



Université du Québec

Institut national de la recherche scientifique

Eau, Terre et Environnement

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

par

**C. Bélanger¹, D. Huard², Y. Gratton¹, D.I. Jeong^{1,3}, A. St-Hilaire¹,
J.-C. Auclair¹ et I. Laurion¹**

¹ Institut national de la recherche scientifique – Eau Terre Environnement

² Ouranos

³ Université du Québec à Montréal

juin 2013

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



ISBN : 978-2-89146-814-5

Table des matières

Remerciements

1. Introduction
2. Objectifs
3. Cadre du projet
4. Méthodologie
 - 4.1 Description du travail
 - 4.2 Le modèle MyLAKE
 - 4.3 Données météorologiques
 - 4.4 Scénarios climatiques
 - 4.4.1 Méthode des deltas
 - 4.4.2 Modèles climatiques et choix des simulations
 - 4.5 Lacs modélisés, données de bathymétrie et données de température
 - 4.6 Modélisation des températures climatologiques
 - 4.7 Variations nord-sud utilisant un lac typique
 - 4.8 Études de sensibilité utilisant des lacs hypothétiques
5. Résultats
 - 5.1 Calibration
 - 5.2 Modélisation des températures climatologiques : résultats pour diverses simulations climatiques et simulations choisies
 - 5.3 Conditions climatologiques futures aux lacs réels
 - 5.3.1 Horizon 2041-2070
 - 5.3.2 Horizon 2071-2100
 - 5.4 Variations nord-sud des conditions climatologiques futures pour un lac typique
 - 5.4.1 Cycle annuel du contenu en chaleur
 - 5.4.2 Occurrence des profils uniformes à 4 °C
 - 5.4.3 Cycle annuel du couvert de glace
 - 5.4.4 Cycle annuel de température
 - 5.5 Variations nord-sud pour lacs hypothétiques
 - 5.5.1 Impact de la profondeur maximum du lac
 - 5.5.2 Impact de la variation de l'aire avec la profondeur (volume)
6. Discussion
 - 6.1 Impacts des changements climatiques anticipés sur les habitats et les refuges thermiques
 - 6.2 L'oxygène dissous
7. Conclusions et recommandations
 - 7.1 Conclusions
 - 7.2 Suggestions de travaux futurs
8. Références

Annexes

- A.1 Estimation de la radiation solaire et de la couverture nuageuse
- A.2 Scénarios climatiques et la méthode des deltas
- A.3 Températures observées aux lacs réels
- A.4 Comparaisons entre températures observées et températures modélisées pour les lacs Stewart, Chibougamau, Jacques-Cartier et Bédard
- A.5 Cycles annuels de températures climatologiques passées (1979-2010) et futures (2041-2070) et différence « futur-passé » pour les lacs Stewart, Chibougamau, Jacques-Cartier et Bédard.
- A.6 Profils de température passée et future pour sept décades (mi-mai à mi-novembre) pour le lac Jacques-Cartier lorsque placé à huit latitudes
- A.7 Cycle annuel des températures passées et futures pour un lac typique (JAC) lorsque placé à huit latitudes avec blanchiment des températures supérieures à une température seuil et nombre de m³-jours avec température au-dessus de cette température seuil
- A.8 Cycle annuel passé et futur de volume avec températures supérieures à une température seuil pour un lac typique (JAC) lorsque placé à huit latitudes
- A.9 Cycle annuel de contenu en chaleur passé et futur pour trois lacs hypothétiques de différentes profondeurs
- A.10 Profils de température passée et future pour trois lacs hypothétiques de différentes profondeurs
- A.11 Cycle annuel de contenu en chaleur passé et futur pour deux lacs hypothétiques de volume différent
- A.12 Profils de température passée et future pour deux lacs hypothétiques de volume différent

Remerciements

Nous tenons à remercier Bill Doidge de Makivik qui nous a fourni les données bathymétriques du lac Stewart et Geneviève Philibert du Centre d'études nordiques (CEN) qui nous a permis d'utiliser ses données bathymétriques du lac Jacques-Cartier. Merci aussi à Reinhard Pienitz du CEN qui nous a laissé utiliser ses données de température du lac Stewart et à Denis Sarrazin, aussi du CEN, qui a les recueillies et traitées. Nous désirons finalement remercier les membres du MDDEFP (anciennement du MRNF) qui ont contribué à ce rapport par leurs suggestions ou par leurs données : Marc Mingelbier, Michel Legault et Julie Hébert, ainsi que tous les techniciens qui ont recueilli les données sur le terrain.

L'étude faisant l'objet du présent rapport a été menée dans le cadre de la programmation scientifique PACC-26 sous la responsabilité du consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques - Ouranos. Elle a aussi reçu un support financier du CRSNG (Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada) à travers des subventions Découvertes à Y. Gratton., A. St-Hilaire et I. Laurion. Une contribution financière provient aussi d'un partenariat dans le cadre du programme en recherche et développement coopératif (CRSNG-RDC) avec Hydro-Québec et le consortium Ouranos.

1. Introduction

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 1.1) 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.

