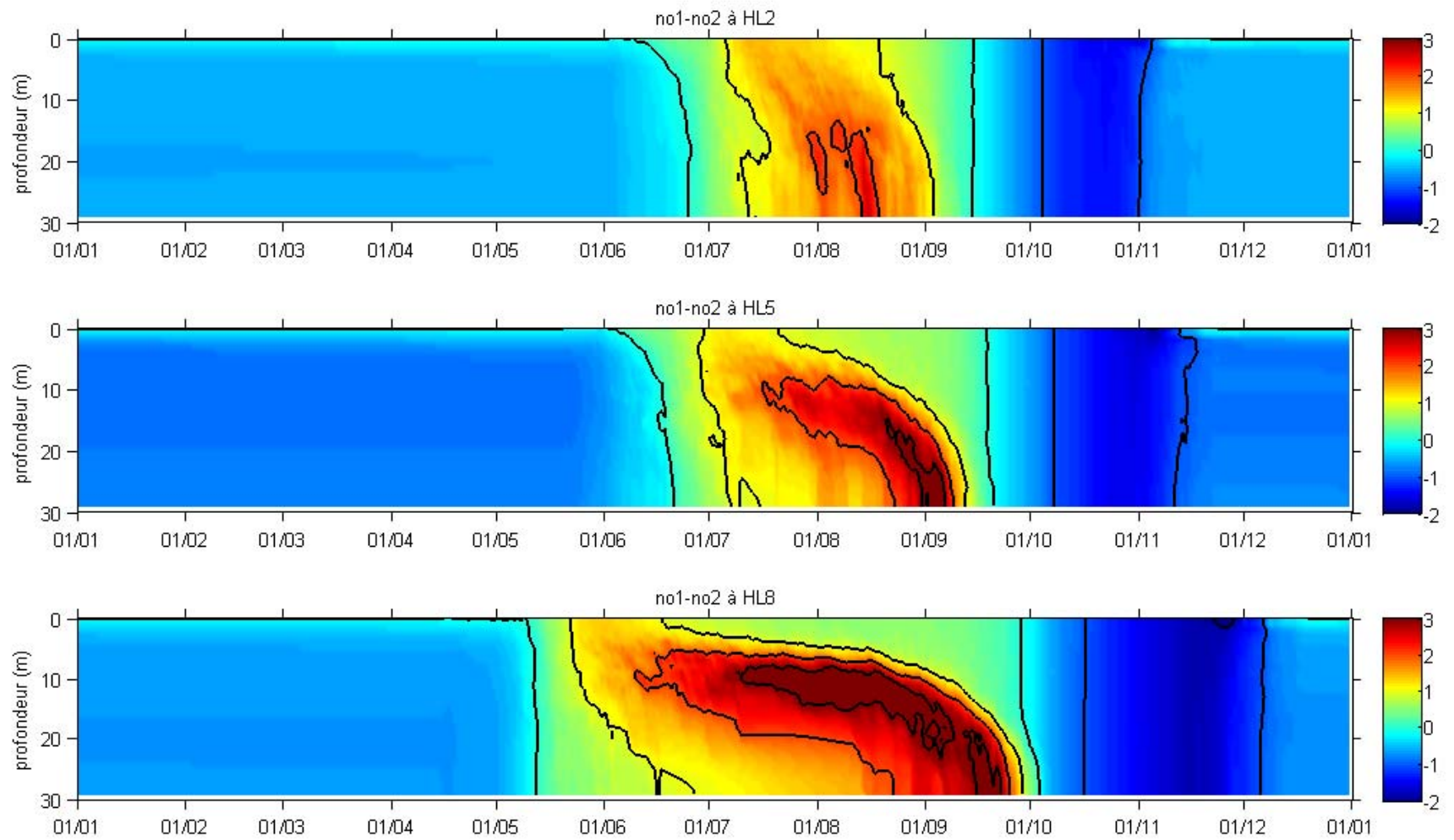


Figure 11. Différence entre les températures des lacs de petite (no 1) et grande (no 2) profondeurs (période 1981-2010) lorsque placés aux latitudes (a) HL2, (b) HL5, et (c) HL8. La position des latitudes HL2, HL5 et HL8 sont celles de la Figure 2.

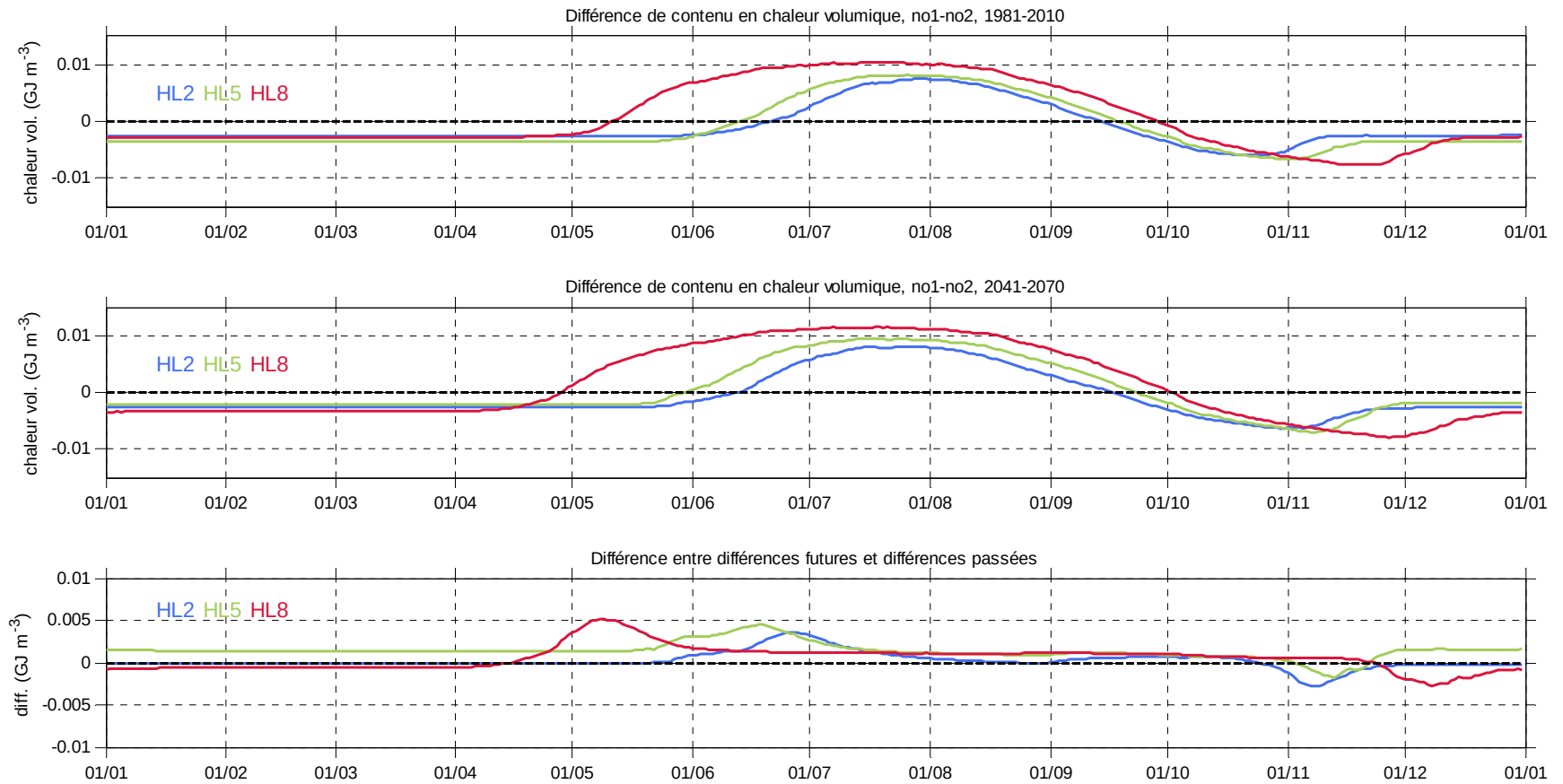


Figure 12. Différence entre les contenus en chaleur volumique des lacs de petite (no 1) et grande (no 2) profondeurs lorsque placés aux latitudes HL2 (bleu), HL5 (vert), et HL8 (rouge); (a) pour la période 1981-2010, (b) pour la période 2041-2070, et (c) différence entre les périodes future et passée. La position des latitudes HL2, HL5 et HL8 sont celles de la Figure 2.

5.2 Classifications des lacs du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik

La base de données utilisée est celle du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Cette base contient les données correspondant aux lacs situés dans douze zones ou Unités de Découpage Hydrographique (UDH) de la province du Québec. La Figure 13 présente les douze zones d'étude.

