

**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 présenté au

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

par

Claude Bélanger, Yves Gratton, André St-Hilaire et Isabelle Laurion

INRS-Eau, terre et environnement

15 Mars 2016

Table des matières

Liste des figures	3
1. Introduction.....	5
2. Impact du volume du lac sur la température de l'eau	7
2.1 Comparaison des cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 : passé de référence et latitude HL8..	7
2.2 Comparaison des cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 : variations latitudinales.....	10
2.3 Comparaison des cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 : impact sur le dépassement des seuils de température de 12 °C et 15 °C	11
3. Impact de la profondeur moyenne sur la température de l'eau	12
3.1 Comparaison des cycles annuels des lacs 15m, 30m et 60m : passé 1981-2010 et latitude HL8.....	12
3.2 Comparaison des cycles annuels des lacs 15m, 30m et 60m : variations latitudinales.....	13
3.3 Comparaison des cycles annuels des lacs 15m, 30m et 60m : impact sur le dépassement des seuils de température de 12 °C et 15 °C	13
3.4 Une comparaison des températures simulées via un étalonnage emprunté (lac 15m) et via un étalonnage spécifique (lac Stewart)	14
4. Sur l'influence combinée de la profondeur moyenne et de la latitude	15
5. Impact de la profondeur moyenne et changements climatiques	16
6. Sommaire	17
Références.....	20
Annexe 1.....	36
Annexe 2.....	39
Annexe 3.....	40

Liste des figures

- Figure 1. Position des lacs Stewart (STW), Chibougamau (CHI) et Jacques-Cartier (JAC), et position des lacs hypothétiques aux latitudes HL2, HL5 et HL8. Les lacs hypothétiques sont au centre de régions de 100 km x 100 km. Toutes les données NARR aux points de grille inclus dans chacune de ces régions (points rouges) furent moyennées pour produire les séries météorologiques utilisées pour dériver les températures climatologiques. 21
- Figure 2. Cycle annuel de température (période 1981-2010) pour (a) le lac no 1 et (b) le lac no 2 lorsque placés à la latitude HL8, et (c) différence no 1 – no2. 22
- Figure 3. Cycle annuel de température (période 1981-2010) pour (a) le lac no 1 et (b) le lac no 2 lorsque placés à la latitude HL8, et (c) différence de température en surface. 23
- Figure 4. (a) Cycles annuels de contenu en chaleur (période 1981-2101) pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés à la latitude HL8, (b) différence de contenu en chaleur no 1 – no 2, (c) Cycles annuels de contenu en chaleur volumique (période 1981-2101) pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés à la latitude HL8, et (d) différence de contenu en chaleur volumique no 1 – no 2. 24
- Figure 5. Différence entre les températures des lacs no 1 et no 2 (période 1981-2101) lorsque placés aux latitudes (a) HL2, (b) HL5, et (c) HL8. 25
- Figure 6. Différence entre les contenus en chaleur volumique des lacs no 1 et no 2 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. 26
- Figure 7. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 12$ °C pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070. 27
- Figure 8. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 15$ °C pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070. 28
- Figure 9. (a) Cycles annuels de contenu en chaleur (période 1981-2101) pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés à la latitude HL8, (b) différence de contenu en chaleur 60m – 15m, (c) Cycles annuels de contenu en chaleur volumique (période 1981-2101) pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés à la latitude HL8, et (d) différence de contenu en chaleur volumique 15m – 60m. 29

Figure 10. Profils de température passés (1981-2010, gauche) et futurs (2041-2070, centre), et différences futur-passé (droite) pour sept décades de la mi-mai à la mi-novembre pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés à la latitude HL8.	30
Figure 11. Différence entre les températures des lacs 15m et 30m (période 1981-2101) lorsque placés aux latitudes (a) HL2, (b) HL5, et (c) HL8.	31
Figure 12. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 12$ °C pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070.	32
Figure 13. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 15$ °C pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070.	33
Figure 14. Profils de température passés (1981-2010, gauche) et futurs (2041-2070, centre), et différences futur-passé (droite) pour sept décades de la mi-mai à la mi-novembre pour les lacs Stewart (orange), Chibougamau (vert) et Jacques-Cartier (bleu).	34
Figure 15. Figure 15. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 12$ °C pour les lacs Stewart (orange), Chibougamau (vert) et Jacques-Cartier (bleu). En haut pour la période 1981-2010, et en bas pour la période 2041-2070.	35
Figure 16. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 15$ °C pour les lacs Stewart (orange), Chibougamau (vert) et Jacques-Cartier (bleu). En haut pour la période 1981-2010, et en bas pour la période 2041-2070.	35
Figure 17. Comparaison entre températures observées (noir) et températures simulées (bleu) à cinq profondeurs choisies pour la période du 17 juin au 2 novembre 2010.	38
Figure 18. Aire en fonction de la profondeur pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet), et rayon en fonction de la profondeur supposant un lac circulaire à toutes les profondeurs.	39
Figure 19. Aire en fonction de la profondeur pour le lac Jacques-Cartier (rouge), pour un lac hypothétique de 68 m suivant l'équation 1 (jaune), et pour un lac hypothétique de 60 m dérivé à partir du lac hypothétique de 68 m (bleu). Rayon en fonction de la profondeur.	40

1. Introduction

Le présent rapport est destiné au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) pour qui les habitats thermiques des espèces de salmonidés sont d'un intérêt particulier. Ce rapport constitue le premier livrable requis dans le cadre du contrat de service avec le MFFP :

- 1) Production d'un rapport présentant la validation et la calibration du modèle « Mylake » pour la température de l'eau dans les lacs, comprenant entre autres des analyses de sensibilité avec des variables morphométriques des plans d'eau (ex. superficie, profondeur).

Nous nous concentrerons donc sur l'analyse de sensibilité de l'impact des variables morphologiques. L'étalonnage du lac Jacques-Cartier utilisé dans ce rapport est présenté à l'Annexe 1. Les détails du processus d'étalonnage du Modèle MyLake pour une série de lacs québécois sont décrits dans Bélanger et al. (2013). Le traitement des données météorologiques et la préparation des scénarios climatiques sont aussi décrits dans Bélanger et al. (2013).

Les caractéristiques morphométriques d'un lac donné sont susceptibles d'influencer sa réponse aux changements climatiques. Le sujet est d'intérêt pour mieux comprendre les changements potentiellement néfastes menaçant la qualité de l'eau et les services écosystémiques rendus par les différents lacs et réservoirs. Quelques publications récentes ont considéré l'impact de certaines caractéristiques morphométriques sur les changements à venir quant à la stratification et à la dynamique thermique. Dans un cas, on a utilisé de longues séries de températures observées dans plusieurs lacs (Kraemer et al. 2015), et dans un autre cas on s'est servi de lacs types et d'un modèle unidimensionnel (Butcher et al. 2015).

La profondeur moyenne d'un lac correspond au rapport de son volume sur sa surface. Dans le présent rapport, nous utilisons un modèle unidimensionnel de lac, soit MyLake version 1.2 (Saloranta et Andersen 2007), pour étudier l'impact de la profondeur moyenne sur la température de l'eau et considérer comment les différences induites par une différence de profondeur moyenne devrait 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.

Les cycles annuels passés de température sont dérivés à partir de simulations de 30 ans (1981-2010) forcées par sept séries de données météorologiques journalières obtenues des ré-analyses NARR (*North American Regional Reanalysis* : voir Bélanger et al. 2013). Les cycles annuels futurs de température sont dérivés à partir de simulations de 30 ans (2041-2070) forcées par les mêmes séries modifiées par des valeurs (deltas saisonniers; voir Bélanger et al., 2013) correspondant aux changements prédits par un modèle climatique régional, soit le Canadian Regional Climate Model (CRCM) version 4.3.2, supposant le scénario d'émission de gaz à effet de serre A2. Ce modèle était piloté par le modèle canadien du climat global (CGCM3.1). Autrement dit, un modèle à grande échelle (CGMC 3.1) est utilisé pour forcer un modèle à plus haute résolution (CRCM 4.3.2). Le lecteur trouvera plus de détails dans Bélanger et al. (2013).

2. Impact du volume du lac sur la température de l'eau

Le cycle annuel de température a été dérivé pour deux lacs ayant une même superficie ($10,0 \text{ km}^2$) et une même profondeur maximum (30 m), mais une bathymétrie différente résultant en un volume différent ($0,10 \text{ km}^3$ pour le lac n° 1 et $0,15 \text{ km}^3$ pour le lac n° 2) et une profondeur moyenne différente (10 m pour le lac n° 1 et 15 m pour le lac n° 2). Les caractéristiques morphométriques de ces lacs sont présentées à l'Annexe 2. Les paramètres utilisés pour cette étude de sensibilité sont ceux obtenus de l'étalonnage du lac Jacques-Cartier, un lac ayant une superficie comparable ($12,6 \text{ km}^2$) (voir Annexe 1 et Bélanger et al. 2013). Les lacs hypothétiques ont été placés à trois latitudes le long du méridien 071°O (i.e. $58,20^\circ \text{N}$ pour HL2, $52,35^\circ \text{N}$ pour HL5, et $46,50^\circ \text{N}$ pour HL8; voir Figure 1).

2.1 Comparaison des cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 : passé de référence et latitude HL8

Les cycles annuels de température pour les lacs n° 1 et n° 2 pour la période 1981-2010 à position HL8 sont présentés à la Figure 2, de même que la différence de température entre les deux lacs. Les cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 sont caractérisés par l'évolution saisonnière typique des lacs dimictiques (où les eaux sont mélangées deux fois par an) :

- 1) Réchauffement en surface au printemps et mélange induit par ce réchauffement jusqu'à ce que le profil de température devienne uniforme,
- 2) Continuation du réchauffement dans la couche supérieure et développement d'une thermocline estivale,
- 3) Refroidissement en surface en début d'automne, induisant d'abord un mélange graduel des eaux et des températures plus élevées en profondeur, puis éventuellement un profil de température uniforme,
- 4) Continuation du refroidissement en surface en fin d'automne et en début d'hiver.

On note les différences suivantes entre les cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 :

- 1) En été, les températures du lac n° 1 sont légèrement supérieures.

2) En automne, soit environ à partir du début octobre, les températures du lac n° 1 deviennent légèrement inférieures.

3) L'occurrence du maximum de température en profondeur survient plus tard pour le lac n° 2.

4) Les profils printaniers de température uniformes à 4 °C surviennent simultanément mais le profil automnal uniforme à 4 °C survient plus tard pour le lac n° 2.

Les mêmes cycles annuels de température sont repris à la Figure 3 mais au panneau inférieur les différences de température sur toute la colonne d'eau ont été remplacées par la différence de température en surface. On y observe que la température de surface du lac n° 1 devient légèrement plus élevée tôt en début d'été (soit dans les jours suivant le profil uniforme printanier), demeure plus élevée tout l'été, et finalement devient inférieure en automne. La différence de température de surface en période estivale peut s'expliquer ainsi : la chaleur acquise en surface étant éventuellement distribuée à un plus grand volume pour le lac n° 2 (la décroissance de l'aire des couches de 1 m avec la profondeur étant moins prononcée, particulièrement dans la partie supérieure de la colonne d'eau), il en résulte que l'augmentation de la température en surface et dans la partie supérieure de la colonne d'eau est moins prononcée pour le lac n° 2 que pour le lac n° 1.

Les cycles annuels de contenu en chaleur (relatif à 0 °C) et de contenu en chaleur volumique pour les lacs n° 1 et n° 2 pour la période 1981-2010 à la position HL8 sont présentés à la Figure 4, de même que les différences de contenu en chaleur et de contenu en chaleur volumique. Le contenu en chaleur volumique (par unité de volume) reflète la température moyenne de toute l'eau contenue dans le lac.

On note les différences suivantes entre les cycles annuels de contenu en chaleur des lacs n° 1 et n° 2 :

1) Le lac n° 2 accumule plus chaleur que le lac n° 1 et la différence en contenu de chaleur s'accroît du début de l'été jusqu'au début de l'automne (début octobre environ), c'est-à-dire plus d'un mois passé le maximum de contenu en chaleur.

2) Le contenu en chaleur commence à diminuer plus tôt pour le lac n° 1, et pour quelques semaines il diminue plus rapidement que pour le lac n° 2 (de là la différence de contenu en chaleur continuant à augmenter après que le maximum soit atteint).

3) La perte de chaleur pour le lac n° 2 éventuellement augmente et dépasse la perte de chaleur pour le lac n° 1; la différence de contenu en chaleur à partir de ce point (début octobre environ) commence à décroître.

4) Le contenu en chaleur volumique en été est plus grand pour le lac n° 1 que pour le lac n° 2 et devient plus petit en début d'automne (soit environ à partir du début octobre).

Les différences mentionnées ci-dessus sont explicables par les trois causes suivantes : 1) en période de gain de chaleur, une température de surface plus basse favorise un gain de chaleur plus élevé, 2) en période de perte de chaleur, une température de surface plus élevée favorise une perte de chaleur plus élevée, et 3) l'impact du volume sur la dilution de la chaleur accumulée.