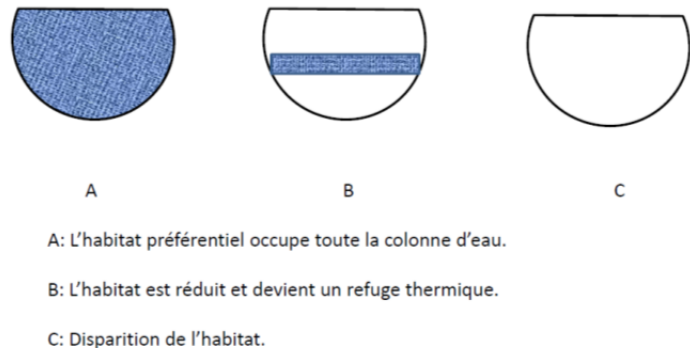


Figure 1.1 Habitats thermiques.

Les changements climatiques anticipés sont susceptibles de causer des changements marqués aux habitats des espèces et possiblement restreindre en nombre et en qualité les habitats viables disponibles. Nous allons tenter d'en estimer les impacts sur l'habitat thermique du touladi.

2. Objectifs

Ce projet s'inscrit dans une démarche de quantification des effets des changements climatiques anticipés sur les habitats des salmonidés. Plus spécifiquement, il vise à estimer les températures futures des eaux des lacs du nord québécois et à prédire l'impact des changements à venir sur les habitats des touladis. L'aspect pratique envisagé de ces résultats est une meilleure gestion de cette importante ressource de manière à assurer la pérennité de la pêche d'autosubsistance et la conservation des espèces de poisson pour les générations à venir. Nos prévisions aideront les gestionnaires de ces espèces à prévoir quels sont les lacs qui sont les plus susceptibles de maintenir leurs habitats et qui devraient être éventuellement êtreensemencés d'une façon prioritaire. Elle offrira aux gestionnaires du MDDEFP et de Makivik la possibilité de prévoir des mesures de prévention ou d'atténuation.

Pour y parvenir, nous avons :

- Utilisé un modèle simulant la structure thermique verticale des lacs en fonction des variables météorologiques de surface et pouvant être calibré avec des données historiques de la stratification verticale;
- Utilisé des approches géostatistiques afin d'interpoler les données météorologiques de surface à partir des stations existantes;

- Généré des scénarios thermiques permettant d'évaluer la sensibilité des habitats aux projections des modèles climatiques régionaux et globaux pour la période 2041-2070.

Nous avons étudié l'évolution possible des habitats thermiques des lacs en réponse au réchauffement climatique dans trois grandes régions du Québec: la région au nord du 55° parallèle, une région intermédiaire (50° à 55° N) et la région au sud du 50° parallèle. Ces régions seront représentées par au moins un lac témoin pour lesquels nous avons obtenu des mesures de la structure thermique verticale. Les trois lacs choisis pour représenter ces régions sont les lacs Stewart, Chibougamau et Jacques-Cartier, respectivement. Nous avons obtenu et validé des données de la température de la colonne d'eau sur une ou plusieurs années pour chacun de ces lacs. En attendant que ces données soient disponibles, nous avons débuté l'analyse et la modélisation à l'aide de données de température de l'eau d'un quatrième lac, le lac Bédard situé dans la forêt Montmorency, un petit lac (250 m de diamètre) peu profond (environ 10 m) échantillonné à tous les ans dans le cadre des activités d'enseignement de l'INRS-Eau Terre Environnement.

Un objectif secondaire était de déterminer comment les changements climatiques à venir pourraient affecter les dates de gel et de dégel ainsi que l'épaisseur de la couverture de glace des lacs du nord du Québec.

3. Cadre du projet

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 variation 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 causé 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 figure 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 (Caplaine 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 considérés 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 ceux de la famille des salmonidés. Le refuge thermique est défini comme le pourcentage du volume d'eau restant sous la température seuil (une température seuil différente 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 concentrons sur l'impact des changements climatiques sur les aspects physiques des lacs en relation avec les habitats préférentiels d'une espèce de salmonidés: le touladi. Le touladi (ou truite grise) est 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 ou 15 °C et en profondeur par une concentration d'oxygène supérieure à 4 ou 6 mg L⁻¹ (Plumb et Blanchfield, 2009).

La société Makivik est un organisme dont le mandat est de protéger les droits, les intérêts et les compensations financières découlant, d'une part, de la Convention de la Baie James et du Nord québécois signée en 1975 et, d'autre part, de l'Accord sur les revendications territoriales des Inuits du Nunavik entré en vigueur en 2008. Le Service du développement des ressources de la Société exploite à Kuujuaq un centre de recherche reconnu à l'échelle nationale où l'on effectue des recherches scientifiques sur la faune et l'environnement. Les Inuits pratiquent une pêche de subsistance et on retrouve le touladi parmi les deux espèces les plus prisées. Nous avons choisi le lac Stewart pour représenter les régions dont les latitudes sont supérieures à 60°N. Le choix du Lac Stewart a été suggéré par la société Makivik car leurs membres sont intéressés à toute information sur l'effet des changements climatiques à venir sur la croissance des salmonidés dans les lacs nordiques. Le centre de recherche de la société Makivik profite déjà, dans le cadre du *Polar View Lake Ice Service*, d'informations sur les conditions des glaces (gel, présence de glace et dégel; <http://nunavik.lakeice.ca/>) de certains lacs du Nunavik, dont le lac Stewart.