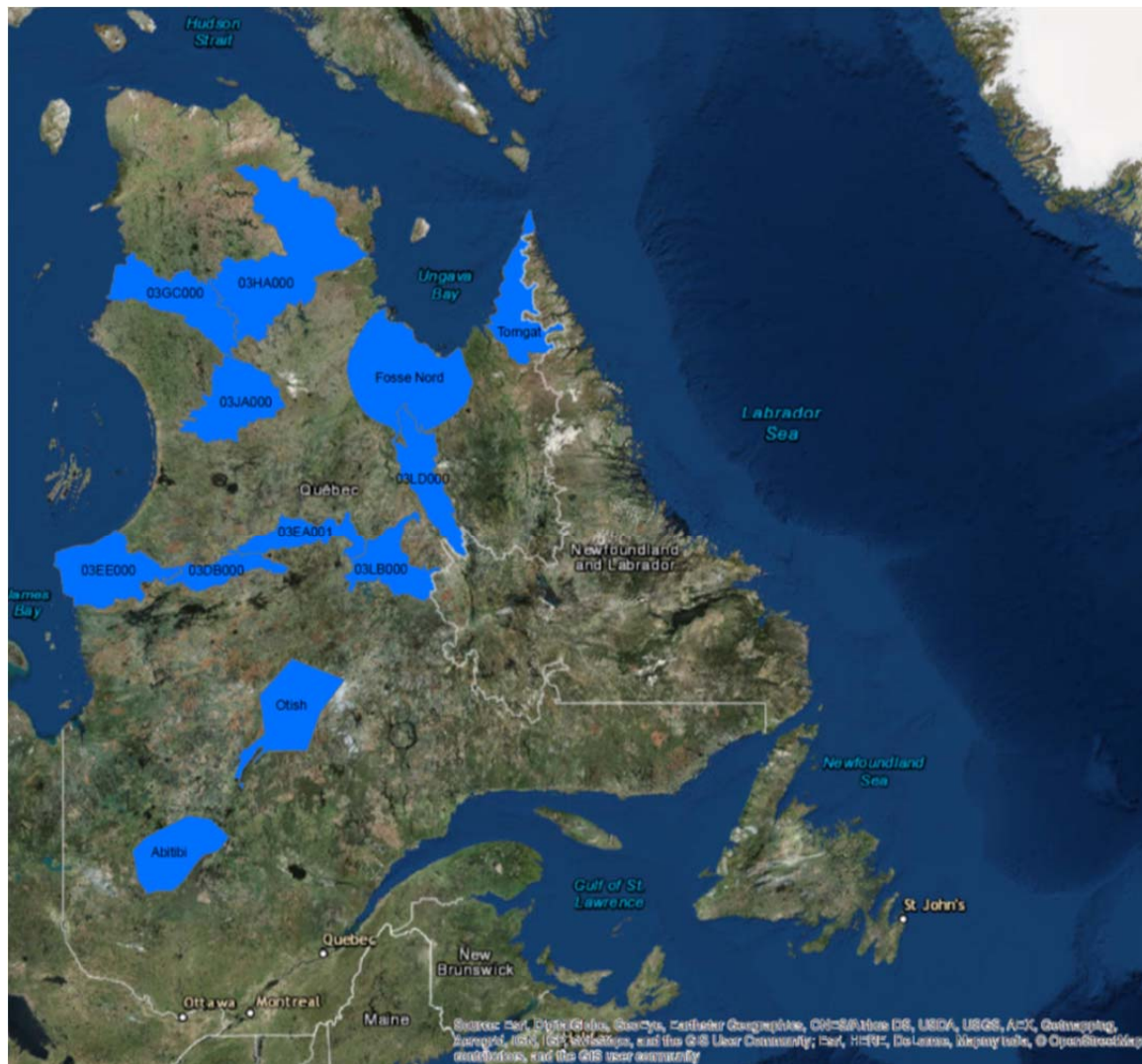


Figure 13. Localisation (en bleu) des douze Unités de Découpage Hydrographique (UDH).

Les refuges thermiques dans les lacs ou plans d'eau de profondeurs moyennes inférieures à 0,2 m seront rapidement impactés par une augmentation et une diminution de la température. Ces lacs qu'on peut qualifier ici de particuliers seront retirés avant la classification par seuillage. En somme, nous allons classer les lacs ayant une superficie comprise entre 10 et $0,5 \times 10^5$ ha, et une

profondeur moyenne comprise entre 0,2 et 30 m. Dans le Tableau 3, nous avons énuméré les superficies des régions, le nombre initial de lacs, le nombre de lacs sélectionnés et le pourcentage de lacs sélectionnés par zone d'étude. Sur les 621 928 lacs initiaux, nous avons sélectionné 27 846 lacs soit 4,47% des lacs disponibles dans notre base de données initiale. Bien que le pourcentage de lacs sélectionnés par zone soit faible, nous obtenons un nombre suffisant de lacs pour effectuer les analyses avec confiance. Le Tableau 4 présente les statistiques descriptives pour l'ensemble des lacs utilisés dans l'analyse multivariée. On note une grande disparité en superficie et en altitude.

Nous avons extrait, pour chaque lac, la moyenne des variables météorologiques suivantes sur une période allant de 1981 à 2010 : la température maximum la température minimum, les précipitations et la température moyenne. Nous avons utilisées les données de réanalyses (NARR) distribuées par Environnement Canada.

Tableau 3. Nombre initial de lacs et nombre de lacs sélectionnés pour chacune des douze zones d'étude.

Numéro de zone	Superficies des zones (km ²)	Nombre initial de lacs	Nombre de lacs sélectionnés	Pourcentage de lacs sélectionnés (%)	Densité (Nombre de lacs sélectionnés / km ²)
Fosse Nord	36319	49854	4994	10,01	0,14
Abitibi	23951	12560	2155	17,15	0,09
Ostish	25718	11365	1019	8,97	0,04
Torn gat	14072	45327	1515	3,34	0,11
03DB000	9192	15762	2144	13,60	0,23
03EA001	12414	40418	2349	5,81	0,16
03EE000	23302	39666	3639	9,17	0,16
03GC000	17955	65533	2037	3,10	0,11
03HA000	39353	65529	2174	3,31	0,05
03JA000	18599	167254	3968	2,37	0,21
03LB000	15314	35022	1483	4,23	0,10
03LD000	15912	37811	2005	5,30	0,12
Total		633946	29483	4,65	

Tableau 4. Statistiques sur les quatre variables morphologiques : superficie, profondeur moyenne, développement du rivage (DL) et altitude.

	Moyenne	Médiane	Écart-Type	Minimum	Maximum
Superficie (ha)	85,11	22,80	649,16	10	4,87x 10 ⁴
DL (%)	2,19	1,95	1,01	1,02	21,00
Zmoy (m)	4,17	4,07	2,31	0,04	29,00
Altitude (m)	27,47	236,21	150,84	0,00	983,00

L'analyse canonique de correspondance distingue clairement deux groupes de variables. Le premier groupe rassemble la précipitation, la latitude, et la température maximale. Le deuxième groupe rassemble les variables morphologiques (profondeur moyenne, développement du littoral et surface). L'analyse montre qu'il n'y a pas de corrélation entre les variables des deux groupes. Les analyses subséquentes se concentreront uniquement sur le deuxième groupe de variables et le premier groupe sera simplement écarté des analyses.

L'analyse en composantes principales nous permet séparer les principaux modes de variabilité des données. En retenant les trois premières composantes, on réduit la dimension des données tout en conservant plus de 80% de l'information. La première composante décrit correctement la superficie et le développement de rivage. La deuxième composante décrit la profondeur moyenne et l'altitude. La troisième composante permet de différencier la profondeur moyenne de l'altitude. Il y a une forte corrélation entre la superficie et le développement de rivage et entre l'altitude et la profondeur moyenne. On peut déduire ici que les lacs de faible profondeur sont situés en haute altitude et inversement. Nous ne pouvons pas identifier les différentes classes à l'aide d'uniquement une ACP. Une classification ascendante hiérarchique sera effectuée sur les trois premières composantes qui expliquent 80% de l'inertie des variables.

À l'aide de l'ACP, on a vu qu'on pouvait représenter nos données dans un espace à trois dimensions sans une déformation trop prononcée. La CAH est effectuée sur les données projetées sur ces dimensions. Pour déterminer le nombre optimal de classe nous avons fait varier le nombre de classes à retenir de 2 à 30. 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 :

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

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

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

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

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

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 masse de la classe i , G le centre de gravité de l'ensemble des individus et d est la distance euclidienne.

Nous avons évalué les grandeurs suivantes : l'inertie inter- et intra-classe et calculé Q et $SPRSQ$. Il faut faire un compromis entre le choix des critères et le nombre de classes. Avec onze classes, Q vaut 0,85. Au-delà de onze classes, Q ne varie plus significativement. Les caractéristiques des onze classes sont présentées dans le Tableau 5. La classification des lacs de chacune des zones en termes des onze classes est présentée à la Figure 14. Plus de 50% des lacs de neuf régions sur douze peuvent être représentés par une seule classe.

Tableau 5. Médianes des paramètres morphologiques pour chaque classe. Sup, DL et Pmoy signifient superficie, distance linéaire, et profondeur moyenne, respectivement.