En été, le lac n° 2 a une température de surface légèrement moins élevée (Figure 3c) et il accumule plus de chaleur (Figure 4a). En d'autres mots, par unité de surface le lac avec le plus grand volume est plus performant à absorber l'énergie de l'atmosphère (soit, pour la période du 10 mai au 10 août correspondant approximativement à la période de gain de chaleur, une différence de $+22,5 \text{ W m}^{-2}$, i.e. +27 %).

Le lac n° 1 ayant une température de surface plus élevée en été (Figure 3c), le signe de la différence « atmosphère – surface du lac » change plus tôt (l'atmosphère devient « plus froide » plus tôt) et la perte de chaleur débute également plus tôt. Comme la température de surface du lac n° 1 demeure plus élevée jusqu'à l'automne, la perte de chaleur du lac n° 1 demeure supérieure et la différence de contenu en chaleur entre les deux lacs continue de croître jusqu'à ce que les températures de surface soient identiques. La perte de chaleur débutant plus tôt pour le lac n° 1 et demeurant plus prononcée pendant un certain temps, le mélange automnal survient donc aussi plus tôt, de même que l'exportation de chaleur en profondeur résultant de ce mélange (Figure 2a et 2b). Lorsque le mélange automnal débute, l'eau sous-jacente à l'eau de surface est aussi légèrement plus chaude pour le lac n° 1 parce que la chaleur accumulée y est moins diluée (Figure 2c). Cette eau plus chaude contribue à la nouvelle eau de surface formée par mélange et favorise ainsi le maintien d'une température de surface plus élevée pour le lac n° 1 et un taux de perte de chaleur plus élevé à ce temps de l'année.

Il y a correspondance entre le moment où la perte de chaleur pour le lac n° 2 devient similaire à celle du lac n° 1 (i.e. lorsque la différence de contenu en chaleur atteint un maximum), et le moment où la différence de température de surface est nulle (Figures 4b et 3c). Cette correspondance tend à confirmer l'impact de la température de surface sur les échanges avec l'atmosphère. Passé ce point, la température de surface

devient plus élevée pour le lac n° 2 et la différence de contenu en chaleur diminue. La température de surface plus élevée pour le lac n° 2 à ce temps de l'année résulte des deux facteurs suivants : le lac n° 2 commence à perdre de la chaleur plus tard et à un taux moindre jusqu'à l'égalité des températures de surface, et la chaleur additionnelle accumulée par le lac n° 2 prend nécessairement plus de temps à évacuer.

L'évolution du contenu en chaleur volumique (Figures 4c et 4d) reflète l'évolution de la différence de température entre les deux lacs (Figure 2c) : le lac n° 1 est plus chaud en été et devient plus froid en automne. Comme le lac n° 1 est plus chaud en été malgré une quantité de chaleur absorbée moindre, on peut donc en conclure que la différence de dilution de chaleur associée à la différence de volume a un impact sur les températures estivales nettement plus important que le surplus de chaleur accumulée dans un lac plus volumineux. Autrement dit, bien que la quantité de chaleur accumulée dans le lac n° 1 soit légèrement plus petite, il en résulte quand même des températures plus élevées parce que cette chaleur y est distribuée sur un plus petit volume. À la fin de l'été, lorsque le lac n° 1 commence à perdre de la chaleur, il en perd davantage que le lac n° 2 et la différence en chaleur volumique décroît et devient éventuellement nulle (Figure 4d). Plus tard à l'automne, la température de surface du lac n° 1 devient inférieure à celle du lac n° 2 et il perd sa chaleur moins rapidement. Malgré cette perte de chaleur moins prononcée, le lac n° 1 devient alors plus froid (Figure 2c) et son contenu en chaleur volumique devient inférieur à celui de lac n° 2 (Figures 4c et 4d) en raison de son plus petit volume et de la plus grande quantité de chaleur restant dans le lac n° 2. Étant donné que la quantité de chaleur préalablement accumulée dans le lac n° 2 est plus grande et que la perte de chaleur y était moins prononcée au début de la période de refroidissement, les températures plus élevées dans le lac n° 2 peuvent s'accroître et subsister quelques semaines.

2.2 Comparaison des cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 : variations latitudinales

Les différences de température entre les lacs n° 1 et n° 2 pour la période 1981-2010 aux positions HL2, HL5 et HL8 sont présentées à la Figure 5. La durée de la période estivale avec des températures plus élevées pour le lac n° 1 diminue du sud au nord, de même que la durée de la période automnale avec des températures plus élevées pour le lac n° 2 (période avec différences ≤ -1 °C). Le maximum de différence estival tend aussi à diminuer du sud au nord : 3,80 °C à HL8, 3,66 °C à HL5, et 2,59 °C à HL2.

Les différences de contenu en chaleur volumétrique entre les lacs n° 1 et n° 2 aux positions HL2, HL5 et HL8 sont présentées à la Figure 6a. (La différence en chaleur

volumétrique reflète la différence en température moyenne.) L'impact du volume sur le contenu en chaleur volumique diminue du sud au nord. On note cependant que la diminution de l'impact du volume est plus prononcée entre les latitudes HL8 et HL5 qu'entre les latitudes HL5 et HL2. Ceci pourrait s'expliquer par les différences d'altitude à ces trois positions : 259 m à HL2, 821 m à HL5, et 211 m à HL8. Les conditions météorologiques sont très probablement plus contrastées entre HL8 et HL5 qu'entre HL5 et HL2. La différence estivale de contenu en chaleur volumétrique commence à se manifester beaucoup plus tôt au sud (dû à l'arrivée plus hâtive des conditions estivales). La différence automnale de contenu en chaleur volumétrique débute plus tard au sud, mais l'écart est moins prononcé qu'au printemps. Le maximum de différence automnale survient nettement plus tard à la latitude HL8, ceci étant vraisemblablement lié à la plus grande différence de chaleur accumulée entre les deux lacs à cette latitude.

2.3 Comparaison des cycles annuels des lacs n° 1 et n° 2 : impact sur le dépassement des seuils de température de 12 °C et 15 °C

Plumb et Blanchfield (2009) présentent une étude sur l'habitat du touladi basée sur le suivi de poissons munis d'un émetteur acoustique dans un petit lac (0,27 km³) du nord-ouest de l'Ontario. Cette étude identifie deux seuils de température pour l'habitat thermique du touladi, soient 12 °C et 15 °C. Le seuil de 12 °C peut être considéré comme la limite supérieure de la zone de confort, et le seuil de 15 °C comme la température la plus élevée pouvant être tolérée pour une occupation prolongée.

Les cycles annuels de volume d'eau avec température dépassant le seuil de 12 °C pour les lacs n° 1 et n° 2 pour la période 1981-2010 aux positions HL2, HL5 et HL8 sont présentés à la Figure 7 (colonne de gauche). Les mêmes cycles pour le seuil de 15 °C sont présentés à la Figure 8.

La fraction du volume du lac avec $T \geq 12$ °C est généralement plus grande pour le lac n° 1 que pour le lac n° 2 (Figure 7). La seule exception est en automne à la latitude HL8. Le nombre de jours lorsque tout le volume du lac dépasse le seuil de 12 °C est aussi plus grand pour le lac n° 1 que pour le lac n° 2 : 5 jours vs 0 jour à HL2, 20 jours vs 3 jours à HL5, et 46 jours vs 30 jours à HL8.

Les résultats pour le seuil de 15 °C sont à l'avenant (Figure 8), sauf à la latitude HL2 où cette température n'est jamais atteinte. Le pourcentage de 100 % n'est atteint que pour le lac n° 1 à la latitude HL8. Dans ce cas, la durée de la période avec tout le volume du lac dépassant le seuil de 15 °C est de 13 jours.

3. Impact de la profondeur moyenne sur la température de l'eau

Le cycle annuel de température a été dérivé pour trois lacs ayant une même superficie ($10,0 \text{ km}^2$) et des profondeurs maximums de 15 m, 30 m et 60 m. Les caractéristiques morphométriques de ces lacs sont présentées à l'Annexe 3. Ces trois lacs ont des volumes de $0,05 \text{ km}^3$, $0,10 \text{ km}^3$ et $0,20 \text{ km}^3$, correspondant à des profondeurs moyennes de 5 m, 10 m et 20 m. Ces lacs sont simplement nommés lac 15m, lac 30m et lac 60m. Les paramètres utilisés pour cette étude de sensibilité sont ceux obtenus de l'étalonnage du lac Jacques-Cartier, un lac ayant une superficie comparable ($12,6 \text{ km}^2$). Les lacs hypothétiques ont été placés à trois latitudes le long du méridien 071°O (i.e. $58,20^\circ \text{N}$ pour HL2, $52,35^\circ \text{N}$ pour HL5, et $46,50^\circ \text{N}$ pour HL8; voir Figure 1).

3.1 Comparaison des cycles annuels des lacs 15m, 30m et 60m : passé 1981-2010 et latitude HL8

Pour une surface de lac donnée, une plus grande profondeur maximum entraîne généralement un plus grand volume. C'est le cas pour les trois lacs ici considérés. Par conséquent, les résultats de l'étude de sensibilité à la profondeur maximum sont beaucoup similaires à ceux présentés pour l'étude de sensibilité au volume du lac. Ceci s'exprime notamment par la similitude des évolutions de contenu en chaleur et de contenu en chaleur volumique (Figure 4 pour l'impact du volume, Figure 9 pour l'impact de la profondeur maximum). En été, un lac peu profond est plus chaud qu'un lac profond, et à l'automne il devient plus froid (Figure 9c et Figure 10, colonne de gauche pour le passé 1981-2010). Une plus grande profondeur maximum entraîne également une occurrence plus tardive du profil automnal uniforme à 4°C (à HL8, délai de 11 jours entre les lacs 15m et 30m, et de 13 jours entre les lacs 30m et 60m).

Les raisons avancées à la section précédente pour expliquer les différences entre les lacs n°1 et n°2 s'appliquent pour expliquer les différences entre les lacs 15m, 30m et 60m.

3.2 Comparaison des cycles annuels des lacs 15m, 30m et 60m : variations latitudinales

Comme pour l'impact du volume, l'impact de la profondeur maximum tend à diminuer du sud au nord. Par exemple, le maximum de différence estival entre les lacs 15m et 30m est 7,53 °C à HL8, 5,73 °C à HL5, et 4,33 °C à HL2 (Figure 11). Les résultats pour les lacs 30m et 60m montrent une variation latitudinale similaire : 8,84 °C à HL8, 6,63 °C à HL5, et 4,45 °C à HL2. On remarque que les différences de températures les plus grandes sont en profondeur. En surface, les différences sont légèrement plus prononcées en début d'été. Cette période de différences légèrement plus prononcées tend donc à survenir de plus en plus tard du sud au nord. En ce qui a trait à la période automnale pendant laquelle la température du lac 15m est légèrement plus basse, sa durée diminue du sud au nord alors qu'elle survient de plus en plus tôt.

La latitude n'aurait pratiquement pas d'effet sur le délai entre l'occurrence du profil automnal uniforme à 4 °C. Entre les lacs 15m et 30m, ce délai est de 11 jours aux trois latitudes considérées. Entre les lacs 30m et 60m, ce délai est de 12 jours aux latitudes HL2 et HL5, et de 13 jours à HL8.

3.3 Comparaison des cycles annuels des lacs 15m, 30m et 60m : impact sur le dépassement des seuils de température de 12 °C et 15 °C

Les cycles annuels de volume d'eau avec température dépassant le seuil de 12 °C pour les lacs 15m, 30m et 60m pour la période 1981-2010 aux positions HL2, HL5 et HL8 sont présentés à la Figure 12 (colonne de gauche). Les mêmes cycles pour le seuil de 15 °C sont présentés à la Figure 13.

Les résultats sont similaires à ceux présentés pour l'impact du volume. En particulier, le nombre de jours où tout le volume du lac excède le seuil de 12 °C diminue significativement avec un accroissement de la profondeur maximum : pour le lac 15m, la période avec 100 % de dépassement varie du sud au nord de 125 à 45 jours, alors qu'un dépassement pour 100 % du volume ne survient jamais pour le lac 60m. Les résultats pour le seuil de 15 °C sont à l'avenant avec des volumes plus petits et, pour les lacs 15m et 30m, des périodes avec 100 % de dépassement du seuil plus courtes.

3.4 Une comparaison des températures simulées via un étalonnage emprunté (lac 15m) et via un étalonnage spécifique (lac Stewart)

Les résultats pour le lac 15m placé à la latitude HL2 peuvent être comparés à ceux du lac Stewart (Figure 1), un lac situé pratiquement à la même latitude (58,185 °N vs 58,200 °N) et ayant une superficie comparable (8,5 km² vs 10,0 km²), la même profondeur maximum (15 m) et pratiquement la même profondeur moyenne (4,99 m).