Le Service de la faune aquatique du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) regroupe une équipe de biologistes et de techniciens de la faune dont les mandats sont orientés vers la conservation, la protection, la restauration et la mise en valeur de la faune aquatique et de ses habitats. Le Service de la faune aquatique planifie, coordonne et réalise des projets de recherche appliquée afin d'étudier la dynamique et l'état de santé des populations de poissons. De plus, le Service de la faune aquatique élabore les plans de gestion des espèces pêchées sportivement et commercialement, et s'implique dans l'élaboration ainsi que dans la mise en place des plans de rétablissement des espèces menacées et vulnérables. Ces projets aident le MDDEFP à formuler ses orientations stratégiques et ses politiques en matière faunique, contribuant ainsi à la pérennité des écosystèmes et des espèces aquatiques. Des projets sont en cours ou en préparation au sein du Service de la faune aquatique pour, d'une part, quantifier la sensibilité aux changements climatiques des poissons du fleuve Saint-Laurent et des eaux intérieures et, d'autre part, adapter l'éventail des mesures de gestion, de protection et de conservation que nous pouvons utiliser afin d'alléger les pressions qui s'accumulent sur la faune aquatique depuis le début de

l'ère industrielle. Notre recherche sur les lacs s'inscrit dans ce contexte et le choix des lacs Jacques-Cartier et Chibougamau a été suggéré par le MDDEFP. Il se veut aussi un complément au projet sur les refuges thermiques en rivière intitulé « Importance des refuges thermiques pour le saumon atlantique en périodes de canicule : méthodes de détection, impacts biologiques et prospective climatique ».

4. Méthodologie

4.1 Description du travail

Le travail consistait d'abord à modéliser le cycle annuel des conditions de température passées (1979-2010) et futures (2041-2070) pour quelques lacs de diverses dimensions et latitudes. Ensuite, un de ces lacs fut conceptuellement placé à huit latitudes (de 46.50 °N à 60.15 °N) le long du méridien 071 °O dans le but de considérer l'impact de la latitude sur les changements climatiques à venir. Finalement, quelques études de sensibilité ont été réalisées afin de considérer l'impact de variations dimensionnelles et/ou morphologiques sur les changements de température modélisés.

Le travail repose sur l'utilisation d'un modèle unidimensionnel (MyLake) forcé par l'évolution de sept paramètres météorologiques (voir section 4.2). La première étape du travail de modélisation est la calibration du modèle pour chacun des lacs considérés, à savoir les lacs Stewart, Chibougamau, Jacques-Cartier et Bédard (figure 2.1). On vise alors à ce que le modèle reproduise au mieux les données de température (séries temporelles) à diverses profondeurs. Ces données étaient déjà disponibles ou ont été récemment acquises à cette fin en 2010 et en 2011. À cette étape, le modèle est forcé par des données météorologiques d'une station proche ou par des données interpolées par régionalisation (voir section 4.3). La période de simulations couvre (ou excède) la période des données de température et les températures modélisées sont comparées aux températures observées.

La seconde étape du travail de modélisation consiste à forcer le modèle calibré avec de longues séries météorologiques (≥ 30 ans) de manière à pouvoir moyenner des climatologies passée et future. Pour le passé récent, les séries transmises au modèle proviennent des données de ré-analyse NARR (North-American Regional Reanalysis) (Mearns et al., 2012; voir section 4.3). Pour la climatologie future, les séries météorologiques passées sont modifiées par des valeurs (deltas) obtenues de la différence moyenne entre séries future et passée (à la position du lac) modélisées par le Modèle canadien régional du climat (voir section 4.4.1).

La même technique d'estimation des climatologies passée et future est utilisée aux troisième et quatrième étapes de modélisation. On compare alors les climatologies passée et future pour un lac réel (le lac Jacques-Cartier) lorsque conceptuellement placé à diverses latitudes, puis pour des lacs hypothétiques aux dimensions et profondeurs arbitrairement choisies lorsque placés aux mêmes latitudes.