	Sup (Ha)	DL	Pmoy (m)	Altitude (m)
Classe 1	17,49	1,94	0,85	198,00
Classe 2	27,28	1,75	5,92	203,00
Classe 3	70,50	1,88	10,71	263,76
Classe 4	16,91	1,77	3,87	186,08
Classe 5	364,13	5,17	4,32	237,79
Classe 6	17,47	1,75	3,88	399,90
Classe 7	4 891,58	7,99	5,40	230,00
Classe 8	23,22	1,91	4,72	550,39
Classe 9	42,46	2,89	4,10	407,17
Classe 10	22 199,92	15,21	2,81	164,01
Classe 11	73,99	3,10	4,90	207,00

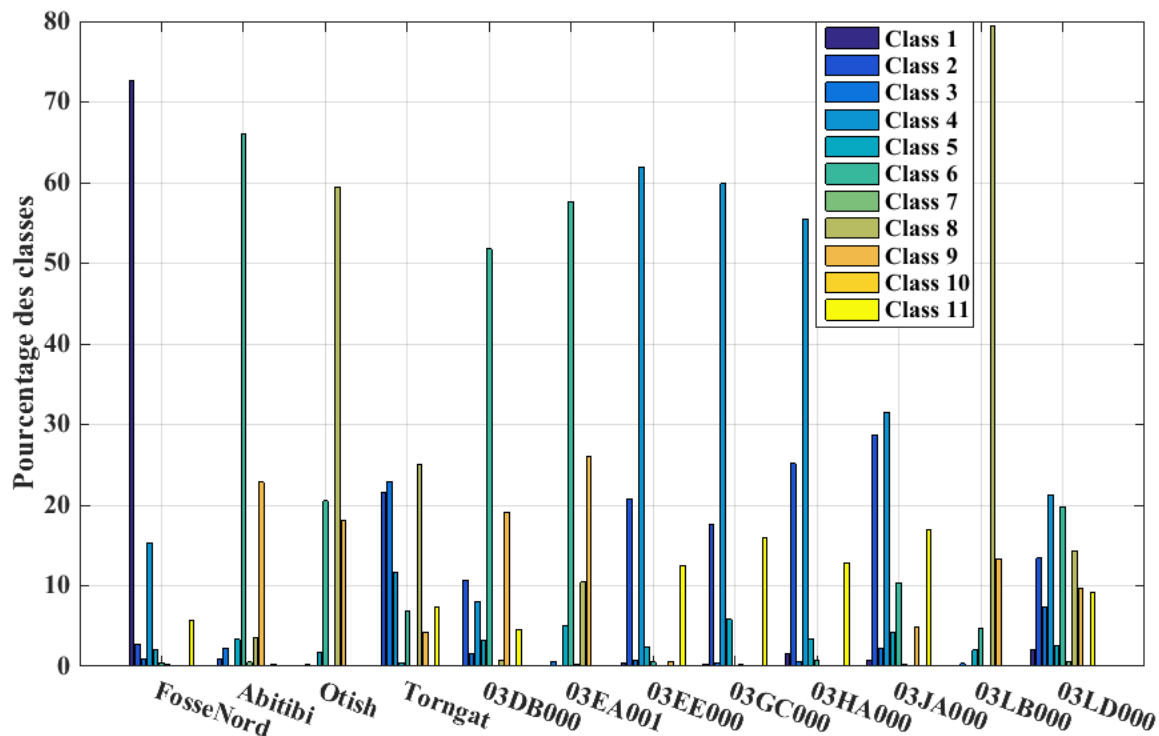


Figure 14. Pourcentage de chacune des classes dans les douze zones d'étude.

L'étape ultime est la validation de la classification. C'est-à-dire que nous devons vérifier que la classification proposée permet de prédire l'appartenance d'un lac à sa classe avec peu d'erreur. Une analyse discriminante est aussi effectuée pour caractériser les classes. Un arbre de prédiction est finalement utilisé pour mesurer la validité intrinsèque des individus par rapport à leur classe et par rapport aux autres classes. Par exemple, nous testons l'appartenance des lacs d'une classe (classe 1, par exemple) à elle-même et l'appartenance des lacs des autres classes (classe 2,..., classe 10) à celle-ci. Nous avons comptabilisé les vrais positifs (i.e. un lac appartient à une classe et l'arbre prédit qu'il appartient à la classe), les faux positifs (i.e. un lac appartient à une classe et l'arbre prédit qu'il n'appartient pas à la classe), les vrais négatifs (i.e. un lac n'appartient pas à une classe et l'arbre prédit qu'il n'appartient pas à la classe) et les faux négatifs (i.e. un lac n'appartient pas à une classe et l'arbre prédit qu'il appartient à la classe). La Figure 15 présente ces pourcentages.

Pour l'ensemble des classes les taux de vrais positifs et vrais négatifs sont nettement supérieurs aux taux de faux positifs et faux négatifs. Supposons qu'on souhaite avoir moins de 20% de taux de faux positifs et de faux négatifs. Soit une classe quelconque : si on suppose que d'affirmer qu'un lac appartient à cette classe alors qu'il n'y appartient pas est plus dangereux que d'affirmer qu'un lac n'appartient pas cette classe alors qu'il y appartient, notre classification répondra alors à nos attentes. Dans le cas contraire, on peut émettre des réserves sur la qualité de classification obtenue car les taux de faux positifs sont supérieurs à 20% pour les classes 2, 3, 9, et 11.

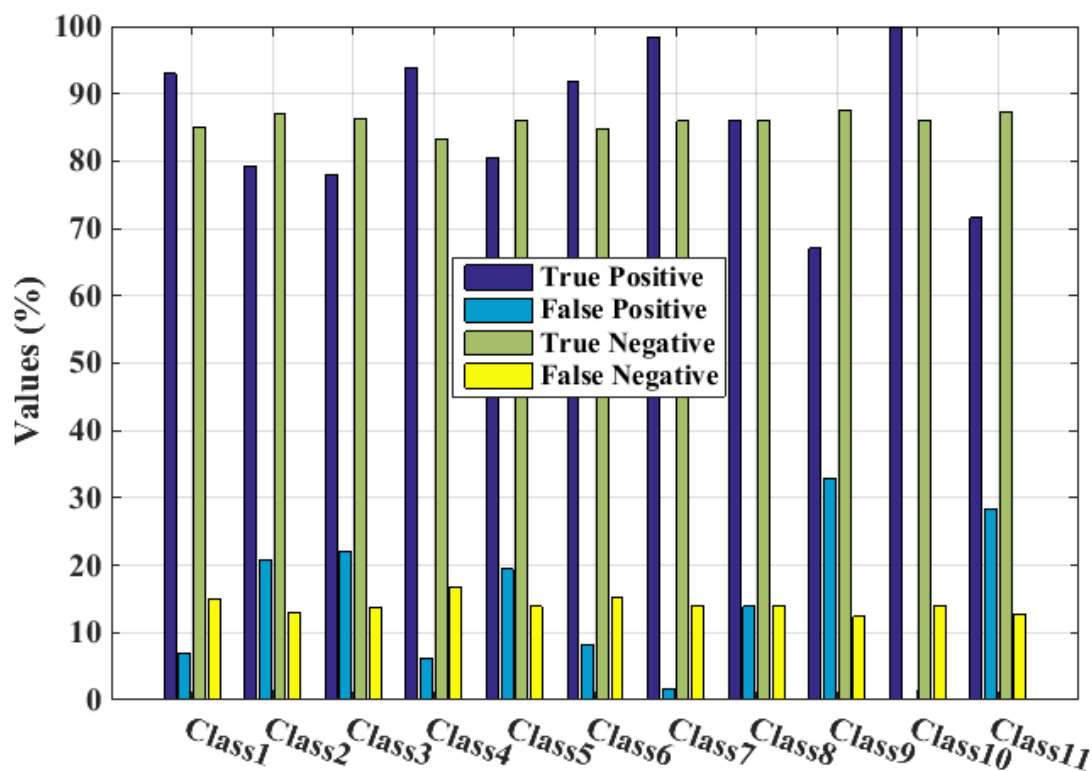


Figure 15. Validation intrinsèque de la classification : les pourcentages de vrais positifs et de vrais négatifs dominent le diagramme.

5.3 Cartographie des lacs du Québec, du Nunatsiavut et du Nunavik

Les indicateurs choisis pour les cartes produites ont été conçus en collaboration avec le MFFP de manière à 1) refléter les variations spatiales de l'intensité et la durée du stress thermique en été sur les populations de salmonidés, et 2) illustrer les variations spatiales des conditions thermiques propices à la croissance et à la productivité des salmonidés. La liste des cartes produites est la suivante.