Pour le lac 15m placé à la latitude HL2, le nombre de jours avec 100 % du volume avec $T \geq 12$ °C est estimé à 47 jours (Figure 12), soit beaucoup plus que pour le lac 30 m (5 jours). Pour le lac Stewart, le volume avec $T \geq 12$ °C s'approche très près de 100 % pendant une dizaine de jours seulement (Figure 15).

Bien que les conditions météorologiques puissent être légèrement différentes à ces deux lacs, on peut penser que la différence de résultats est surtout due aux étalonnages utilisés. Le modèle du lac 15m utilise l'étalonnage du lac Jacques-Cartier alors que le modèle du lac Stewart utilise son propre étalonnage. Une des différences ayant pu jouer un rôle est que le coefficient « d'exposition au vent » est calculé automatiquement à partir de la superficie pour le lac 15m et expressément spécifié pour le lac Stewart. Il résulte de ces différences d'étalonnage que la température de surface du lac 15m est plus basse que celle du lac Stewart pendant environ deux mois et que la quantité de chaleur absorbée est plus grande pour le lac 15m que pour le lac Stewart.

On conclut de ceci qu'utiliser un étalonnage donné pour divers lacs ayant des caractéristiques morphologiques différentes de celles du lac étalonné (à savoir en premier lieu la profondeur maximum) peut réduire la fiabilité des résultats. Un étalonnage approprié devrait donc être utilisé pour chaque type de lac. Il faut donc faire attention dans l'interprétation et l'utilisation des résultats présentés précédemment. Malgré cela, nous croyons que les explications avancées pour expliquer les différences entre les évolutions simulées pour des lacs de profondeurs moyennes différentes restent valables, seule la magnitude des différences pouvant être affectées.

Ces différences d'étalonnage pour deux lacs quasi similaires ont involontairement illustré l'impact du mélange induit par le vent sur la température de surface, la quantité de chaleur absorbée, et les températures atteintes en profondeur lors du mélange automnal.

4. Sur l'influence combinée de la profondeur moyenne et de la latitude

Les résultats présentés précédemment ont montré que les températures estivales sont plus élevées pour un lac avec une profondeur moyenne relativement petite, et augmentent du nord au sud en raison du gradient des conditions météorologiques. Nous utilisons ici trois lacs réels afin d'illustrer que les températures pour un lac donné résultent de cette double influence.

Les lacs considérés sont les lacs Stewart, Chibougamau et Jacques-Cartier, respectivement situés aux latitudes 58,19 °N, 49,83 °N et 47,58 °N (Figure 1). Ces lacs ont des profondeurs moyennes de 4,99 m, 8,93 m et 22,34 m (c'est-à-dire proches des profondeurs moyennes des lacs hypothétiques utilisés pour l'étude de sensibilité à la profondeur maximum, soient 5 m, 10 m et 20 m). Le modèle MyLake a été spécifiquement étalonné pour chacun de ces lacs (voir Bélanger et al. 2013).

L'évolution des profils de température pour ces trois lacs pour le passé 1981-2010 est présentée à la Figure 14 (colonne de gauche). Le lac Stewart est à environ 930 km au nord du lac Chibougamau. Bien qu'ayant une petite profondeur moyenne, la température du lac Stewart est toujours inférieure à celle du lac Chibougamau. Dans ce cas-ci, la différence de conditions météorologiques domine sur l'impact de la profondeur moyenne.

Le lac Chibougamau est à environ 250 km au nord du lac Jacques-Cartier. Bien que le lac Chibougamau soit un grand lac dont la superficie fait 17 fois celle du lac Jacques-Cartier, sa profondeur moyenne n'est que 40 % de celle du lac Jacques-Cartier (8,93 m vs 22,34 m). En été la température du lac Chibougamau est toujours supérieure à celle du lac Jacques-Cartier. Dans ce cas-ci, l'impact de la profondeur moyenne semble donc dominer sur la différence de conditions météorologiques. (Notons cependant que les conditions météorologiques à ces lacs sont peut-être moins différentes que ce que la différence de latitude peut suggérer. Le lac Jacques-Cartier est situé à une altitude de 784 m alors que le lac Chibougamau est plus bas à 379 m.)

5. Impact de la profondeur moyenne et changements climatiques

Les résultats montrent qu'à une latitude donnée les différences de contenu en chaleur volumique (de température moyenne) entre des lacs de petite et grande profondeurs moyennes devraient augmenter dans le futur (Figure 6). Les augmentations de différences 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 (Figures 5 et 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.

6. Sommaire

Nous avons présenté 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 cycles annuels de température sont dérivés à l'aide du modèle unidimensionnel MyLake v.1.2 forcé par de longues séries (30 ans) de données météorologiques journalières obtenues des ré-analyses NARR. 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.

Les résultats des deux études de sensibilité sont pratiquement similaires. Cette similitude est particulièrement évidente lorsqu'on compare les évolutions de contenu en chaleur et de contenu en chaleur volumique des Figures 4 et 9. Selon ces résultats, 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 grande profondeur moyenne accumule plus de chaleur par unité de surface. Nous avons expliqué ce résultat par une température de surface moins élevée favorisant un plus grand transfert de chaleur depuis l'atmosphère en période de gain de chaleur. La température de surface moins élevée résulterait du fait que la chaleur contenue dans la couche de surface est davantage diluée lorsque mélangée avec une couche sous-jacente plus volumineuse. On peut imaginer que deux lacs puissent avoir des profondeurs moyennes différentes tout en ayant des variations de l'aire avec la profondeur similaires dans les premiers mètres sous la surface. Dans un tel cas, on peut supposer que l'impact de la profondeur moyenne sur la quantité de chaleur

accumulée ne soit pas aussi marquée que ce qui a été estimé pour les lacs hypothétiques considérés.

Les températures estivales plus élevées dans un lac avec une petite profondeur moyenne résultent évidemment 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 grande profondeur moyenne.

Les différences de températures de surface peuvent aussi expliquer certaines différences de timing plus tard en fin d'été et à l'automne. La température de surface plus élevée pour le 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 le 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 davantage). À ce point la différence en contenu en chaleur arrête 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 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.

Les résultats montrent que l'impact de la profondeur moyenne sur la température décroît du sud au nord (Figures 5, 6 et 11). 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 entre les cycles annuels de température des lacs de petite et grande profondeurs moyennes sont davantage marquées diminue aussi du sud au nord. Aussi, la période automnale durant laquelle un lac avec une grande profondeur moyenne est légèrement plus chaud qu'un lac avec une petite profondeur moyenne diminue du sud au nord. Ceci semble lié à la

diminution du sud au nord de la quantité de chaleur additionnelle accumulée dans un lac avec une grande profondeur moyenne, la période de gain de chaleur (avec des températures de surface différentes) diminuant du sud au nord.

Nous avons utilisé trois lacs réels avec des latitudes et des profondeurs moyennes différentes afin d'illustrer que pour un lac donné les températures estivales dépendent à la fois de la profondeur moyenne et des conditions météorologiques (latitude). Dans un premier cas, le lac le plus au nord est quand même plus froid malgré sa plus petite profondeur moyenne (la différence de conditions météorologiques l'emporte sur la différence de profondeur moyenne). Dans un second cas, le lac le plus au nord est plus chaud à cause de sa plus petite profondeur moyenne (la différence de profondeur moyenne l'emporte sur la différence de conditions météorologiques).

Références

- Bélangier C., Huard D., Gratton Y., Jeong D.I., St-Hilaire A., Auclair J.-C., Laurion I. (2013). Impact des changements climatiques sur l'habitat des salmonidés dans les lacs nordiques du Québec. Rapport INRS-ETE, Québec, 167 pp. Disponible sur http://www.ouranos.ca/media/publication/206_RapportBelangeretal2013.pdf
- 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.
- 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.
- 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.
- Saloranta T.M. and T. Andersen (2004). MyLake (v.1.1): Technical model documentation and user's guide for version 1.1. NIVA, report SNO 4838.
- Saloranta, T.M. and T. Andersen (2005). MyLake (v.1.2): Technical model documentation and user's guide for version 1.2. NIVA, unpublished report.
- 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.

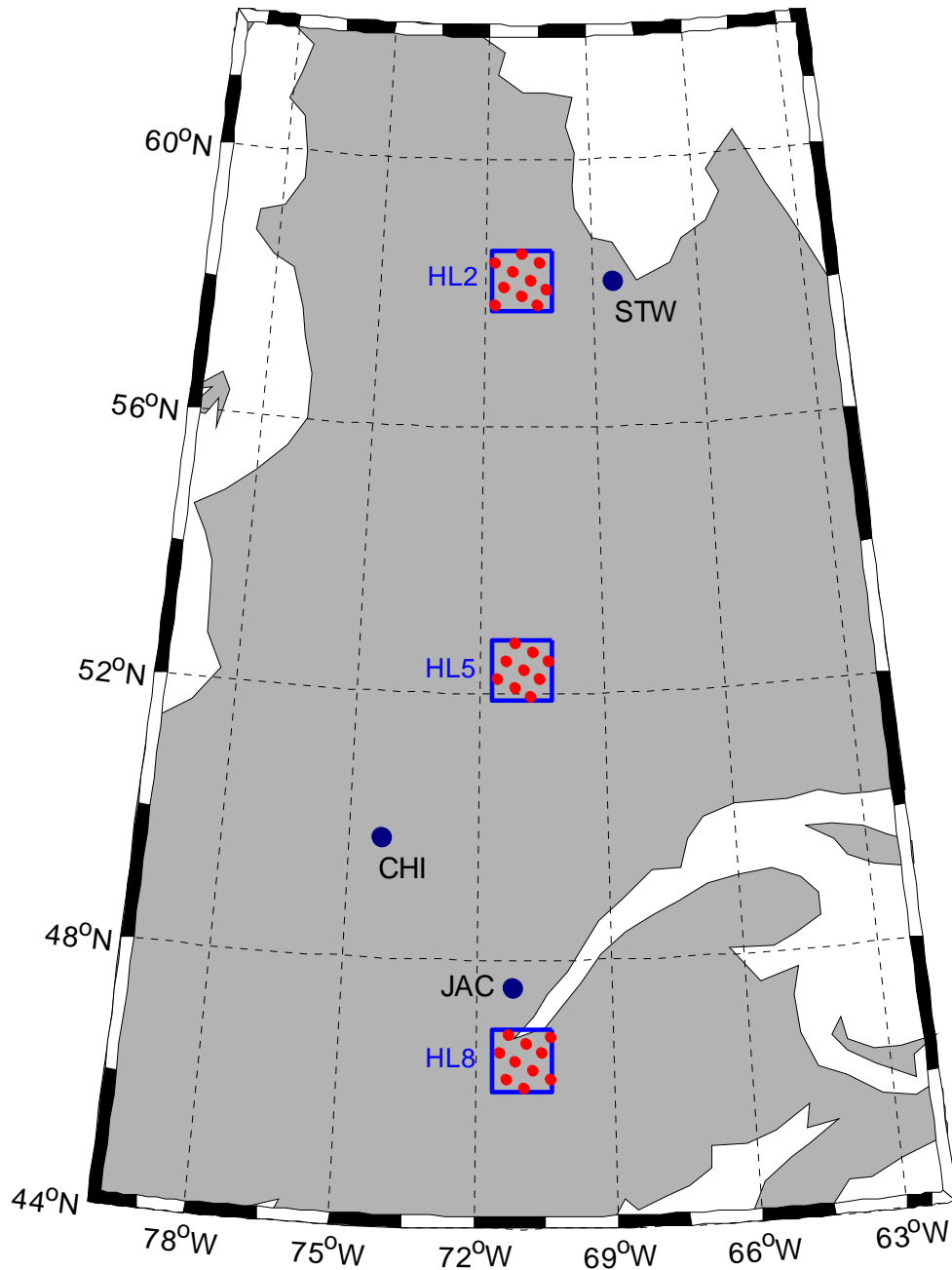


Figure 1. Position des lacs Stewart (STW), Chibougamau (CHI) et Jacques-Cartier (JAC), et position des lacs hypothétiques aux latitudes HL2, HL5 et HL8. Les lacs hypothétiques sont au centre de régions de 100 km x 100 km. Toutes les données NARR aux points de grille inclus dans chacune de ces régions (points rouges) furent moyennées pour produire les séries météorologiques utilisées pour dériver les températures climatologiques. 21