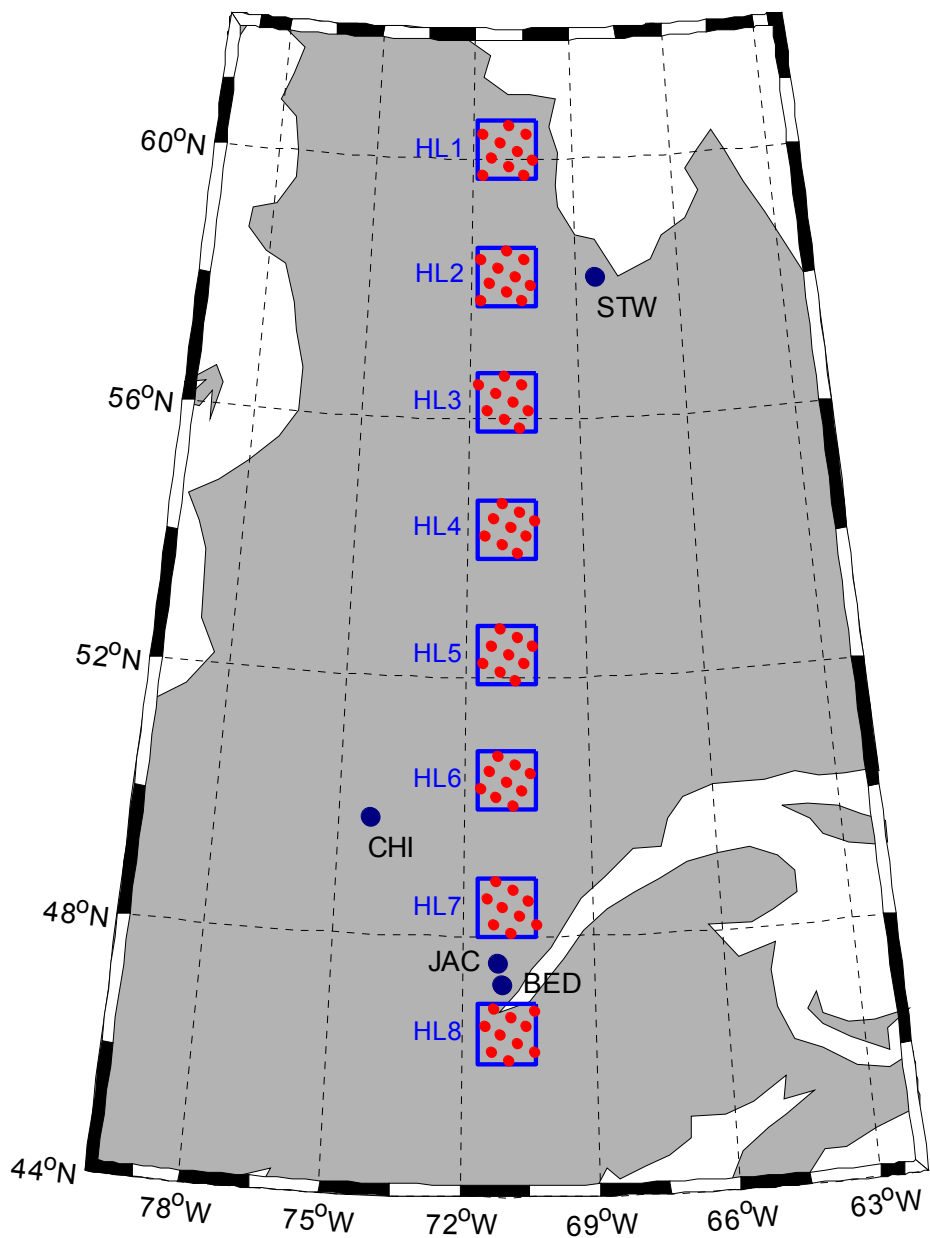


Figure 2.1 Positions des lacs utilisés pour calibration (STW : Stewart, CHI : Chibougamau, JAC : Jacques-Cartier, BED : Bédard) et position des lacs hypothétiques le long du méridien 071 °O (HL1 à HL8). Les lacs hypothétiques sont au centre de huit régions de 100 km x 100 km. Les données NARR aux points de grille (points rouges) inclus dans chaque région furent moyennées pour produire les longues séries météorologiques (32 ans) utilisées pour modéliser les températures climatologiques.

4.2 Le modèle MyLake

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 la convection et les 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 servant d'intrants 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 débit journalier entrant dans le lac et la température de l'eau déversée dans le lac peuvent aussi être spécifiés. Ces données n'étant pas disponibles et la modélisation de ces valeurs ayant requis un travail considérable, des débits entrants arbitraires furent imposés (MyLake considère un volume invariable) et la température de l'eau entrante fut laissée indéterminée, entraînant ainsi le modèle à considérer que la température de l'eau entrant le lac est égale à la température de l'eau de la première couche (i.e. pas de gain ou perte de chaleur via les débits entrant et sortant).

Trois autres options du modèle sont disponibles mais n'ont pas été utilisées dans le cadre de ce travail. Des modules existent pour effectuer un suivi de la matière organique et particulaire dans la colonne d'eau, simuler la production phytoplanctonique et caractériser les échanges avec les sédiments.

4.3 Données météorologiques

Le modèle MyLake est forcé par des séries de données météorologiques idéalement couvrant la totalité de la période simulée (de courtes périodes sans données sont tolérées mais affectent les résultats). Les paramètres météorologiques requis 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. Pour les relativement courtes simulations de l'étape de calibration (voir section 5.1), les séries de valeurs journalières pour six de ces paramètres ont été dérivées à partir des données météorologiques disponibles. Les séries obtenues s'étendent sur douze ans (2000-2011). Pour les paramètres 1 à 5, les séries furent construites à partir des données à la station météorologique la plus proche (pour les lacs considérés, les distances varient entre 2,1 et 22,6 km). Pour la radiation globale incidente, les stations qui mesurent cette variable sont rares. Ainsi, à l'exception d'un lac pour lequel la radiation globale à proximité était disponible pour la période des observations de température (Lac Bédard), les séries de radiation ont été obtenues de modèles empiriques basés sur les relations avec des paramètres météorologiques communément mesurés, à savoir température et humidité relative (voir annexe A.1). Une telle approche a déjà été utilisée par Fortin et al. (2008). Sept modèles furent considérés et on prévoit que la comparaison des résultats obtenus de ces modèles fasse éventuellement l'objet d'une publication. Pour un lac (Chibougamau), le modèle retenu est basé sur l'écart diurne de température. Si les données de radiation globale sont rares, les données de