- Carte 1a Maximum de contenu en chaleur
- Carte 1b Maximum de contenu en chaleur (normalisé)
- Carte 1c Occurrence du maximum de contenu en chaleur
- Carte 2 Température moyenne pour une partie de la colonne d'eau et une partie du cycle annuel
- Carte 3a Maximum d'épaisseur de glace
- Carte 3b Occurrence du maximum d'épaisseur de glace
- Carte 4a Volume minimum avec température sous la limite supérieure de température

- Carte 4b (en % du volume total)
Occurrence du volume minimum sous la limite supérieure pour les cas où le volume minimum n'est ni 0% ni 100%
- Carte 4c¹
Occurrence de la première journée avec température au-dessus de la limite supérieure pour tout le volume du lac
- Carte 5¹
Nombre de jours avec température au-dessus de la limite supérieure pour tout le volume du lac
- Carte 6¹
Nombre de degrés-jours au-dessus de la limite supérieure lorsque la température est au-dessus de la limite supérieure pour tout le volume du lac
- Carte 7
Nombre de jours avec au moins xx% du volume du lac avec température entre les limites inférieure et supérieure
- Carte 8
Nombre de degrés-jours au-dessus de la limite inférieure lorsque la température est entre les limites inférieure et supérieure
- Carte 9
Nombre de m³-jours avec température entre les limites inférieure et supérieure
- Carte 10
Nombre de m³-degrés-jours au-dessus de la limite inférieure lorsque la température est entre les limites inférieure et supérieure

Nous avons donc produit 18 cartes (il y a trois cartes pour l'indicateur 7) pour chacune des lacs (petit, moyen et grand) et pour chacune des périodes (1981-2010, 2041-2070 et 2071-2100), pour un grand total de 162 cartes. Les cartes pour les moyens et grand lacs sont incluses dans le rapport préliminaire de Bélanger et al. (2017a) reproduit à l'Annexe III. Les cartes pour le petit lac, le lac Simoncouche, ont été produites après le dépôt de du rapport et sont reproduites à l'Annexe IV. Un exemple de carte est présenté à la Figure 4.

5.4 Influence des changements climatiques sur les concentrations en oxygène dissous

Les simulations des concentrations en oxygène dissous pour les lacs Jacques-Cartier, Lac-du-camp, Char et Stewart n'ont pas encore été effectuées. Nous nous concentrerons donc ici sur les simulations pour le lac Simoncouche.

5.4.1 Simulations des températures de l'eau

Les simulations et les observations de la température de l'eau pour le lac Simoncouche ont déjà été présentées sur la Figure 9. Comme il est mentionné dans la section sur le contrôle de qualité des données météorologiques (sections 4.2.2 et 5.1 de l'Annexe 5) nous avons dû utiliser les données de radiation globale des simulations NARR plutôt que les observations recueillies à la station de Bagotville. En effet, il a été impossible de reproduire les températures maximales observées dans le lac en utilisant ces dernières observations. L'ajustement du modèle aux observations est excellent si

¹ Ne s'applique pas lorsque la température n'est jamais au-dessus de la limite supérieure pour tout le volume du lac.

on utilise les données NARR. Les principales différences entre les valeurs observées et les valeurs modélisées sont les suivantes.

- En hiver, les températures simulées dans l'épilimnion sont légèrement plus élevées que les observations.
- Le refroidissement automnal se produit légèrement trop tôt.
- Les températures maximales simulées dans l'hypolimnion sont légèrement plus basses que les observations.

Ces différences pourraient être expliquées en partie par le fait qu'il est difficile d'ajuster parfaitement les profondeurs des observations et les profondeurs des simulations. Quoiqu'il en soit, les températures simulées peuvent être considérées suffisamment justes pour qu'on ignore ces erreurs dans l'interprétation des simulations des concentrations en oxygène dissous.

5.4.2 Simulations des concentrations en oxygène dissous

Les observations des concentrations en OD recueillies dans le lac Simoncouche l'ont été par l'entremise de profils verticaux (Figure 7). Nous allons supposer que les profondeurs de ces mesures sont sans erreurs, malgré la variabilité qu'on peut observer dans le Tableau 2. Comme il a été mentionné à la section 4.5.1, MyLake est un modèle « à niveaux » et les variables d'état sont calculées entre deux niveaux : 0,5 m, 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m, 4,5 m et 5,5 m. Nous devons donc moyenner deux couches pour obtenir les valeurs simulées à des profondeurs correspondant aux mêmes profondeurs que celles des profils de la Figure 7.

Les variables ayant le plus grand impact sur les concentrations en OD sont la température, les dates de gel-dégel et le COD. La concentration de saturation de l'oxygène décroît avec l'augmentation de température tandis que des dates de dégel plus hâtives vont allonger la période d'échange air-eau. De plus grandes concentrations de COD vont réduire les concentrations en OD via une augmentation du métabolisme microbien (Couture et al., 2015). Un des paramètres les plus importants du modèle est la fraction de COD labile (ou autochtone). Le processus d'optimisation suggère que seul 13.70% du COD du lac Simoncouche est disponible pour des transformations. Ce résultat nous porte à croire que cette fraction variera avec la latitude et le type de bassin versant. Les deux autres paramètres journaliers importants sont la demande biologique en oxygène ($BOD : k_{BOD} = 0.3410 \text{ j}^{-1}$) et la demande en oxygène des sédiments ($k_{SOD} = 101.6880 \text{ mg m}^{-2}$). La BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) est la fraction de l'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique dans la colonne d'eau tandis que la SOD (*Sediment Oxygen Demand*) représente la respiration des sédiments, c'est-à-dire l'oxygène nécessaire pour les organismes biologiques et les réactions chimiques.

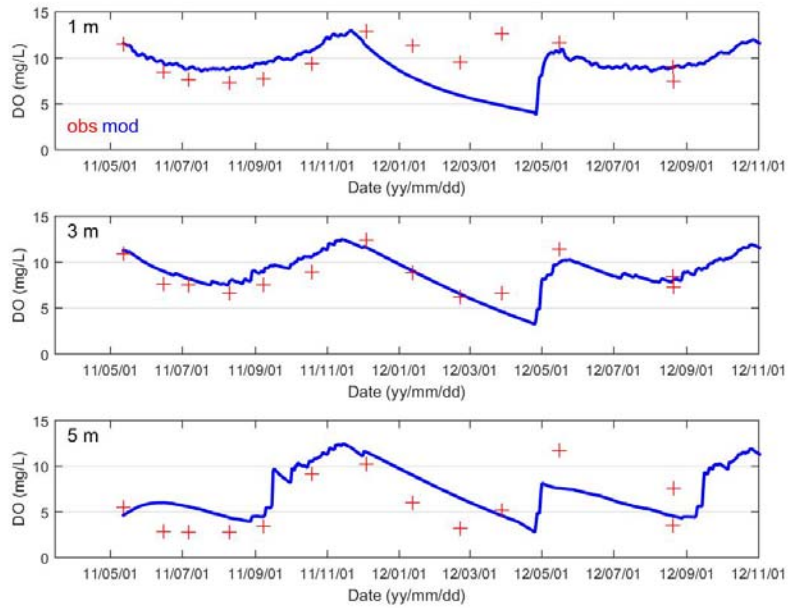


Figure 16. Concentrations en oxygène dissous simulées (ligne bleues) entre le 12 mai 2011 et le 1^{er} novembre 2012. Les + rouges sont les observations. La simulation a été réalisée avec les paramètres optimisés : la fraction réactive de DOC pénétrant dans le lac est de 13.70%, $k_{SOD} = 101.6880 \text{ mg m}^{-2}$, et $k_{BOD} = 0.3410 \text{ j}^{-1}$.

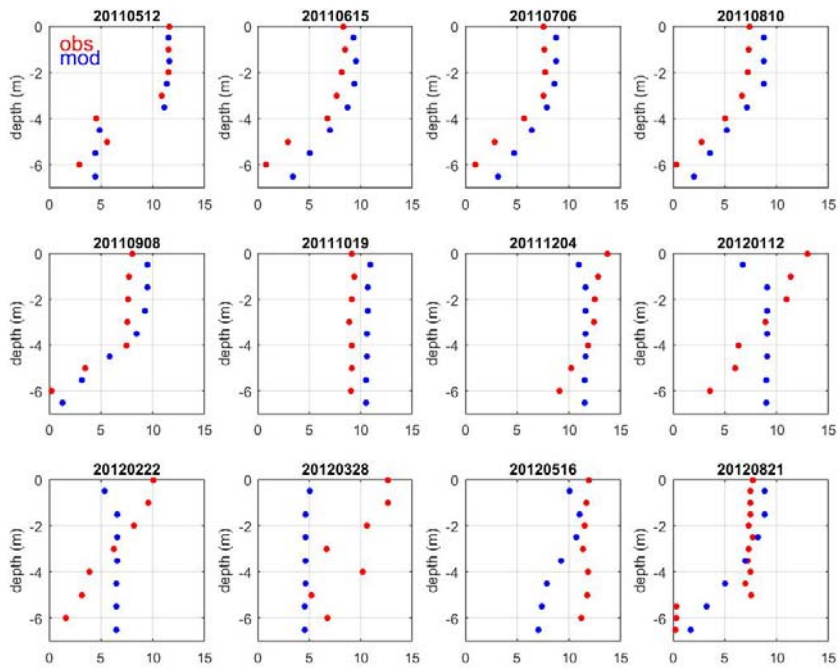


Figure 17. Profils verticaux d'oxygène dissous observés (points bleus) et modélisés (points rouges) entre mai 2011 et août 2012. L'information est la même que sur la Figure 16, mais elle est présentée différemment.