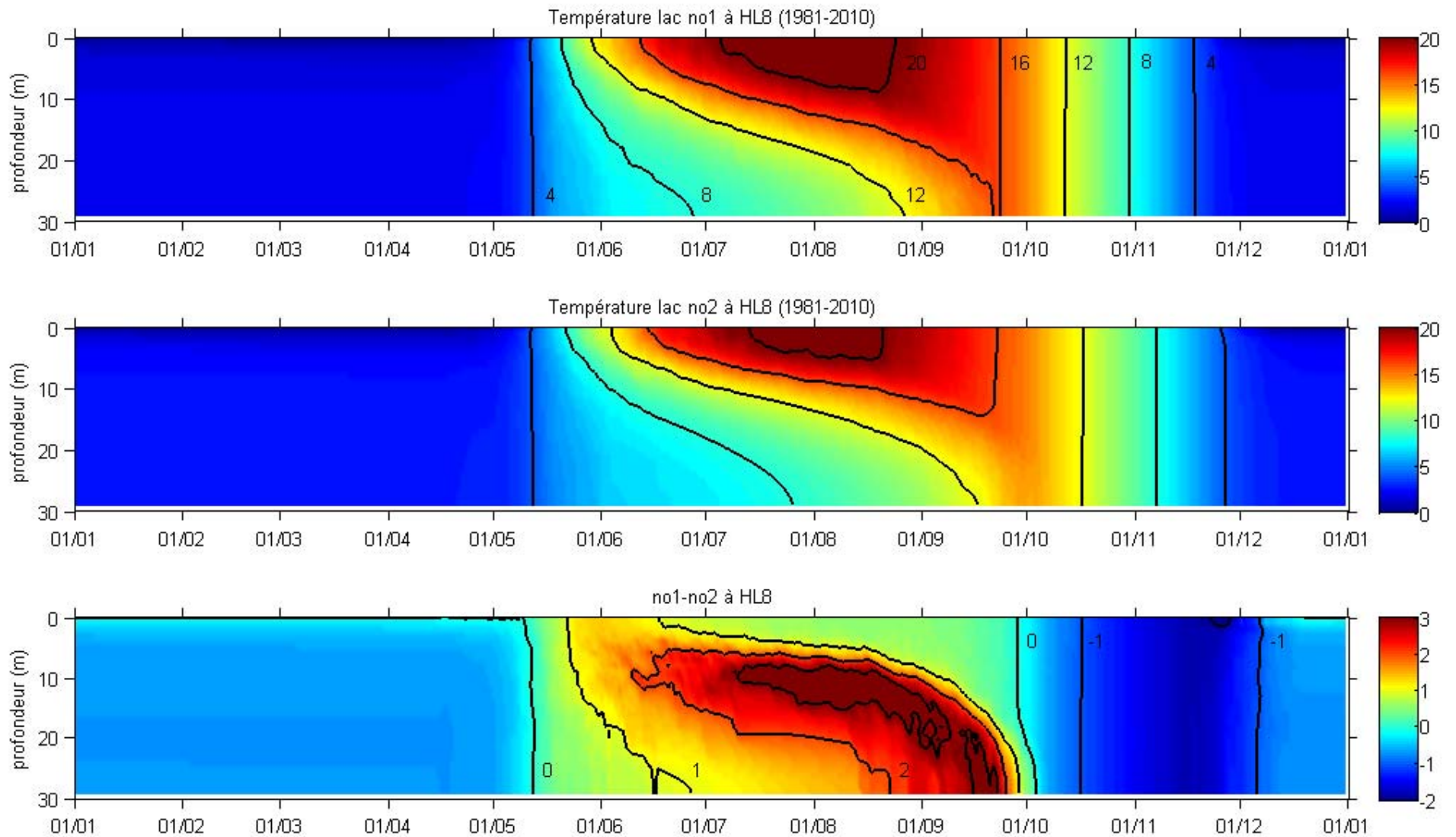


Figure 2. Cycle annuel de température (période 1981-2010) pour (a) le lac no 1 et (b) le lac no 2 lorsque placés à la latitude HL8, et (c) différence no 1 – no2.

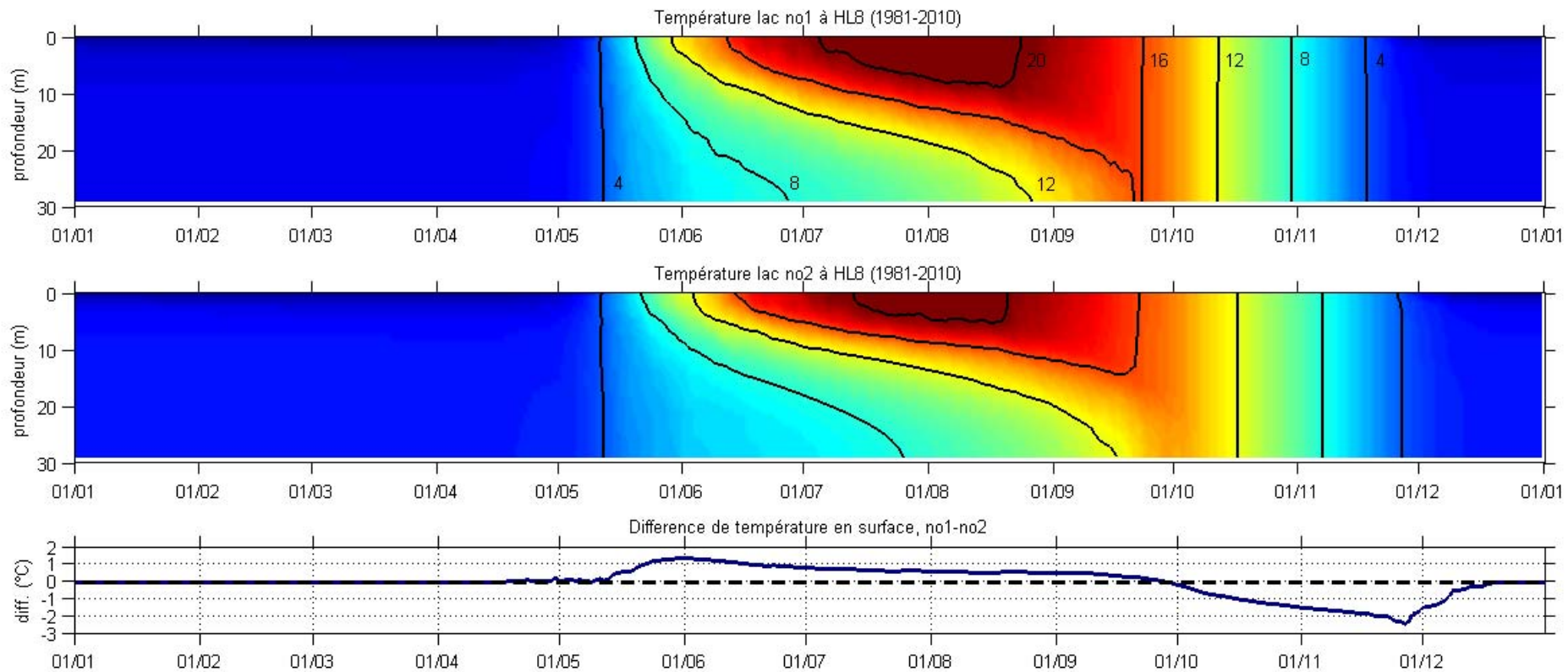


Figure 3. Cycle annuel de température (période 1981-2010) pour (a) le lac no 1 et (b) le lac no 2 lorsque placés à la latitude HLB, et (c) différence de température en surface.

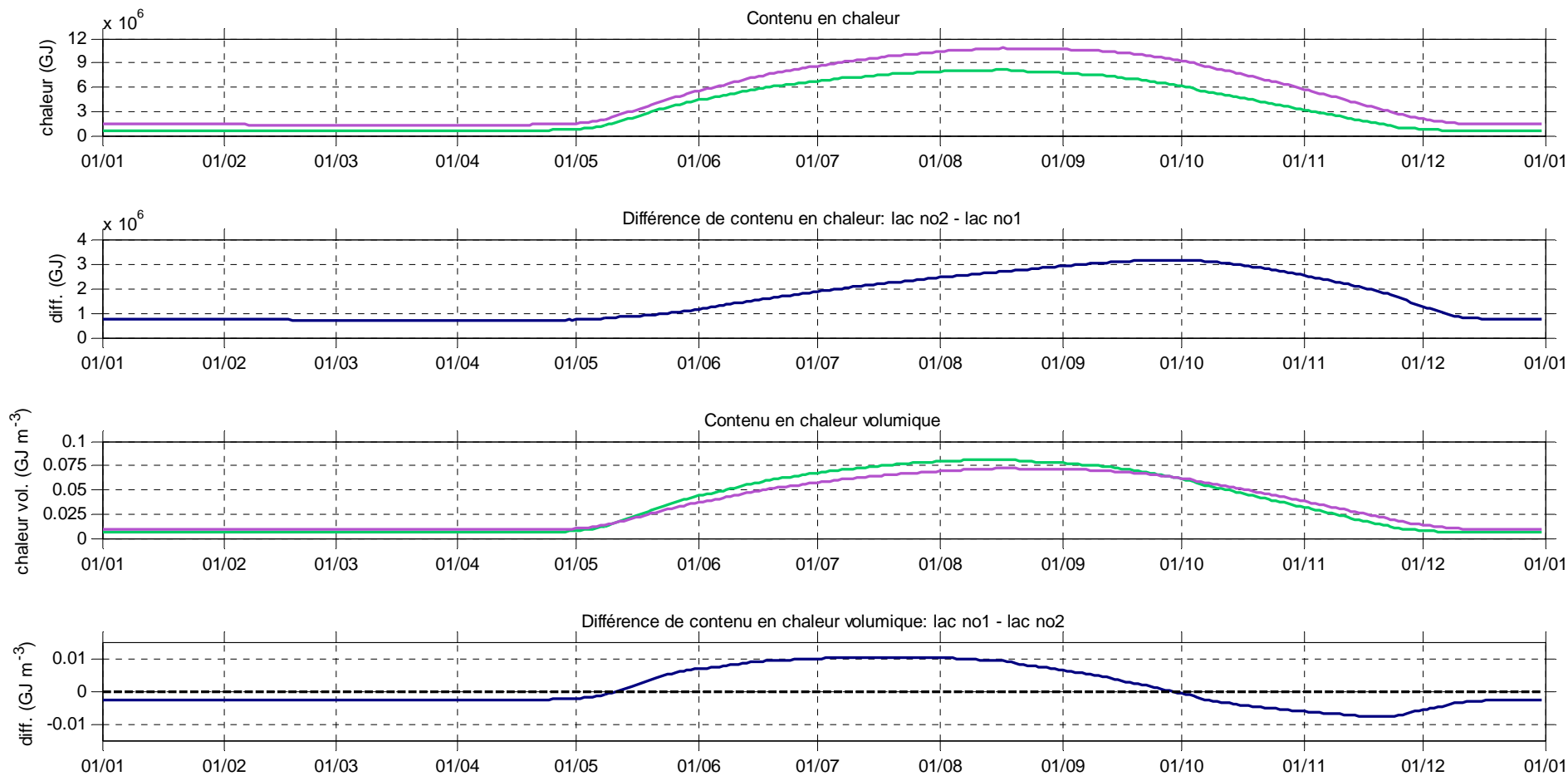


Figure 4. (a) Cycles annuels de contenu en chaleur (période 1981-2101) pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés à la latitude HL8, (b) différence de contenu en chaleur no 1 – no 2, (c) Cycles annuels de contenu en chaleur volumique (période 1981-2101) pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés à la latitude HL8, et (d) différence de contenu en chaleur volumique no 1 – no 2.