couverture nuageuse sont pratiquement inexistantes. Pour ce paramètre, nous avons donc dû recourir aux données de ré-analyse NARR (North-American Regional Reanalysis, une extension de la ré-analyse globale du NCEP, National Centers for Environmental Prediction) au point de grille le plus près du lac considéré (distances variant entre 5,0 et 15,2 km). Ces données à haute résolution (~ 32 km aux basses latitudes, intervalle de 3 h) sont directement disponibles sous forme journalière.

Estimer les cycles annuels climatologiques de température requiert de longues simulations s'étendant sur de nombreuses années. Pour cette étape du projet, toutes les séries de valeurs journalières pour les sept intrants au modèle ont été obtenues des ré-analyses NARR (valeurs au point de grille le plus proche ou moyennées sur une région selon l'étape du travail). Les séries pour le cycle annuel passé couvrent la période 1979-2010 (32 ans). Les séries pour le cycle annuel futur furent obtenues par modification des séries passées en utilisant la méthode des deltas (voir section 4.4.1).

4.4 Scénarios climatiques

4.4.1 Méthode des deltas

Pour calculer le cycle annuel futur de température pour un lac donné, il faut fournir au modèle MyLake de longues séries futures (à la position du lac) pour sept paramètres météorologiques (section 4.2). Une difficulté survient du fait qu'à une position donnée les résultats des modèles climatiques sont parfois systématiquement différents des observations. Pour contourner ce problème, une première approche consiste à corriger les biais systématiques, c'est-à-dire à calculer pour une période passée l'écart moyen entre les observations et les sorties d'une simulation climatique (éventuellement sur une base mensuelle ou saisonnière) puis, supposant que ces biais resteront inchangés dans le futur, à soustraire cet écart des sorties des simulations futures. Les séries futures ainsi corrigées sont alors passées en intrants au modèle de lac. Par exemple, cette méthode (méthode des biais) a été utilisée par Dibike et al. (2011) pour leur estimation des changements futurs du couvert de glace des lacs boréaux de l'Amérique du nord. Une deuxième approche consiste à calculer la différence entre simulations climatiques pour une période future et une période passée de référence puis à modifier une série d'observations passées à l'aide de cette différence (communément appelée delta) afin d'obtenir une série future. Cette différence peut par exemple être calculée sur une base mensuelle ou saisonnière. Cette méthode (méthode des deltas) génère donc des séries futures basées sur une même série observée, impliquant cette fois-ci une variabilité météorologique inchangée. Les deux méthodes comportent des avantages et des inconvénients et, idéalement, il peut sembler prudent de recourir aux deux méthodes et de s'assurer que les grandes conclusions restent inchangées indépendamment de la méthode utilisée. Tous les résultats présentés dans le présent rapport ont été obtenus via la méthode des deltas.

4.4.2 Modèles climatiques et choix des simulations

Toutes les simulations disponibles pour le territoire québécois furent initialement considérées, bien que restreignant notre attention aux simulations régionales dont la résolution semblait davantage appropriée pour exprimer les différents climats du Québec le long d'un gradient nord-sud. Éventuellement, nous avons utilisé neuf simulations régionales, toutes produites via le même modèle régional de climat, à savoir le Modèle régional canadien du climat (ou CRCM pour *Canadian Regional Climate Model*), version 4.2.3, mais piloté par trois modèles globaux différents : cinq simulations pilotées par le modèle canadien du climat global (CGCM3.1), trois simulations pilotées par le modèle global couplé de l'Institut Max-Planck (ECHAM5), et une simulation pilotée par le modèle global couplé du Centre national de recherches météorologiques (CNRM-CM3.3). Les modèles CGCM3 et ECHAM5 utilisent le scénario d'émission A2 et le modèle CNRM-CM3 utilise le scénario A1b.

On retrouve la méthodologie de construction des scénarios climatiques et une brève analyse des principaux changements attendus pour les variables climatiques pertinentes dans un rapport présenté à l'automne 2012 : « Scénarios climatiques pour l'habitat des salmonidés », par David Huard (annexe A.2). Une comparaison des cycles annuels de température à l'horizon 2041-2070 (pour un lac choisi) modélisés à partir des neuf simulations climatiques considérées est présentée à la section 5.2 du présent rapport. On a aussi voulu considérer au moins minimalement les changements à venir pour un horizon plus éloigné (2071-2100). Pour ce faire, une seule simulation climatique fut considérée (voir section 5.3.2).