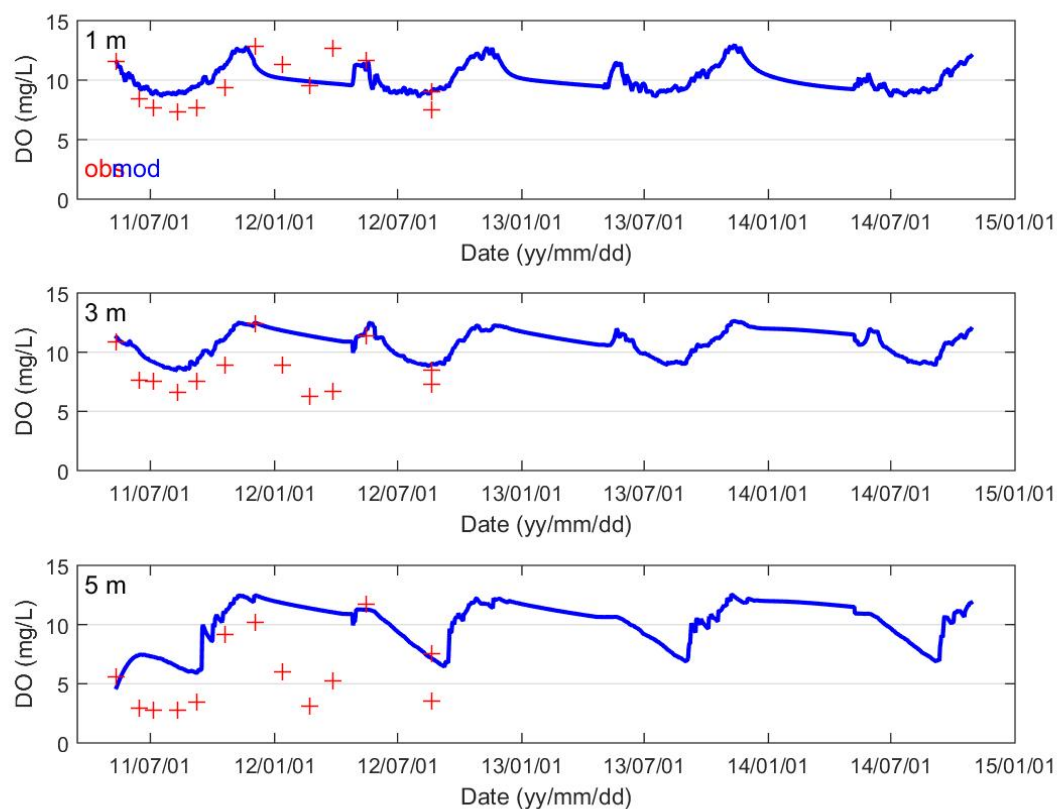


Figure 18. Concentrations en oxygène dissous simulées (ligne bleues) entre mai 2011 et le 1er novembre 2014. Les + rouges sont les observations. La simulation a été réalisée avec le module d'échange avec les sédiments. La fraction réactive de DOC pénétrant dans le lac est aussi de 13.70% et $k_{BOD} = 0.3410 \text{ j}^{-1}$.

La solution optimale, pour l'instant, est présentée sur les Figures 16 et 17. Le modèle suit les observations jusqu'au premier hiver. Les concentrations simulées deviennent trop grandes dans l'épilimnion dès le début de la formation de la glace, mais le modèle semble récupérer dès que la glace commence à fondre. Le modèle réussit très bien à simuler les concentrations dans le metalimnion sur toute la période de simulation, mais les résultats se dégradent dans l'hypolimnion à partir du milieu du premier hiver. La simulation des processus utilisant l'oxygène près de la surface et près du fonds doit clairement être améliorée.

La Figure 18 présente une simulation couvrant la période complète des observations de température de l'eau, c'est-à-dire de mai 2011 à octobre 2014, même si les observations d'OD ne sont plus disponibles après août 2012. Cette simulation utilise le module diagénétique avec les paramètres utilisés dans Couture et al. (2015), au lieu d'une simple demande d'oxygène (SOD). Trois conclusions peuvent être tirées de la Figure 18. Tout d'abord, le modèle est stable année après année, après une courte période d'ajustement. Deuxièmement, nous avons besoin d'un jeu complet d'observations pour chaque lac pour utiliser le module diagénétique. Troisièmement, une simple formulation du type « Demande d'oxygène par les sédiments » sera adéquate dans plusieurs situations.

5.4.3 Variations latitudinales

Comme le temps a manqué pour créer une section sud-nord complète entre 45° et 75° N, nous avons choisi quatre latitudes entre 48° et 60° N. La sélection est basée sur la couverture de glace pour la période 1981-2010. Les latitudes choisies sont représentatives de quatre concentrations de glace fort différentes (Figure 4) qui devraient avoir des impacts très différents sur les concentrations en OD. La version du modèle produisant les résultats illustrés sur les Figures 16 et 17 est maintenant utilisée à quatre latitudes différentes (48,25°, 51,25°, 55,75° and 59,25°; Figure 4) avec les données NARR de la période 1981-2010 correspondant à chacune des latitudes choisies et les deltas correspondant à nos deux périodes de simulation (2041-2070 and 2071-2100). Les simulations pour la période 1981-2010 sont présentées sur la Figure 19, tandis que les simulations pour les périodes 2041-2070 et 2071-2100 sont présentées sur les Figures 20 et 21, respectivement. Les différences entre les périodes 2041-2070 et 1981-2010 sont présentées sur la Figure 22 tandis que les différences entre les périodes 2071-2100 et 1981-2010 sont présentées sur la Figure 23.

Comme prévu, des dates de fontes plus hâtives dans le sud du Québec vont permettre aux concentrations d'oxygène d'augmenter dès le mois de mai. L'apparition de ces concentrations peut devancer celles des régions plus nordiques par jusqu'à un mois. D'une façon similaire, les lacs du sud demeurent oxygénés plus longtemps que les lacs plus au nord. En été, les lacs plus au nord demeurent plus oxygénés que les lacs plus au sud jusqu'à un point de rupture en octobre à partir duquel la situation s'inverse. Le même comportement est observé en 2041-2070 et en 2071-2100. Cependant, le début de l'oxygénation printanière débutera au début mai dans le sud en 2041-2070 et à la fin avril en 2071-2100. Une augmentation similaire d'un mois de la durée d'oxygénation peut être observée entre 1981-2010 et 2071-2100. Les Figures 18, 20 et 21 ont la même échelle verticale : 0-15 mg L⁻¹. Les Figures 22 et 23 ont des échelles verticales différentes : 0-7 mg L⁻¹ pour la Figure 22 et 0-9 mg L⁻¹ pour la Figure 23. Dans ces deux dernières figures, les patrons des comportements futurs sont semblables mais présentent des intensités de comportement augmentant avec le temps.

Le modèle doit encore être amélioré avant d'être en mesure de discuter en détails les résultats des simulations.