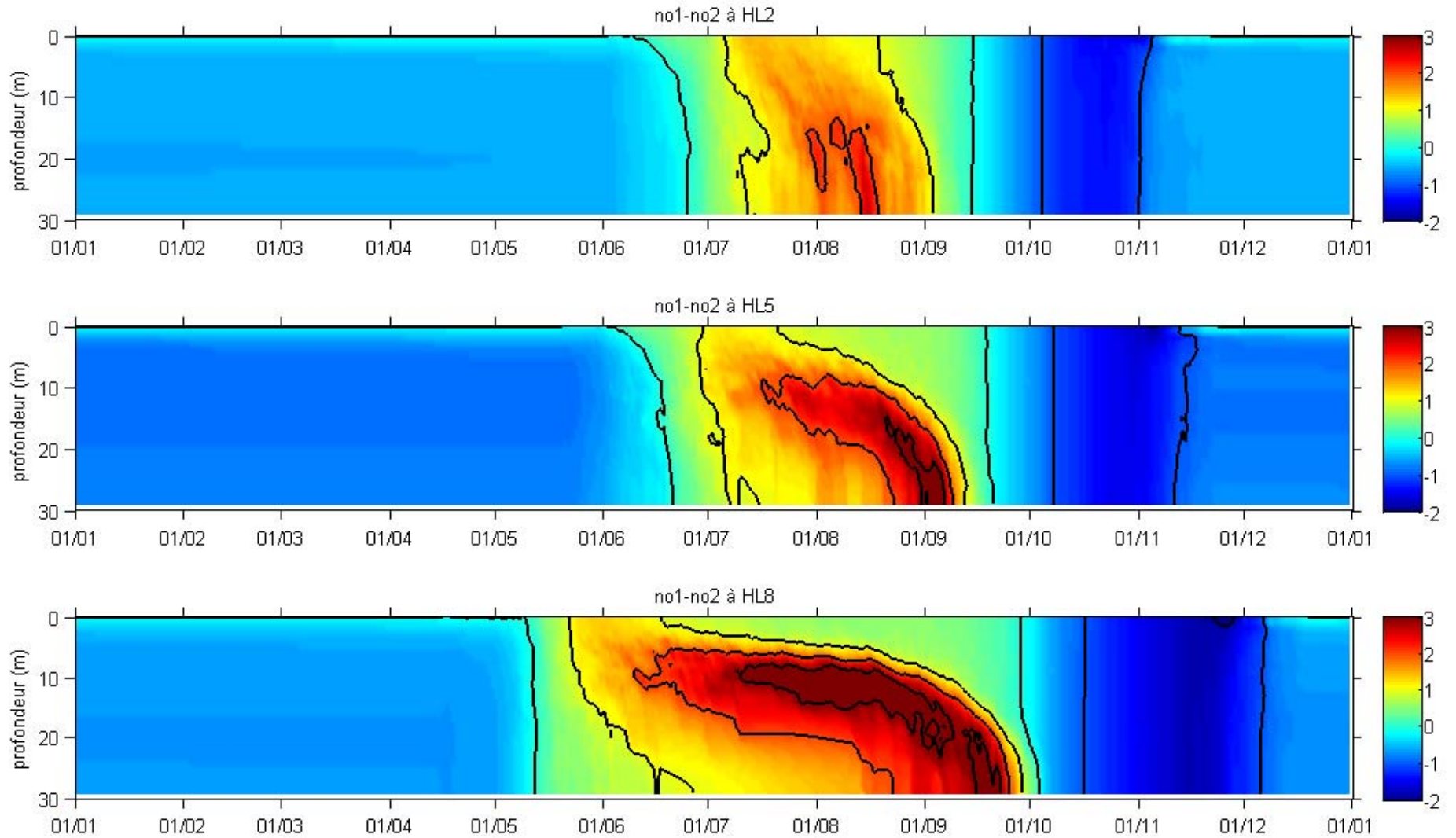


Figure 5. Différence entre les températures des lacs no 1 et no 2 (période 1981-2101) lorsque placés aux latitudes (a) HL2, (b) HL5, et (c) HL8.

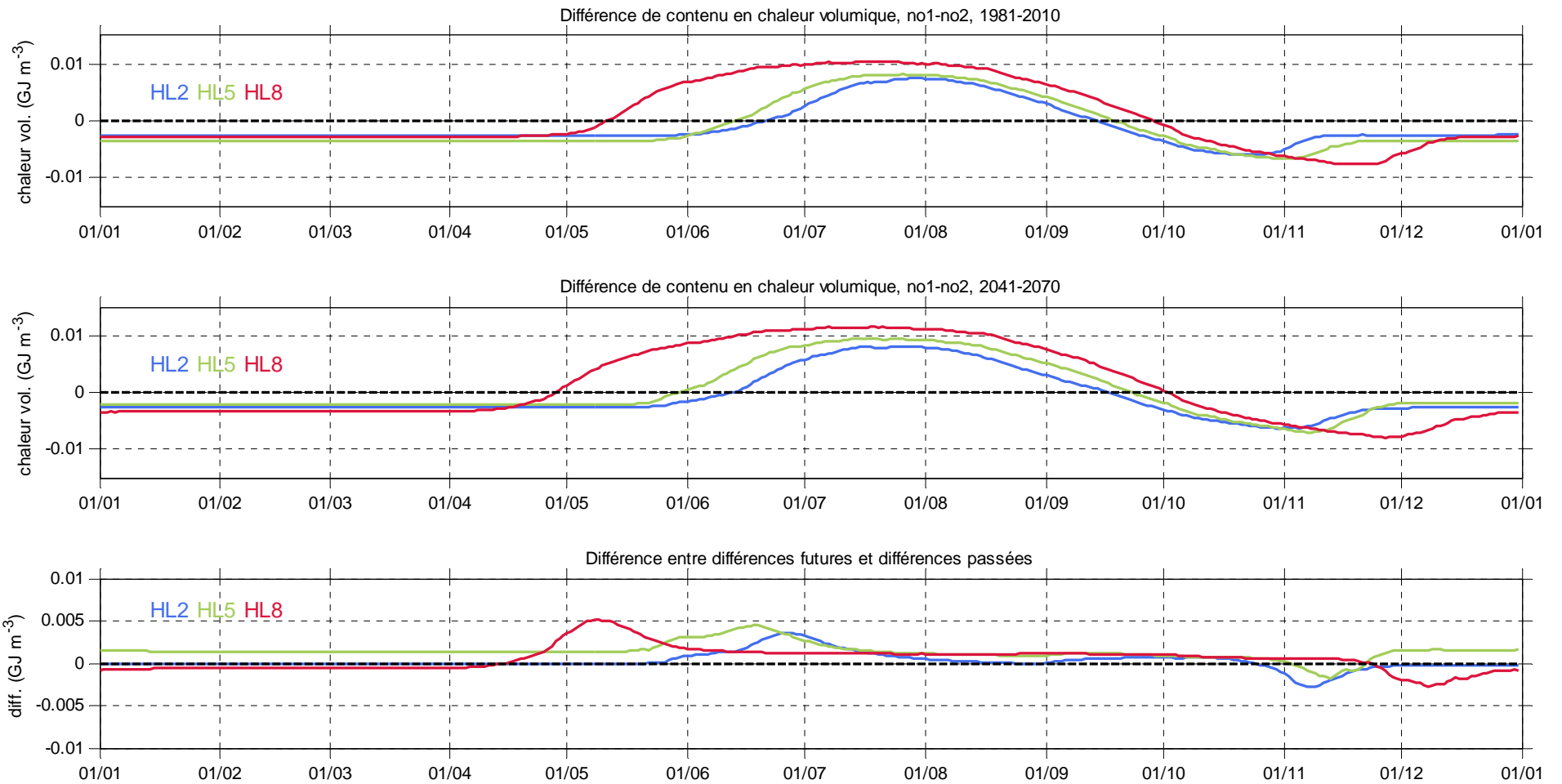


Figure 6. Différence entre les contenus en chaleur volumique des lacs no 1 et no 2 lorsque placés aux latitudes HL2 (bleu), HL5 (vert), et HL8 (rouge), (a) pour la période 1981-2010, (b) pour la période 2041-2070, et (c) différence entre les périodes future et passée.

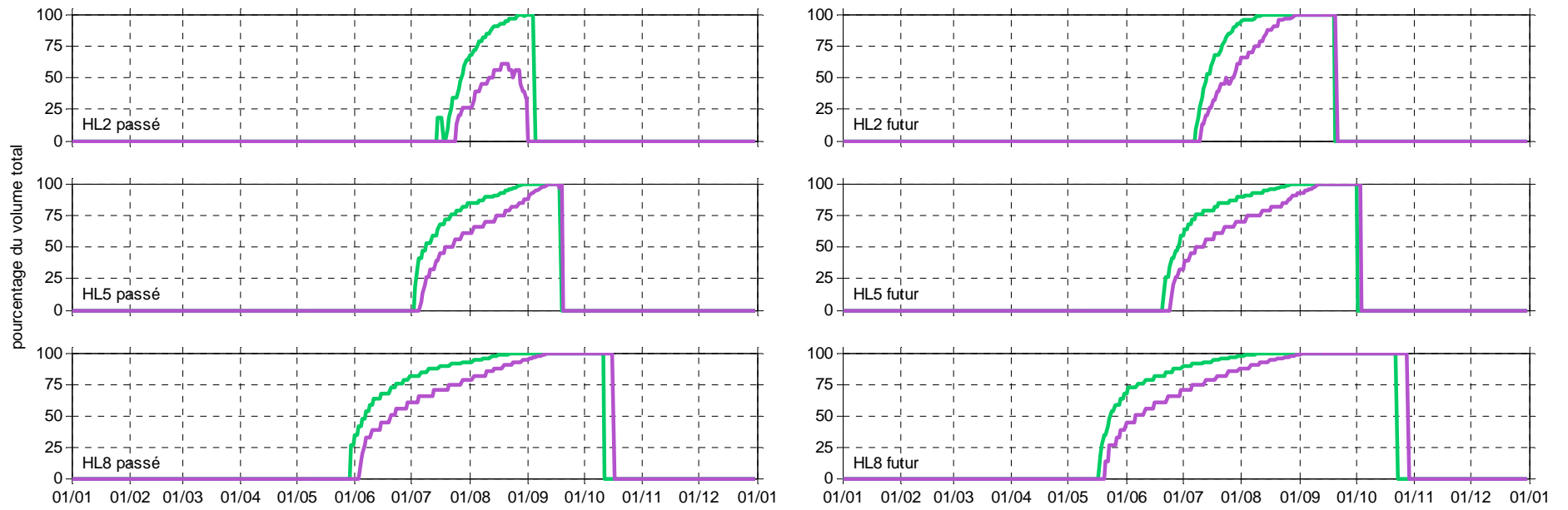


Figure 7. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsqu'ils sont placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070.

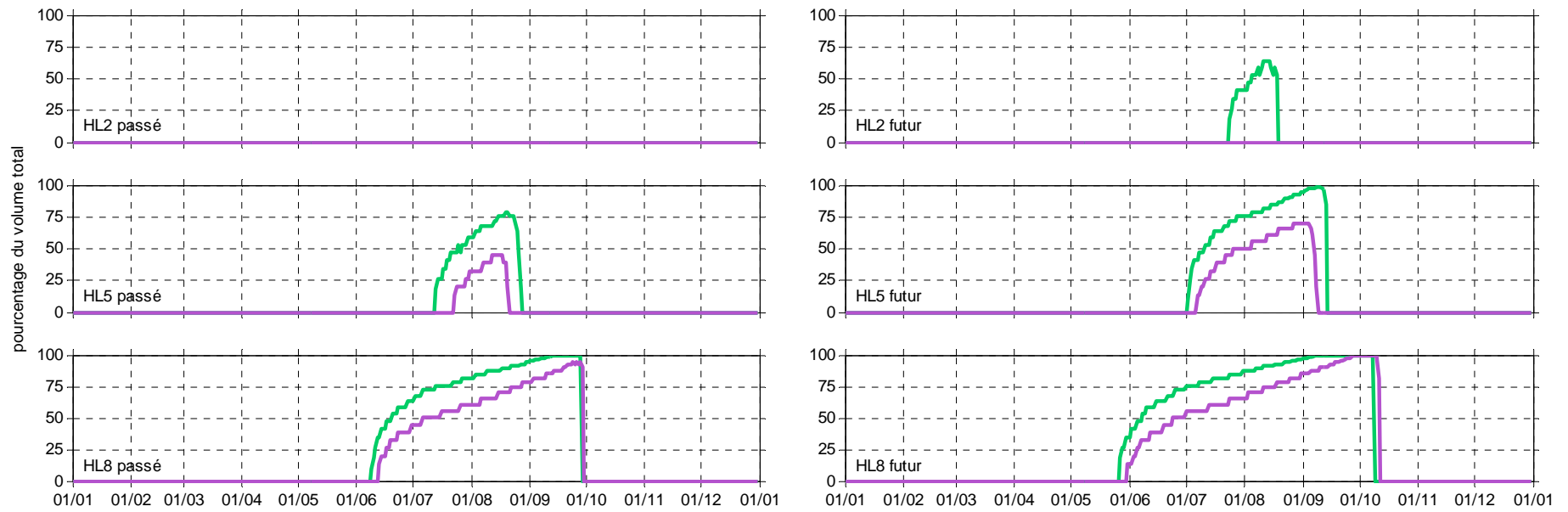


Figure 8. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet) lorsque placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070.