4.5 Lacs modélisés, données de bathymétrie et données de température

L'environnement du modèle MyLAKE fut adapté pour quatre lacs utilisant les meilleures données bathymétriques possibles et calibré de manière à reproduire le plus fidèlement possible les séries de température observées (voir section 5.1). Ces lacs sont : Stewart (STW), Chibougamau (CHI), Jacques-Cartier (JAC), et Bédard (BED) (figure 2.1). La position, source des données bathymétriques, superficie et profondeur maximum des lacs sont données au Tableau 1. Les séries de température utilisées pour la calibration et la profondeur des thermographes sont données au Tableau 2. Les données de température sont présentées à l'annexe A.3.

4.6 Modélisation des températures climatologiques

Les températures climatologiques passées et futures (au sens de « normale climatologique », c'est-à-dire la moyenne d'une grandeur à un site donné calculée sur une période de trente ans) sont obtenues en moyennant tous les profils d'une journée donnée pour de longues simulations s'étendant sur 32 ans (i.e., moyenne des 32 profils du 1^{er} janvier, moyenne des 32 profils du 2 janvier, etc.). Les données météorologiques NARR utilisées pour forcer le modèle MyLake pour les températures passées couvre la période 1979-2010. Les mêmes séries modifiées par des deltas (voir section 4.4.1) sont utilisées pour les températures futures. Les deltas, soient additifs ou multiplicatifs selon le paramètre considéré, sont calculés entre la période future 2041-2070 et la période de référence 1961-2000 (annexe A.2). Le futur 2071-2100 a aussi été considéré dans un cas. Les longues simulations débutant au 1^{er} janvier, des conditions initiales (voir section 4.2) réalistes mais approximatives furent imposées pour une première simulation, puis la moyenne des douze dernières années simulées fut utilisée comme conditions initiales pour une deuxième simulation.

4.7 Variations nord-sud utilisant un lac typique

Les variations nord-sud des changements de température à venir sont considérées en plaçant un lac typique à diverses latitudes le long d'un méridien approximativement situé au centre du territoire québécois (071 °O). Le lac choisi est le lac Jacques-Cartier (voir section 4.5) et les huit latitudes considérées, uniformément espacées, vont de 60,15 °N à 46,50 °N (figure 2.1). Le modèle MyLake est forcé par les données de ré-analyse NARR mais, afin de rendre ces données davantage représentatives d'une région donnée, on considère une moyenne des données à tous les points de grille (9 ou 10 points) inclus dans une surface de 100 km par 100 km centrée sur la position supposée du lac. Les deltas sont calculés au point de grille du modèle CRCM4.2.3 le plus près de la position pour chacune des huit positions.

4.8 Études de sensibilité utilisant des lacs hypothétiques

Des études de sensibilité ont été réalisées afin de considérer l'impact de la profondeur et de la forme (volume) des lacs sur les changements de température à venir. Dans le premier cas (impact de la profondeur), les lacs hypothétiques considérés ont une surface proche du lac typique (voir section 4.7) et la variation de l'aire avec la profondeur, calculée à l'aide d'une formule développée pour reproduire la variation observée pour le lac typique, est appliquée pour des lacs de diverses profondeurs de manière à ce que l'aire à une profondeur normalisée « d/d_{max} » donnée soit la même pour chaque lac. Dans le deuxième cas (impact du volume), les lacs hypothétiques considérés ont la même surface que dans le premier cas mais sont d'égales profondeurs. C'est alors la forme (ou variation de l'aire avec la profondeur) qui change. On considère deux formes, à savoir la forme reproduisant la variation observée pour le lac typique et une forme arbitraire avec diminution de l'aire moins rapide dans la partie supérieure de la colonne d'eau (i.e. volume plus grand que pour la première forme). Ces lacs hypothétiques sont placés aux mêmes positions que celles utilisées pour les variations nord-sud pour un lac typique (section 4.7).

Tableau 1 Position, superficie et profondeurs maximum des lacs considérés.

lac	latitude	longitude	source des données bathymétriques	superficie (km ²)	profondeur maximum (m)
Stewart	58,1854 °N	68,4309 °O	Makivik	8,520	15
Chibougamau	49,8262 °N	74,2781 °O	MRNF	213,057	59
Jacques-Cartier	47,5836 °N	71,2200 °O	CEN	12,566	68
Bédard	47,2720 °N	71,1233 °O	INRS-ETE	0,056	11

Tableau 2 Séries de température disponibles pour les lacs considérés.

lac	source des données de température	début de la série (HNE)	fin de la série (HNE)	durée (jours)	intervalle (min.)	profondeurs des senseurs (m)
Stewart	CEN	2004-09-29 4h00	2005-10-07 0h00	372,8	30	~ 1,5 4 9
	CEN	2009-04-28 4h30	2010-07-22 5h30	450,0	60	~ 1,5 4 9
Chibougamau	MRNF	2011-05-27 12h00	2011-11-01 13h00	158,0	60	0,5 2 4 8 10 12 14 16 18 20 24 28 30 ¹
Jacques-Cartier	MRNF	2010-06-16 17h00	2010-11-02 12h00	138,8	60	0,5 2 4 6 7 8 9 10 11 12 14 16 20 25 30
	MRNF	2011-06-03 13h00	2011-11-02 10h00	151,9	60	0,5 2 4 6 7 8 9 10 11 12 14 16 20 25 30
Bédard	INRS-ETE	2006-10-13 13h12	2007-09-04 15h36	326,1	24	2 3 3,5 4 4,5 5 5,5 6 7 8 10 ²
	INRS-ETE	2007-09-27 11h01	2008-08-25 7h01	332,8	240	0,5 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