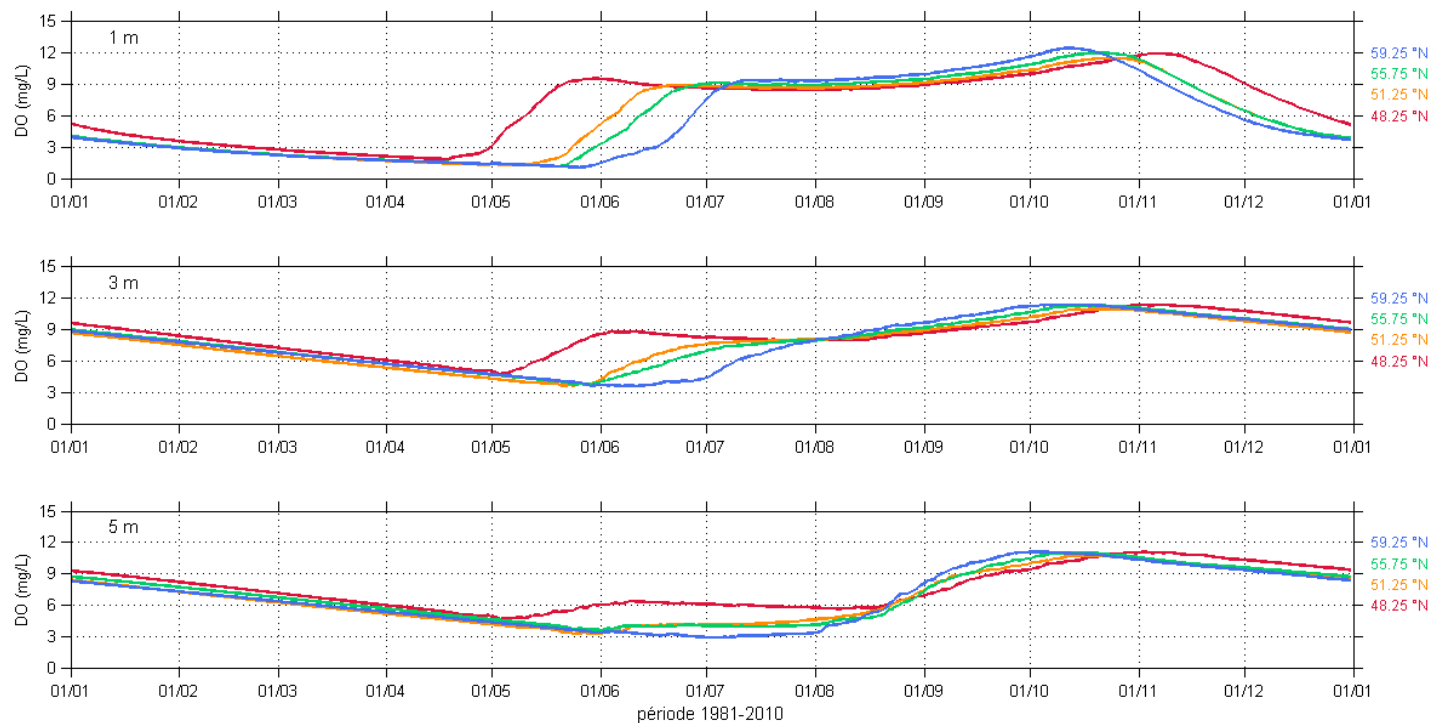


Figure 19. Influence du gradient latitudinal pour le lac Simoncouche pour la période 1981-2010. Les résultats sont présentés pour quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).

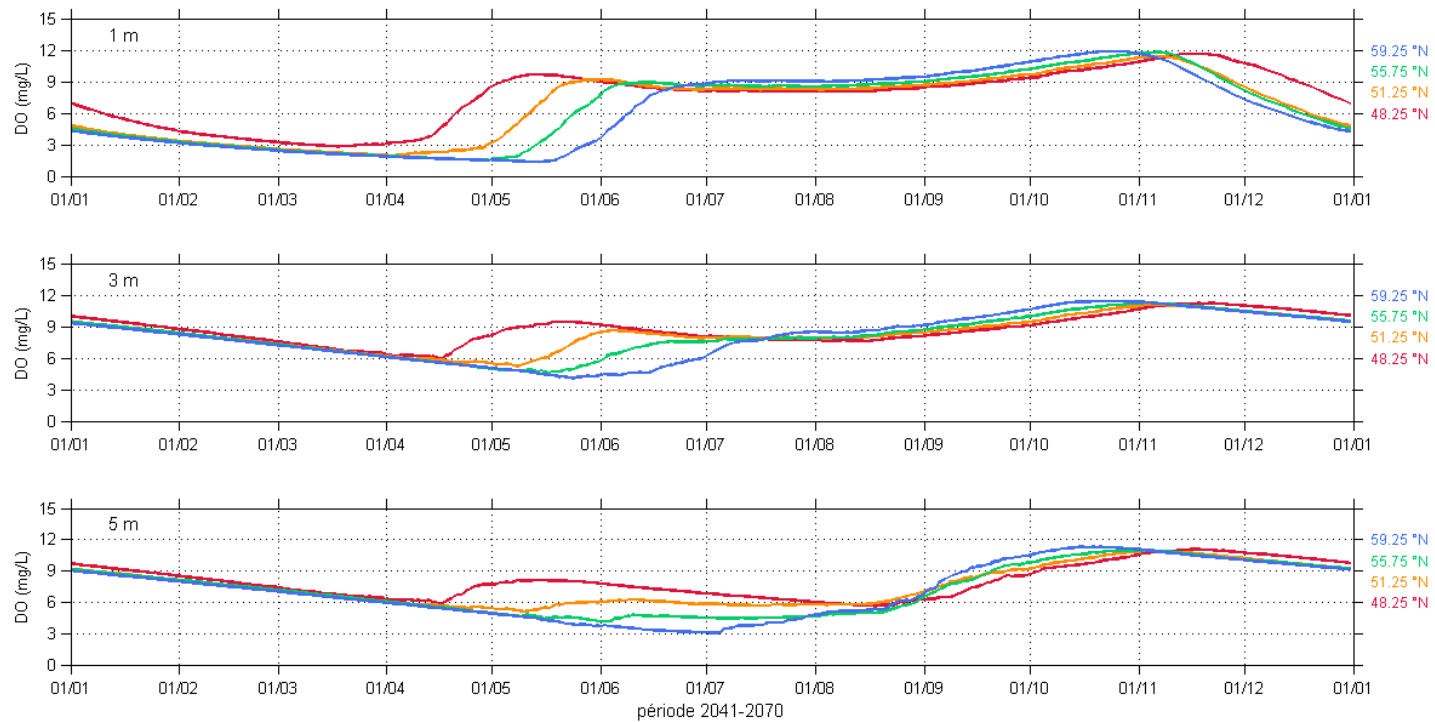


Figure 20. Influence du gradient latitudinal pour le lac Simoncouche pour la période 2041-2070. Les résultats sont présentés pour quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).

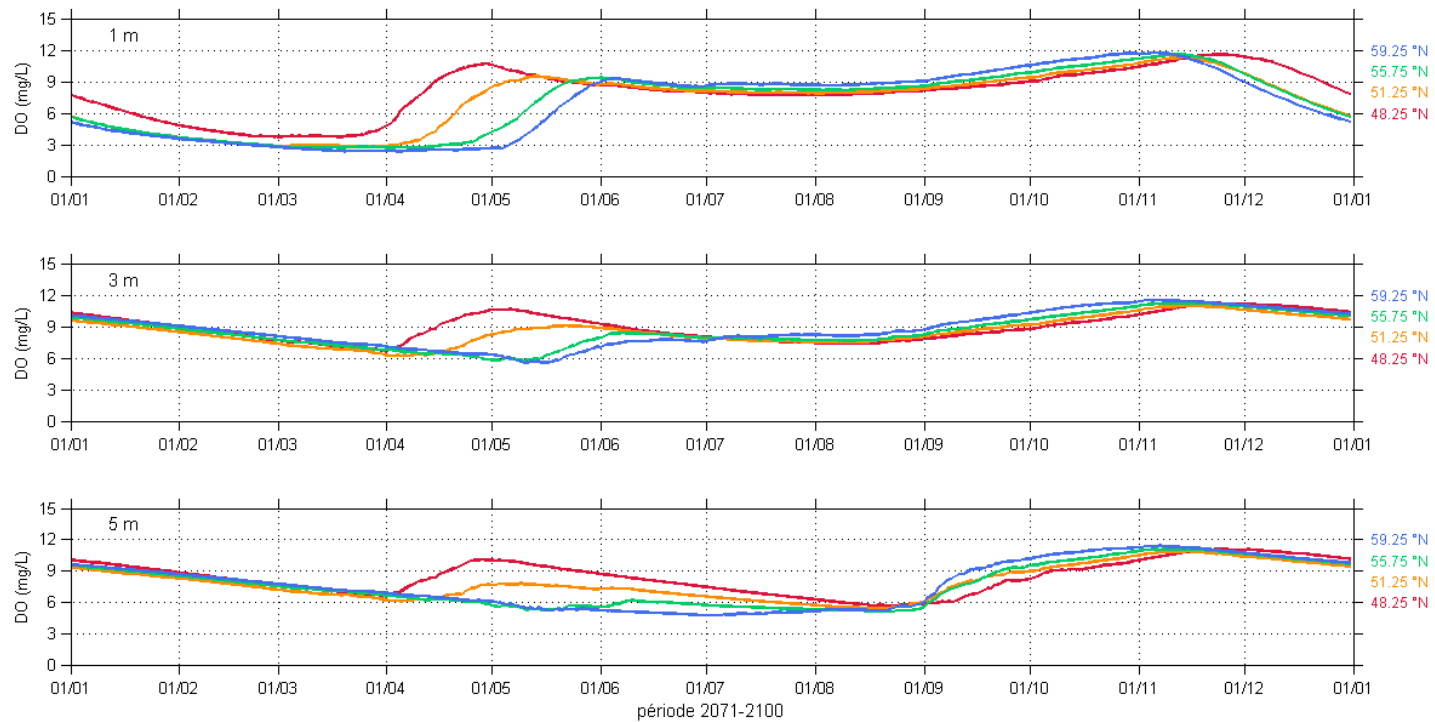


Figure 21. Influence du gradient latitudinal pour le lac Simoncouche pour la période 2070-2100. Les résultats sont présentés pour quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).