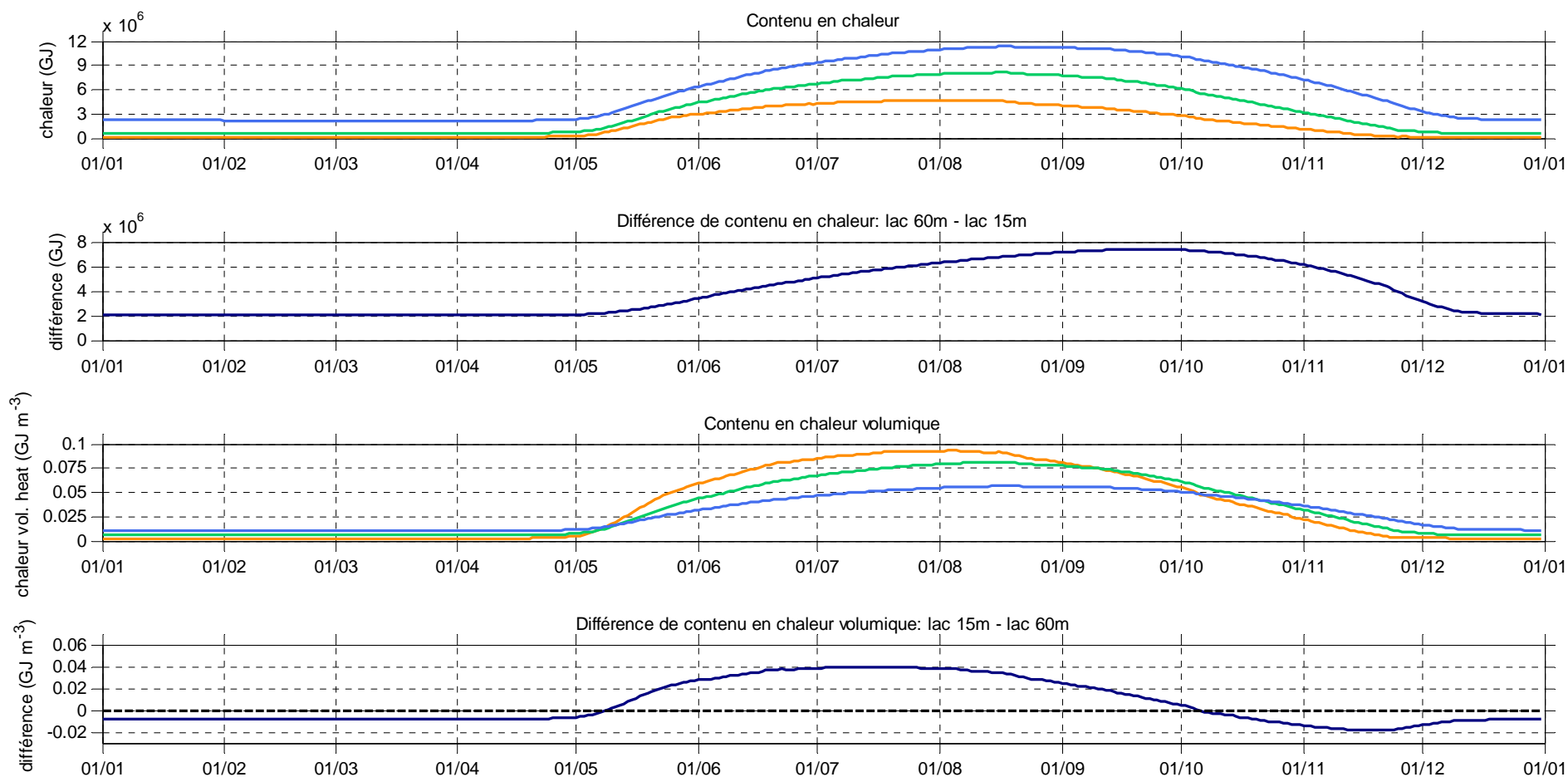


Figure 9. (a) Cycles annuels de contenu en chaleur (période 1981-2101) pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés à la latitude HL8, (b) différence de contenu en chaleur 60m – 15m, (c) Cycles annuels de contenu en chaleur volumique (période 1981-2101) pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés à la latitude HL8, et (d) différence de contenu en chaleur volumique 15m – 60m.

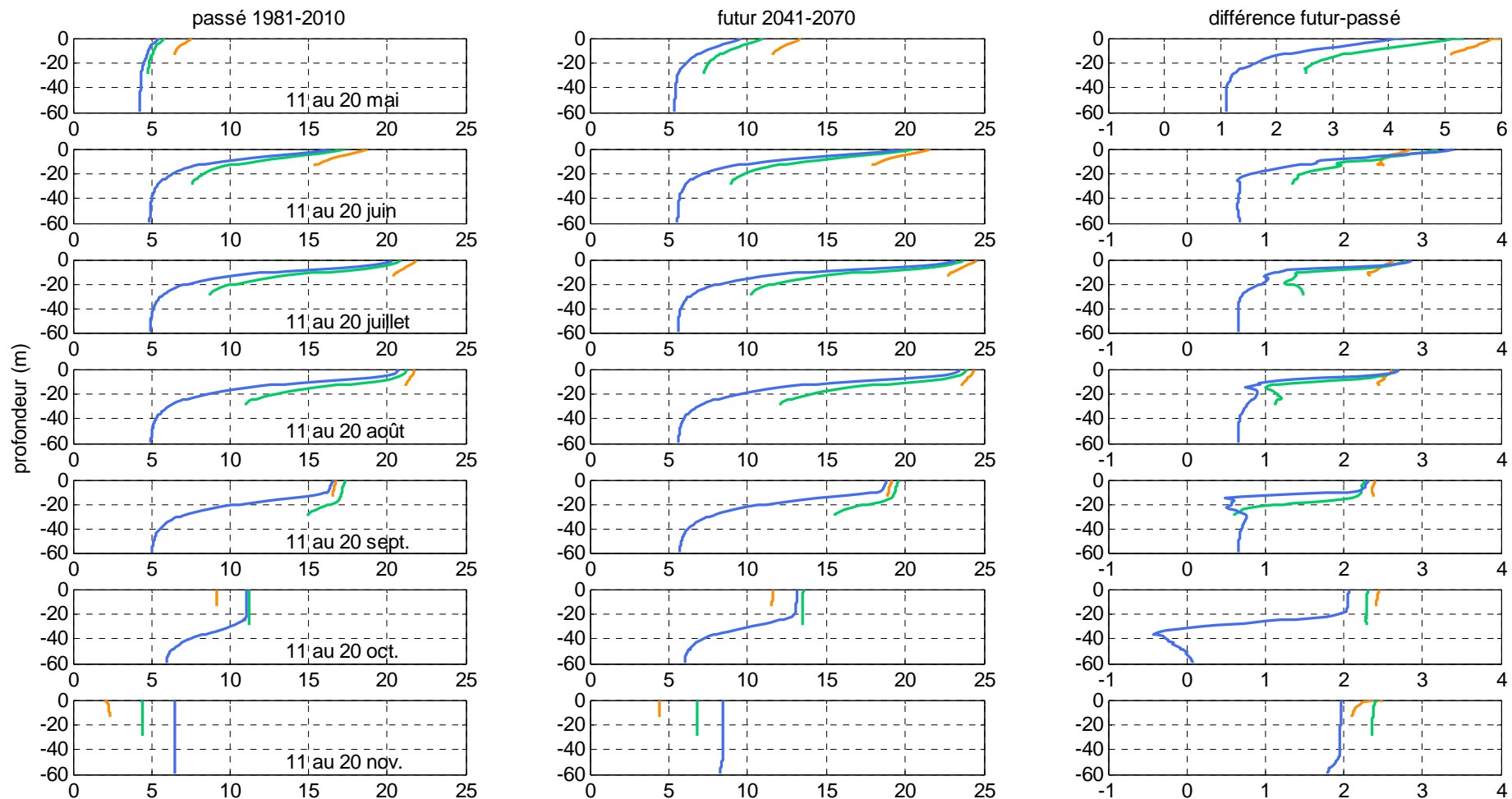


Figure 10. Profils de température passés (1981-2010, gauche) et futurs (2041-2070, centre), et différences futur-passé (droite) pour sept décades de la mi-mai à la mi-novembre pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés à la latitude HL8.

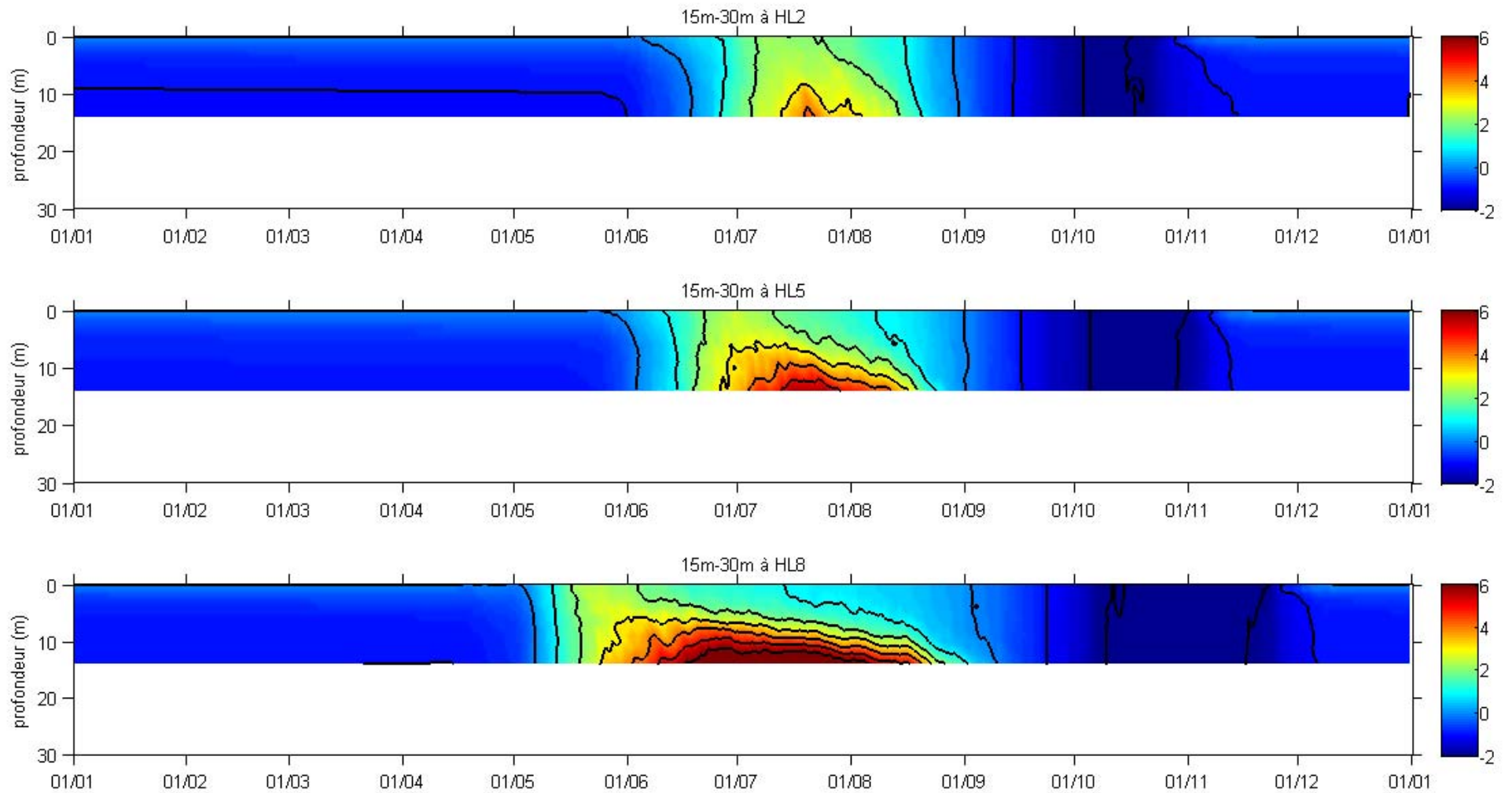


Figure 11. Différence entre les températures des lacs 15m et 30m (période 1981-2101) lorsque placés aux latitudes (a) HL2, (b) HL5, et (c) HL8.

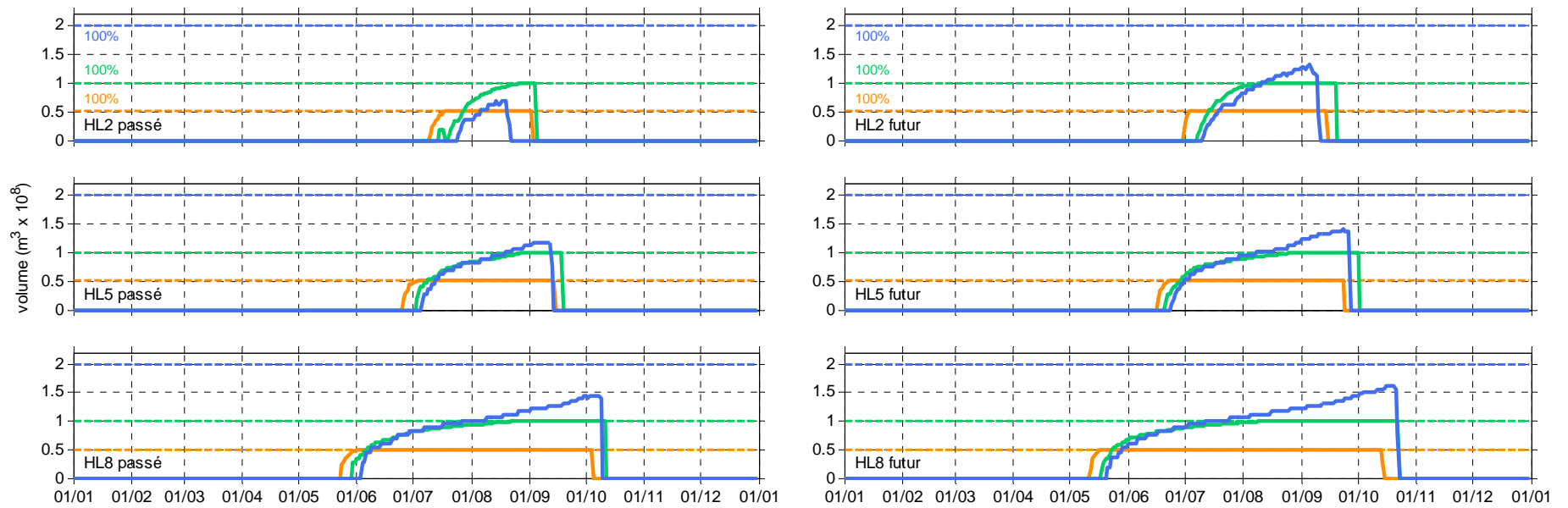


Figure 12. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 12 \text{ } ^\circ\text{C}$ pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsqu'ils sont placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070.