¹ températures manquantes avant le 8 septembre à 24, 28 et 30 m² températures systématiquement un peu trop basses à 4 m

5. Résultats

5.1 Calibration

La calibration du modèle MyLAKE pour un lac donné consistait à choisir les valeurs des paramètres ajustables de manière à ce que les séries de température modélisée reproduisent le plus fidèlement possible les séries de température observées. Parmi les paramètres ajustables, on retrouve la diffusivité (ajustable séparément pour les périodes avec et sans couvert de glace), la fréquence de Brunt-Väisälä et un coefficient qui modifie l'énergie disponible pour le mélange induit par le vent (*wind sheltering coefficient*) (Saloranta et Andersen, 2004; Saloranta et Andersen, 2005). Pour la calibration, les périodes simulées correspondent grosso modo aux séries temporelles de température disponibles et leur durée ne dépasse pas deux cycles annuels (voir section 4.5). Les épaisseurs initiales de glace et de neige sont généralement nulles au début de la période simulée et le profil initial de température prescrit est dérivé des observations. Les séries météorologiques transmises au modèle proviennent d'observations à une station à proximité du lac considéré ou de données régionalisées (voir section 4.3), à l'exception des données de couverture nuageuse qui dans tous les cas ont été obtenues des données de ré-analyse NARR (*North American Regional Reanalysis*). Certaines informations relatives aux simulations de calibration (période simulée, profil de température initial et données météorologiques utilisées) sont fournies au Tableau 3.

La figure 5.1 donne un exemple de comparaison entre séries de température observées et modélisées à quelques profondeurs choisies. Dans ce cas-ci (Lac Jacque-Cartier, simulation 2010), le modèle MyLake reproduit de manière très satisfaisante l'évolution des températures observées, et ce malgré une légère disparité aux environs de la thermocline où la température peut changer rapidement sur une courte distance verticale. Dans certains cas, une légère imprécision quant à la profondeur des instruments de mesure peut aussi contribuer à la disparité entre températures observées et modélisées. Voir l'annexe A.4 pour les comparaisons aux autres lacs.

Tableau 3 Périodes simulées à l'étape de calibration et source des données météorologiques.

lac	début de la période simulée	fin de la période simulée	durée de la période simulée (jours)	source des données météo : station d'Environnement Canada
Stewart	2005-04-01	2005-11-30	244	7113534
	2009-06-10	2010-11-30	539	
Chibougamau	2011-05-27	2011-12-04	192	7091404
Jacques-Cartier	2010-06-17	2010-12-31	198	7015791
	2011-06-03	2011-12-04	185	
Bédard	2006-10-15	2008-12-31	809	7042395