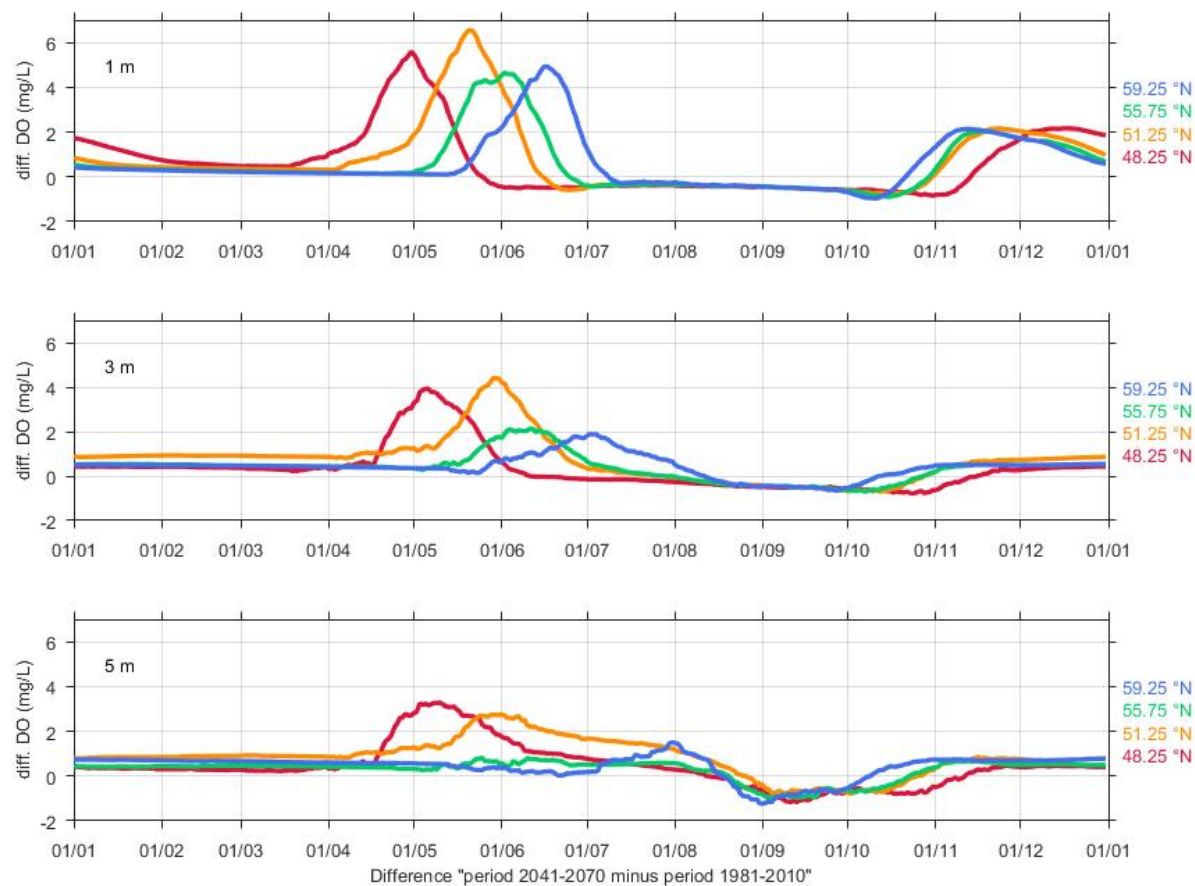


Figure 22. Impacts des changements climatiques sur la distribution de l'oxygène dissous. La figure présente les différences entre 2041-2070 par rapport à la période 1981-2010. Les différences sont présentées à quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).

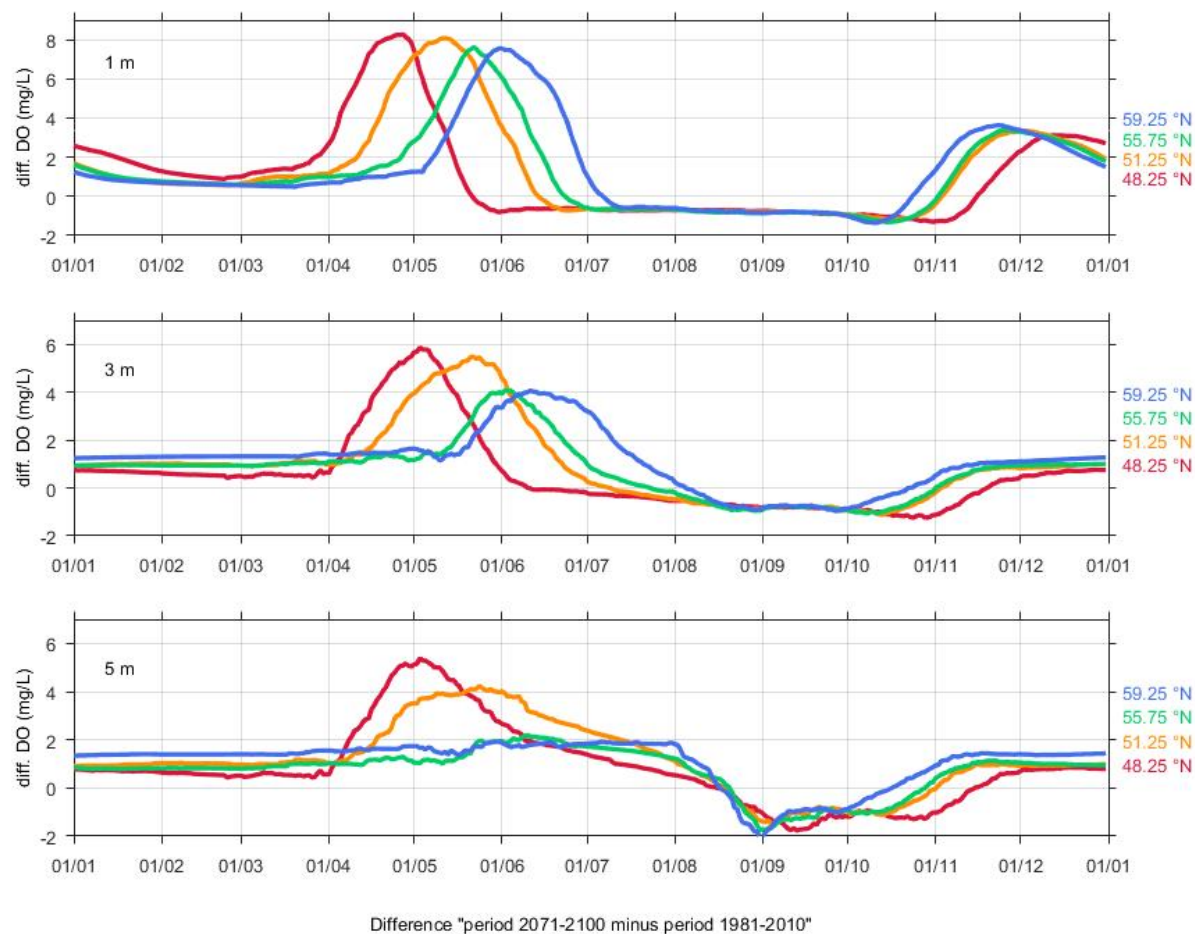


Figure 23. Impacts des changements climatiques sur la distribution de l'oxygène dissous. La figure présente les différences entre 2071-2100 par rapport à la période 1981-2010. Les différences sont présentées à quatre latitudes : 48,25° (rouge), 51,25° (orange), 55,75° (vert) and 59,25° (bleu). Les graduations sur l'axe des x indiquent les mois de l'année (jj/mm).

6. Conclusion et recommandations

Ce rapport résume les travaux réalisés entre novembre 2015 et août 2017. Le projet a débuté le 19 novembre 2015 à raison de 3,5 jours par semaine. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre plus général d'une étude de l'impact des changements climatiques sur les habitats thermiques et oxiques des salmonidés des lacs du Québec, du Nunavik, du Nunavut et du Nunatsiavut. Dans la première partie (Bélanger et al., 2013) nous nous sommes concentrés sur l'adaptation du modèle MyLake aux lacs du Québec et du Nunavik. Nous avons montré que cet outil était l'outil idéal pour l'étude de l'impact des changements climatiques sur les habitats thermiques des salmonidés. Dans une étude récentes (Bélanger et al., 2017b; Annexe V) nous avons aussi démontré que la version modifiée de MyLake, celle de Couture et al. (2015), était aussi l'outil idéal pour l'étude de l'impact des changements climatiques sur les habitats oxiques des salmonidés.

Il ne suffit pas d'avoir un outil de modélisation, il faut aussi développer des outils de gestion des espèces de salmonidés. C'est ce que nous avons tenté d'accomplir dans les trois premières parties de ce rapport. En effet, avec des millions de lacs au Québec (il y en a 633 946 dans les onze zones que nous avons étudiées), il est impossible d'échantillonner chaque lac comme il est aussi impossible de déterminer la bathymétrie exacte de chacun des lacs du Québec. Les profondeurs moyennes dans les banques de données du MFFP et du MDDELCC sont souvent estimées à partir de l'orographie des régions environnantes. Comment ces estimations vont-elles affecter les résultats des simulations? Répondre à cette question était l'objectif du premier rapport (Annexe 1). Ce qui reste à accomplir, c'est une comparaison des impacts futurs pour nos lacs-tests à partir de la bathymétrie estimée. Par la suite, nous avons effectué une classification des lacs des douze zones disponibles (Annexe II) sur un total d'environ une trentaine : il faudrait compléter la classification. L'étape suivante, la cartographie des habitats thermiques (Annexes III et IV), a permis de cerner la variabilité du comportement des lacs non seulement selon un gradient de latitude, mais aussi selon différentes conditions météorologiques associées à l'orographie et aux divers mini-climats locaux qui sont *de facto* intégrées dans les conditions météorologiques locales. Il reste maintenant à produire des simulations à partir des lacs-types de chacune des régions et à générer des cartes des indicateurs pour ces lacs-types. Ce sont ces cartes qui sont l'outil ultime de gestion et qui permettront aux principaux intervenants des communautés Inuits du Nunavik, du Nunavut et du Nunatsiavut, ainsi qu'à ceux de la Direction de l'expertise sur la faune aquatique du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs de gérer efficacement les pêches récréatives et de subsistance des salmonidés dans leurs régions respectives.