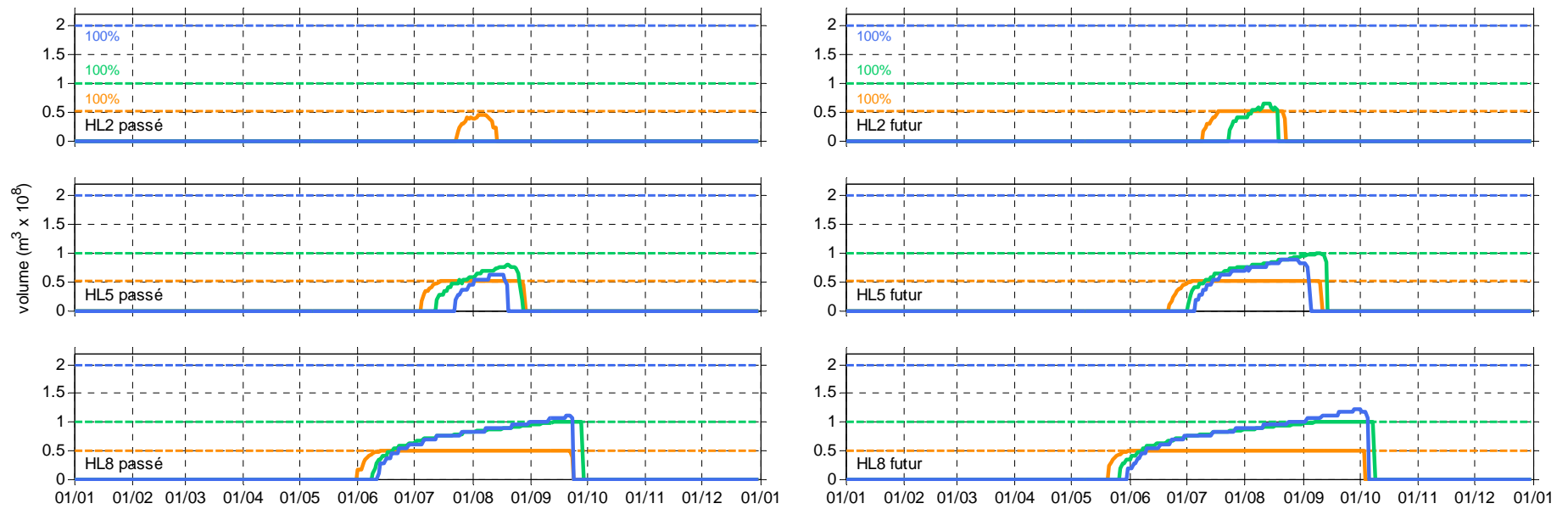


Figure 13. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ pour les lacs 15m (orange), 30m (vert) et 60m (bleu) lorsque placés aux latitudes HL2, HL5 et HL8. À gauche pour la période 1981-2010, et à droite pour la période 2041-2070.

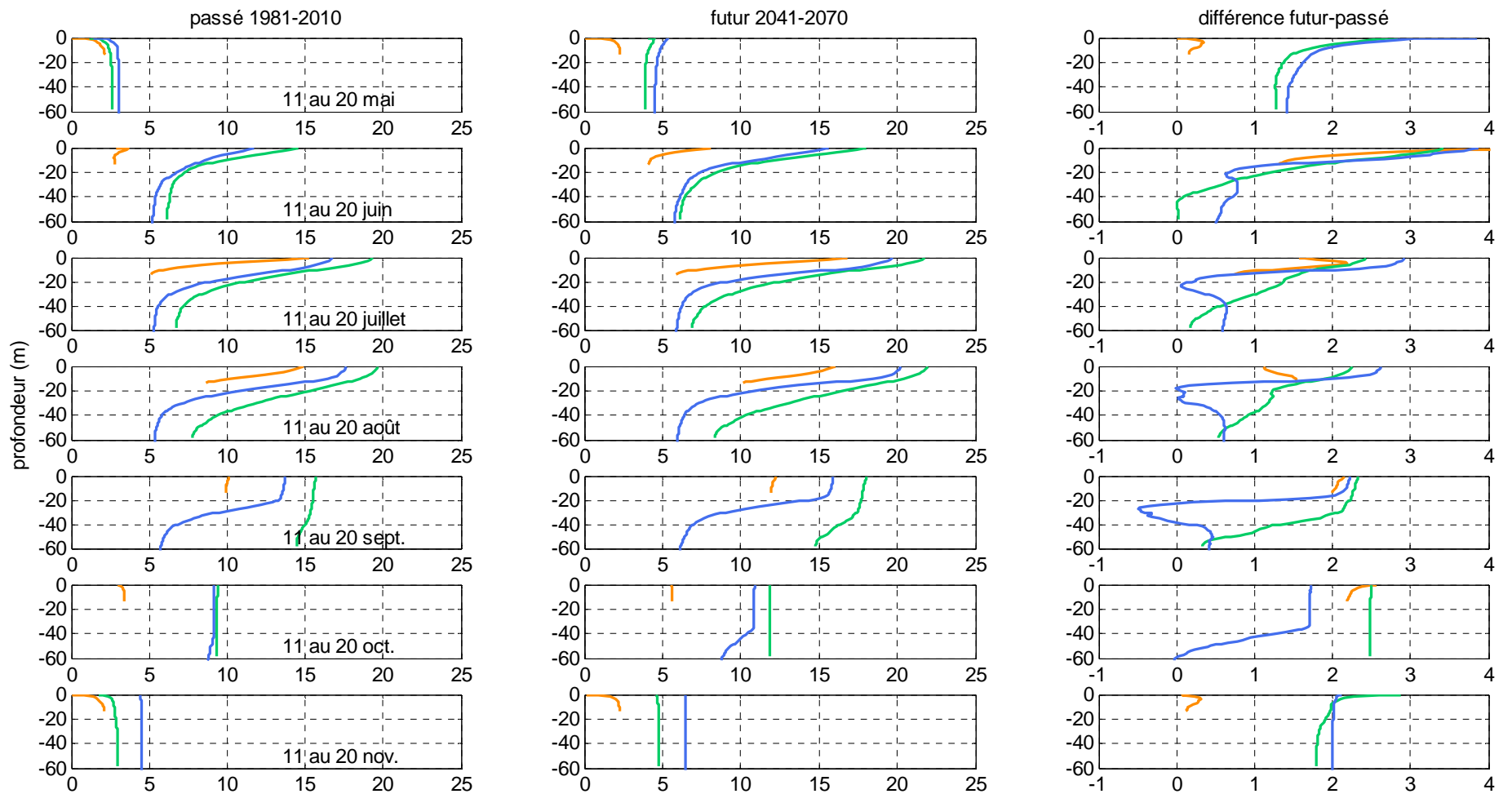


Figure 14. Profils de température passés (1981-2010, gauche) et futurs (2041-2070, centre), et différences futur-passé (droite) pour sept décades de la mi-mai à la mi-novembre pour les lacs Stewart (orange), Chibougamau (vert) et Jacques-Cartier (bleu).

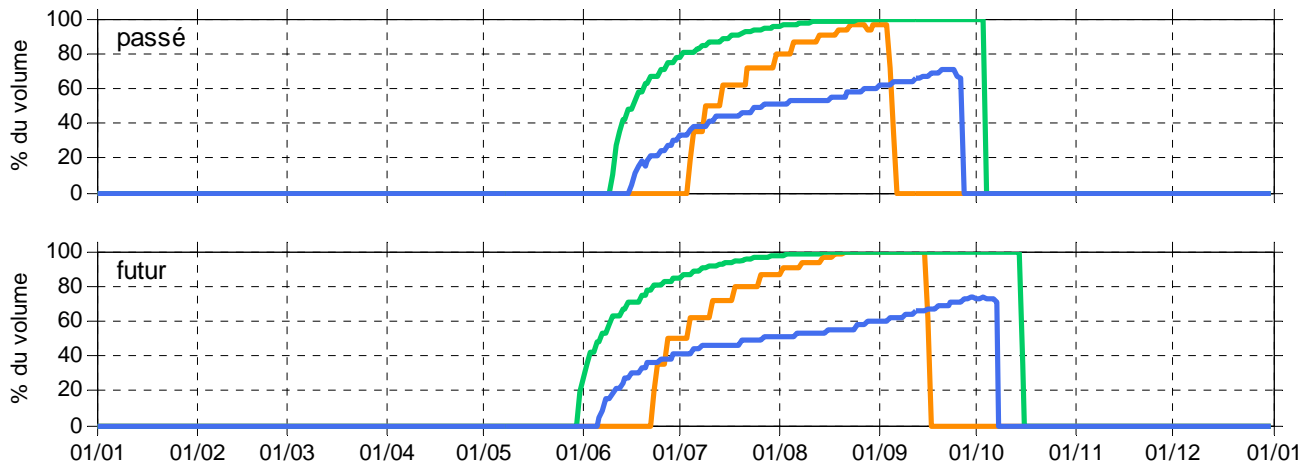


Figure 15. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les lacs Stewart (orange), Chibougamau (vert) et Jacques-Cartier (bleu). En haut pour la période 1981-2010, et en bas pour la période 2041-2070.

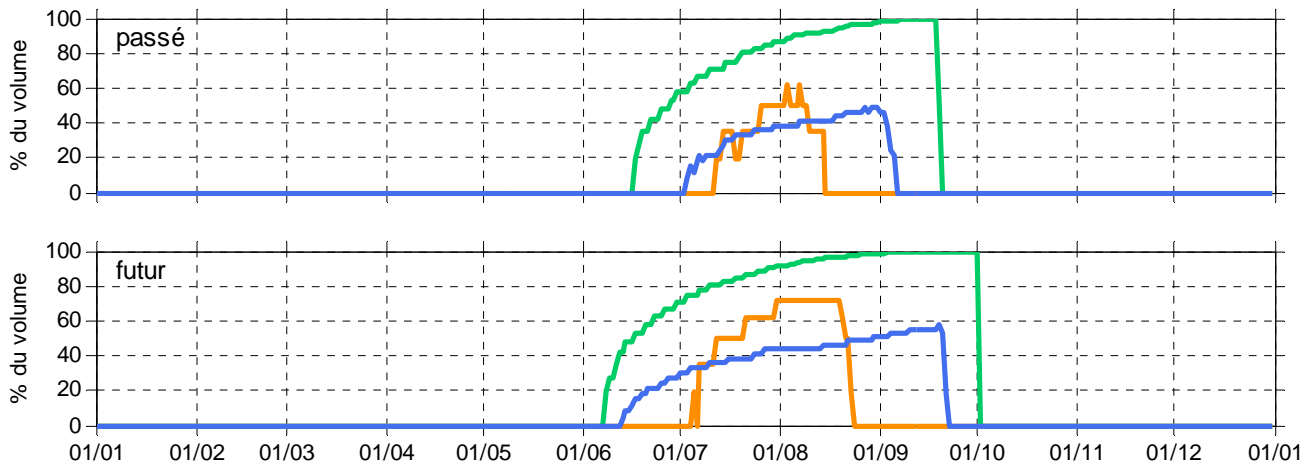


Figure 16. Cycle annuel du pourcentage du volume du lac avec $T \geq 15 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les lacs Stewart (orange), Chibougamau (vert) et Jacques-Cartier (bleu). En haut pour la période 1981-2010, et en bas pour la période 2041-2070.

Annexe 1

Étalonnage du modèle MyLake pour le lac Jacques-Cartier

L'étalonnage utilisé pour les études de sensibilité est celle du lac Jacques-Cartier, un lac ayant une superficie de 12,6 km², une profondeur maximum de 68 m et une profondeur moyenne de 22,3 m.

La modèle ayant servi à la modélisation des températures passées et futures est le modèle MyLake (Multi-year Lake model), v.1.2 (Saloranta et Andersen, 2007). En plus de la température de la colonne d'eau, ce modèle simule aussi l'évolution du couvert de glace et de neige. MyLake est un modèle unidimensionnel codé en langage Matlab. Son pas de temps est de 24 h (non ajustable) mais convection et profils de température sont calculés deux fois par jour, i.e. de jour et de nuit. L'épaisseur de chaque couche peut être spécifiée. Pour le présent travail, la colonne d'eau a toujours été divisée en couches de 1 m d'épaisseur. Les intrants requis sont : 1) bathymétrie du lac sous la forme de l'aire à la profondeur de chaque couche, 2) conditions initiales, i.e. profil de température et épaisseur de glace et de neige au début de la période de simulation, et 3) séries de valeurs journalières couvrant toute la période de simulation pour sept paramètres météorologiques. Les paramètres météorologiques nécessaires au modèle sont : 1) température de l'air, 2) humidité relative, 3) pression atmosphérique, 4) vitesse du vent, 5) précipitations, 6) radiation globale, et 7) couverture nuageuse.

Le modèle MyLake fut adapté pour quatre lacs en utilisant les meilleures données bathymétriques disponibles et étalonné de manière à reproduire le plus fidèlement possible les séries de température observées. Ces lacs sont : Stewart, Chibougamau, Jacques-Cartier, et Bédard. Tous les détails sont donnés dans Bélanger et al. (2013).

L'étalonnage du modèle MyLake pour le lac Jacques-Cartier consistait à choisir les valeurs des paramètres ajustables du modèle de manière à ce que les séries de température simulées reproduisent au mieux les séries observées. Les divers paramètres ajustables sont décrits dans Saloranta et Andersen (2004) et Saloranta et Andersen (2005). Ces paramètres incluent, par exemple, la diffusivité et un coefficient « d'exposition au vent » modifiant l'énergie disponible pour le mélange induit par le vent. Les simulations d'étalonnage débutent en juin (sans couvert de glace) et les conditions initiales sont dérivées des observations. Les températures simulées ont été comparées aux températures observées pour les périodes du 17 juin au 2 novembre 2010 et du 3 juin au 2 novembre 2011.

La Figure 17 présente une comparaison des températures simulées et observées pour 2010 à cinq profondeurs choisies. Les différences RMS vont de 0,48 °C à 1,46 °C. Les différences les plus marquées sont entre 8 m et 11 m de profondeur, c'est-à-dire aux environs de la thermocline. En été, les températures dans cette partie de la colonne d'eau peuvent changer rapidement sur une très

courte distance verticale. Il est aussi probable qu'une petite imprécision dans la profondeur des thermographes ait contribué aux différences plus prononcées dans cette partie de la colonne d'eau. La différence RMS à 2 m est de 1,16 °C. En-dessous de 12 m, la différence RMS décroît avec la profondeur jusqu'à 30 m, soit la profondeur du plus profond thermographe. On note qu'en profondeur le maximum pour les températures simulées tend à survenir légèrement en retard par rapport aux températures observées.

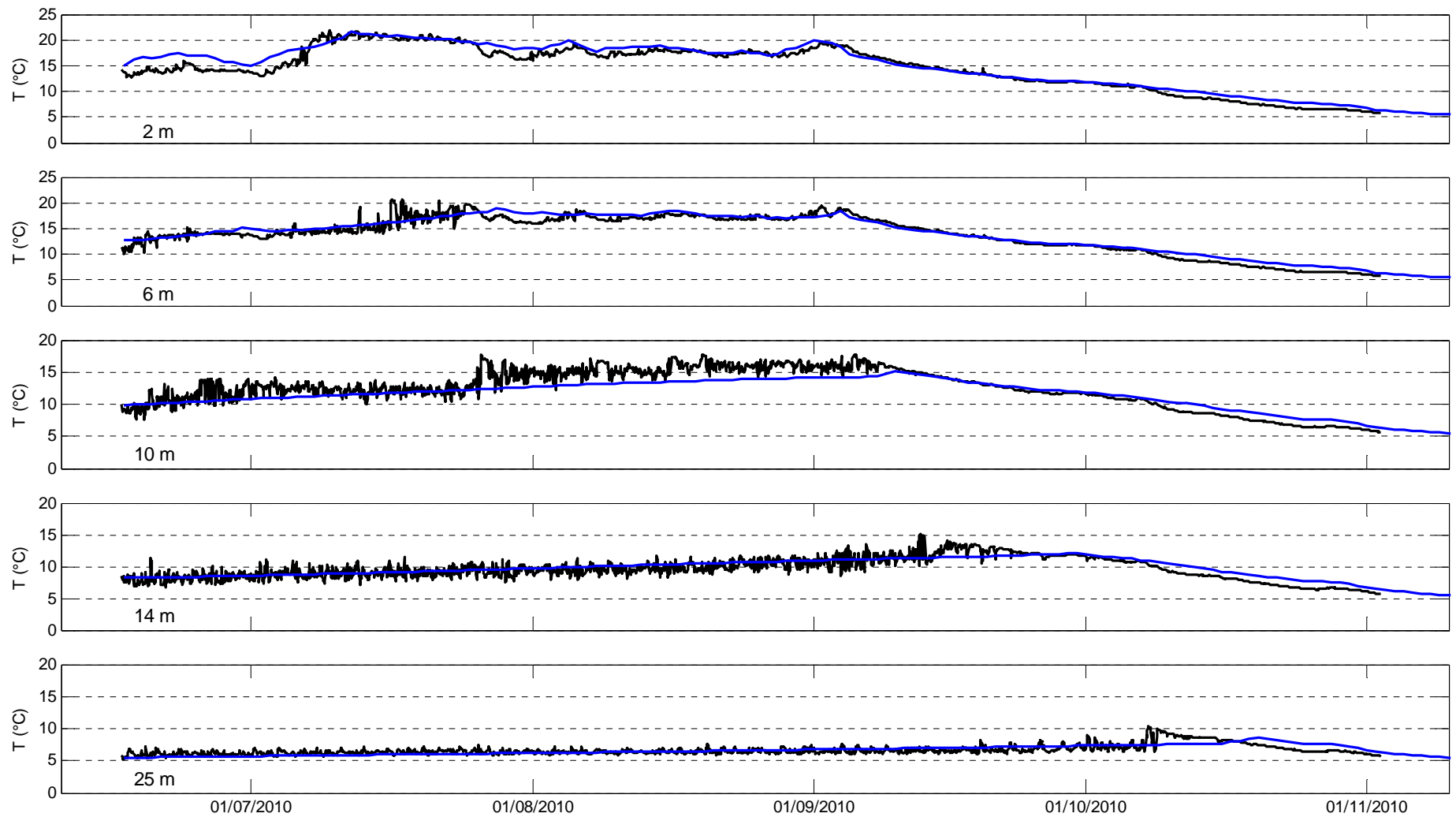


Figure 17. Comparaison entre températures observées (noir) et températures simulées (bleu) à cinq profondeurs choisies pour la période du 17 juin au 2 novembre 2010.

Annexe 2

Caractéristiques morphométriques des lacs hypothétiques utilisés pour l'étude de sensibilité du volume du lac sur la température de l'eau

La forme du lac n° 1 a été dérivée de la variation de l'aire avec la profondeur pour le lac Jacques-Cartier (aire en surface : 12,6 km²; profondeur maximum: 68 m). L'équation suivante a d'abord été ajustée pour reproduire au mieux la variation de l'aire avec la profondeur:

$$\text{area}(d) = \text{area}_{\text{max}} \exp(-ad) \left(\frac{d-d_{\text{max}}}{d_{\text{max}}} \right) \quad (\text{éq. 1})$$

où d est la profondeur, d_{max} est la profondeur maximum, $\text{area}(d)$ est l'aire à la profondeur d , area_{max} est l'aire en surface, et a est un paramètre ajustable ($a=20$ pour le lac Jacques-Cartier). La forme fut ensuite appliquée à un lac de 30 m de profondeur maximum, l'aire à un pourcentage donné de la profondeur maximum du lac Jacques-Cartier devenant l'aire au même pourcentage de la profondeur maximum du lac hypothétique.

La forme du lac n° 2 a été obtenue de l'équation suivante:

$$\text{area}(d) = \pi \left(r_{\text{max}} \sin\left(\frac{(d_{\text{max}}-d)}{d_{\text{max}}} \frac{\pi}{2}\right) \right)^2 \quad (\text{éq.2})$$

i.e. $\text{area}(d) = \pi (r(d))^2$ et $r(d) = r_{\text{max}} \sin\left(\frac{(d_{\text{max}}-d)}{d_{\text{max}}} \frac{\pi}{2}\right)$

où d est la profondeur, d_{max} est la profondeur maximum, $\text{area}(d)$ est l'aire à la profondeur d , $r(d)$ est le rayon à la profondeur d , et r_{max} est le rayon maximum en surface (déterminé à partir de l'aire en surface, supposant un lac circulaire). Suivant cette équation, l'aire à 50 % de la profondeur maximum correspond à 50 % de l'aire en surface.

Les lacs n° 1 et n° 2 ont tous les deux une aire en surface de 10,0 km² et une profondeur maximum de 30 m. Le volume du lac n° 1 est de 0,10 km³ et celui du lac n° 2 est de 0,15 km³. Ces volumes correspondent à des profondeurs moyennes de 10 m et 15 m.

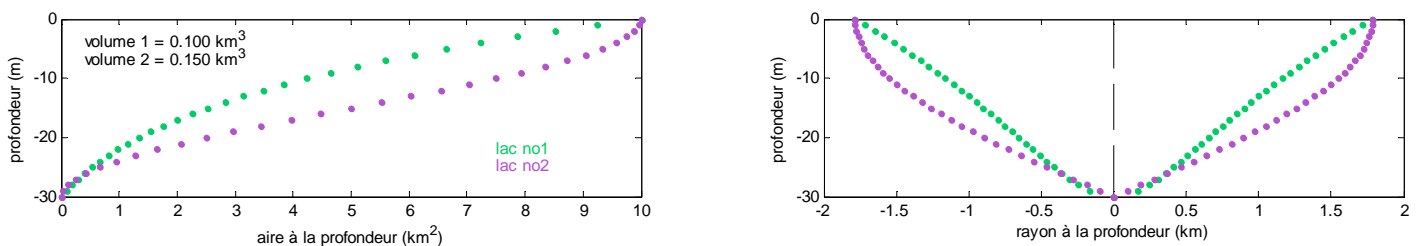


Figure 18. Aire en fonction de la profondeur pour les lacs no 1 (vert) et no 2 (violet), et rayon en fonction de la profondeur supposant un lac circulaire à toutes les profondeurs.

Annexe 3

Caractéristiques morphométriques des lacs hypothétiques utilisés pour l'étude de sensibilité de la profondeur maximum du lac sur la température de l'eau

La forme des lacs 15m, 30m et 60m a été dérivée de la variation de l'aire avec la profondeur pour le lac Jacques-Cartier (aire en surface : 12,6 km²; profondeur maximum: 68 m). L'équation suivante a d'abord été ajustée pour reproduire au mieux la variation de l'aire avec la profondeur:

$$\text{area}(d) = \text{area}_{\text{max}} \exp(-ad) \left(\frac{d-d_{\text{max}}}{d_{\text{max}}} \right) \quad (\text{éq. 1})$$

où d est la profondeur, d_{max} est la profondeur maximum, $\text{area}(d)$ est l'aire à la profondeur d , area_{max} est l'aire en surface, et a est un paramètre ajustable ($a=20$ pour le lac Jacques-Cartier). La forme fut ensuite appliquée à trois lacs ayant des profondeurs maximum de 15 m, 30 m et 60 m, l'aire à un pourcentage donné de la profondeur maximum du lac Jacques-Cartier devenant l'aire au même pourcentage de la profondeur maximum du lac hypothétique.

Les lacs 15m, 30m et 60m ont tous une aire en surface de 10,0 km². Le volume du lac 15m est de 0,05 km³, celui du lac 30m est de 0,10 km³ et celui du lac 60m est de 0,20 km³. Ces volumes correspondent à des profondeurs moyennes de 5 m, 10 m et 20 m.

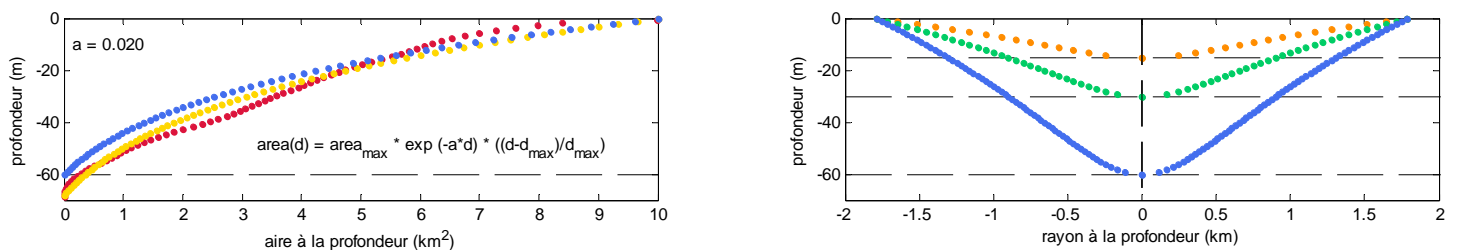


Figure 19. Aire en fonction de la profondeur pour le lac Jacques-Cartier (rouge), pour un lac hypothétique de 68 m suivant l'équation 1 (jaune), et pour un lac hypothétique de 60 m dérivé à partir du lac hypothétique de 68 m (bleu). Rayon en fonction de la profondeur.