Que reste-t-il à accomplir, les étapes décrites plus haut mises-à-part? Il reste à améliorer la modélisation du comportement de l'oxygène dissous. Du point de vue des données, nous avons démontré que le carbone organique dissous joue un rôle primordial dans le contrôle de la respiration biochimique dans la colonne d'eau. Pour compléter l'étude, nous aurons besoin de mesures de carbone organique dissous pour le lac Jacques-Cartier. Pour les futurs lacs d'intérêt, il faudra une bathymétrie adéquate, des mesures de température, d'oxygène dissous et de carbone organique dissous.

Nous recommandons de compléter l'étalonnage du modèle MyLake pour l'oxygène dissous dans nos lacs-tests. En particulier, nous recommandons les actions suivantes.

- Compléter la modélisation des lacs-tests manquants (Jacques-Cartier, Char et Lac-du-camp)
- Effectuer une étude de sensibilité systématique des divers paramètres du modèle
- Améliorer la modélisation des échanges d'oxygène entre l'air et l'eau
- Améliorer la modélisation des échanges d'oxygène entre les sédiments et l'eau
- Développer une méthode pour estimer la réactivité du carbone organique dissous
- Augmenter le nombre de points de notre section nord-sud et la prolonger jusqu'à 75° N
- Obtenir des données pour tester le module diagénétique.
- Obtenir des données pour tester le module PPZD.

Le carbone organique dissous est un des paramètres les plus importants du modèle et il existe peu d'observations fiables. Le COD est sensible à la photodégradation et est une composante très importante du métabolisme des lacs nordiques, spécialement dans le contexte du dégel progressif du pergélisol. Dans le passé, nous avons effectué une régionalisation de la radiation solaire globale (Jeong et al., 2016), dans le cadre du projet qui s'est terminé en 2013, car les données de radiation globale sont peu nombreuses et très dispersées géographiquement, exactement comme celles du COD. Une régionalisation par Krigeage du COD, par exemple, devrait être tentée car la réactivité du COD est probablement corrélée au type de végétation des bassins de drainage, peut-être même au type de sol retrouvé dans les UDH. De Witt et al. (2016) viennent à peine de publier une étude quantifiant l'exportation de COD d'une région riche en tourbières à l'aide d'un modèle de bassin versant. MyLake pourrait donc être couplé au modèle de gestion intégrée par bassin versant du Centre ETE (voir HYDROTEL : <http://www1.ete.inrs.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/accueil.htm>). Cette approche par bassin versant nous permettrait d'estimer les débits entrant et sortant des différents lacs, ainsi que leurs contenus en matériel dissous.

Références

- ACIA (2005), Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge University Press, 1042 p.
- Bélanger, 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.
- Bélanger, 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.
- Bélanger, 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 Parcs, Mars 2016, 40 p.
- Bélanger, 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/>
- Butcher J.B., Nover D., Johnson T.E., Clark C.M. (2015). Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. *Climatic Change* 129: 295-305.
- Caplanne, S. et I. Laurion (2008), Effects of chromophoric dissolved organic matter on epilimnetic stratification in lakes, *Aquat. Sci.*, doi: 10.1007/s00027-007-7006-0.
- 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.
- Christie, C. G. et H. A. Regier (1988), Measurements of optimal habitat and their relationship to yields for four commercial fish species. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45: 301- 314.
- Deb, K., 2000. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2-4), pp. 311-338.
- del Giorgio, P.A. and R.H. Peters, 1994. Patterns in planktonic P:R ratios in lake:

- Influence of lake trophic and dissolved organic carbon. *Limnol. Oceanogr.*, 39, 772-787.
- De Witt, H.A., J.L.J. Ledesma and M.N. Futter, 2016. Aquatic DOC export from subarctic Atlantic blanket bog in Norway is controlled by seasalt deposition, temperature and precipitation. *Biogeochem.*, 127, 305-321.
- Evans, D.O. (2007), Effects of hypoxia on scope-for-activity and power capacity of lake trout (*Salvelinus namaycush*), *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 64, 345-361.
- Fang, X. and H. G. Snodgrass, 1986. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous United States under past and future climate scenarios. *Limnol. Oceanogr.*, 54, 2359-2370.
- Hondzo, M. and H. Stefan, «Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change.,» *Climatic Change*, vol. 24, n° 13, pp. 187-211, 1993.
- 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.*, 1:10.1175/BAMS-D-12-00163.1.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2013. Summary for policymakers. In Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, Bex, V. and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2000. Emission Scenarios, Nakicenovic, N. et R. Swart [eds]. Cambridge University Press, Cambridge, 570 p.
- Jeong, D.I., A. St-Hilaire, Y. Gratton, C. Bélanger and C. Saad, 2016. Simulation and regionalization of daily global solar radiation: a case study in Québec, Canada, 2016. *Atmos.-Ocean*, 54, 117-123. doi.org/10.1080/07055900.2016.1151766.
- Kraemer B.M., Anneville O., Chandra S., Dix M., Kuusisto E., Livingstone D.M., Rimmer A., Schladow S.G., Silow E., Sitoki L.M., Tamatamah R., Vadeboncoeur Y., McIntyre P.B. (2015). Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *Geophys. Res. Lett.* 42: 4981-4988.
- Larsson, S. (2005), Thermal preference of Arctic char, *Salvelinus alpinus*, and brown trout, *Salmo trutta* – implication for their niche segregation, *Env. Biol. Fish.*, 73: 89-96.
- Logan, T., 2016. Fourniture de données – Projet Habitats des salmonidés. Ouranos, 9 pp.

- Mackenzie-Grieve, J.L. et J.R. Post (2006), Thermal habitat use by lake trout in two contrasting Yukon Territory lakes, *T. Am. Fish. Soc.*, 135: 727-738.
- Martynov A, R Laprise, L Sushama, K Winger, L Separovic, B Dugas, 2013. Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Clim Dyn* 41:2973-3005. DOI 10.1007/s00382-013-1778-9.
- 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.
- Mueller, D.R., P. Vaqn Hove, D. Antoniadis, M.O. Jefferies et W.F. Vincent (2009), High Arctic lakes as sentinel ecosystems: cascading regime shifts in climate, ice cover, and mixing, *Limnol. Oceanogr.*, 54, 2371-2395.
- Nelitz, M., C. Alexander, K. Wieckowski et P. Council, 2007. «Helping Pacific salmon survive the impact of climate change on freshwater habitats: Case Studies».
- Paerl, H.W., and J. Huisman, 2008. Blooms like it hot. *Sciences*, 320, 57-58.
- Peeters, F., D. Straile, A. Lorke, and D.M. Livingstone, 2007. Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate. *Global Change Biology*, 13, 1898-1909.
- 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.
- Rimmer A., Schladow S.G., Silow E., Sitoki L.M., Tamatamah R., Vadeboncoeur Y., McIntyre P.B. (2015). Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *Geophys. Res. Lett.* 42: 4981-4988.
- 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.
- Saporta, G., 2011. "Probabilités, analyse des données et statistique, Editions Technip, Paris, 656 p.
- Stern, G.A. and A. Gaden, 2015. From Science to Policy in the Western and Central Canadian Arctic: An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. Synthesis and Recommendations. ArcticNet, Quebec City, 40 pp.

- Thackeray, S.J., I.D. Jones, and S.C. Maberly, 2008. Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. *Journal of Ecology*, 96, 523–535.
- United Nations Environmental Program (UNEP), 2012. Keeping track of our changing environment, 111 p.
- Vincent, W.F., T.V. Callaghan, D. Dahl-Jensen, M. Johansson, K.M. Kovacs, C. Michel, T. Prowse, J.D. Reist, and M. Shar, 2011. Ecological implications of changes in the Arctic cryosphere. *Ambio*, 40: 87-99.
- Ward, J. Jr, «Hierarchical grouping to optimize an objective function.,» *Journal of the American statistical association*, vol. 58, n° 1301, pp. 236--244, 1963.

Annexes

Le lecteur trouvera les annexes à la section E du rapport

Annexe I : Influence de la profondeur et variations latitudinales

Annexe II : Classification des lacs du Québec

Annexe III : Cartographie des habitats thermiques à l'aide des lacs Jacques-Cartier et Stewart

Annexe IV : Cartographie des habitats thermiques à l'aide du lac Simoncouche

Annexe V : Impacts of climate changes on dissolved oxygen concentrations

Annexe VI : Habitats des salmonidés : scénarios climatiques