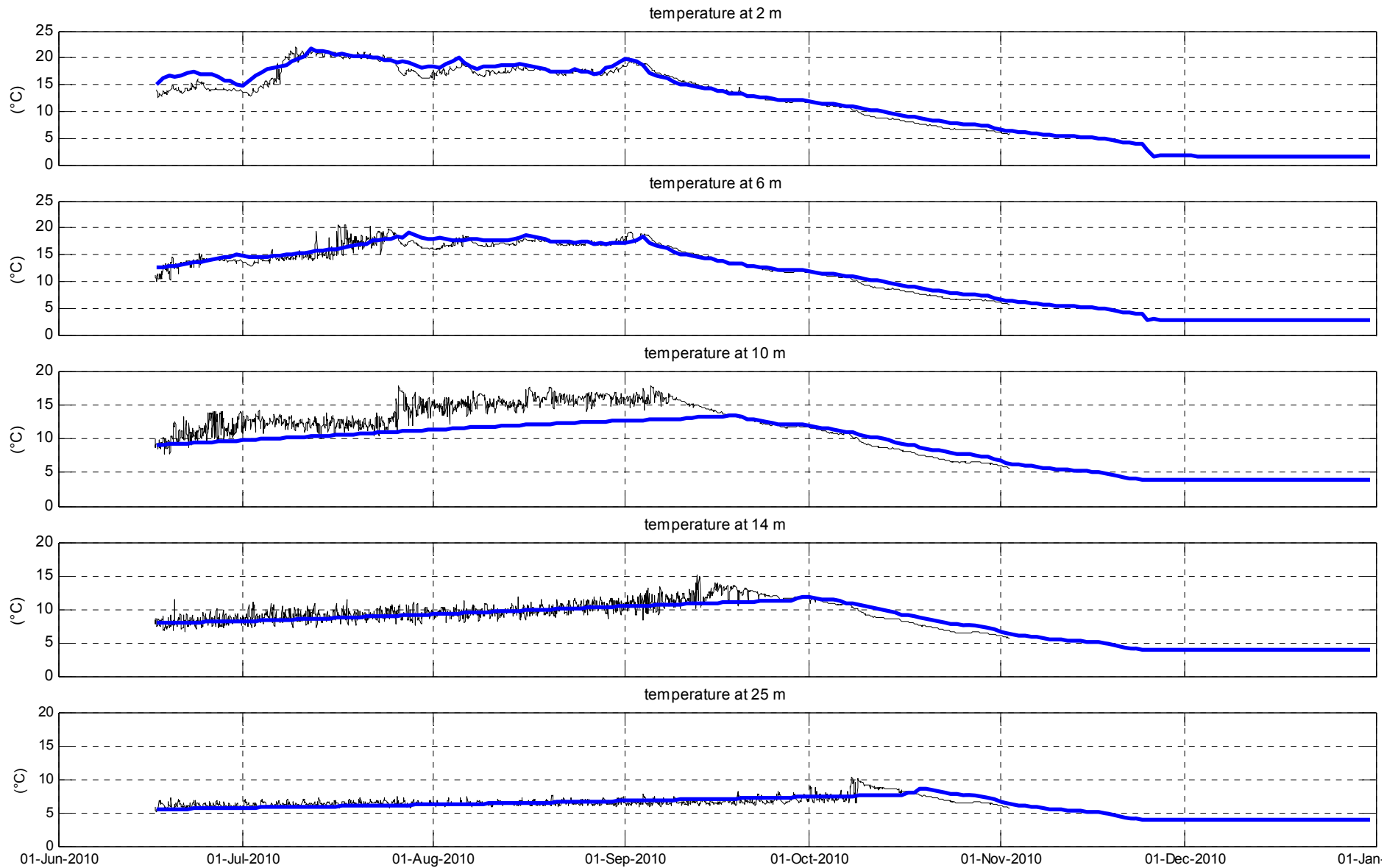


Figure 5.1 Comparaison entre températures observées (lignes noires) et températures modélisées (lignes bleues) à cinq profondeurs pour le lac Jacques-Cartier (JAC).

5.2 Modélisation des températures climatologiques futures : résultats pour diverses simulations climatiques et simulations choisies

Le cycle annuel de température future (horizon 2041-2070) pour le lac Jacques-Cartier (JAC) a été modélisé neuf fois utilisant les deltas de neuf simulations climatiques différentes, à savoir cinq simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1 (simulations afb, afc, afd, aet et aew), trois simulations pilotées par le modèle ECHAM5 (simulations agz, ahk et ahw), et une simulation pilotée par le modèle CNRM-CM3.3 (simulation ahb). Les résultats obtenus montrent des augmentations de température légèrement différentes d'une simulation à l'autre. Ceci est illustré par exemple par l'évolution de la température à 5 m, i.e. au cœur de l'épilimnion estival (figure 5.2.1) et par les profils de température moyens en période de température d'épilimnion maximum (1-10 août) (figure 5.2.2). Les augmentations de température maximum à 4 m varient de 1,82 à 2,86 °C. Celles à 48 m varient de 0,35 à 1,14 °C. Il en résulte des différences inter-simulation maximum de 1,04 °C pour l'épilimnion et de 0,79 °C en profondeur. Dans l'ensemble, les simulations pilotées par le modèle CGCM3.1 mènent à des augmentations de température légèrement plus élevées par rapport aux augmentations prédites via les autres simulations (Tableau 4). Le réchauffement davantage marqué produit par les simulations CGCM3.1 est aussi révélé par le contenu en chaleur maximum (voir section 5.4.1 pour le calcul du contenu en chaleur) : les cinq simulations CGCM3.1 correspondent aux cinq plus grands changements en contenu en chaleur maximum (par ordre décroissant, aet, afd, aew, afc, afb), suivi des simulations ECHAM5 (ahw, agz, ahk) et de la simulation pilotée par CNRM-CM3.3 (ahb).

Afin de maximiser la robustesse des prévisions, on a généralement eu recours à des deltas moyens obtenus des deltas de toutes les simulations pilotées par un même modèle global. C'est le cas pour les cycles annuels présentés aux sections 5.4 et 5.5 et à l'annexe A.5. Comme on peut le présumer à partir des résultats de chaque simulation, les températures futures modélisées à l'aide des deltas moyens CGCM3.1 sont légèrement plus grandes que celles obtenues des deltas moyens ECHAM5 (figures 5.2.3 et 5.2.4). Les températures futures pour la seule simulation CNRM-CM3.3 sont habituellement inférieures aux températures CGCM3.1 et ECHAM5, sauf pour l'épilimnion en été où elles dépassent les températures ECHAM5. Dans la partie supérieure de la colonne d'eau, les températures CNRM-CM3.3 dépassent les températures ECHAM5 peu après le 1^{er} juin et repassent sous les températures ECHAM5 peu après le 1^{er} septembre (figure 5.2.3). Ces deux dates coïncident avec le début et la fin de la période des deltas d'été. De par leur particularité, les températures CNRM-CM3.3 sont certainement intéressantes, mais on devra d'abord investiguer d'avantage la cause de cette différence estivale, i.e. s'assurer de la validité des deltas estivaux, avant de présenter ces résultats avec confiance. En plus des résultats obtenus des deltas moyens CGCM3.1 et ECHAM5, on a parfois considéré les résultats obtenus de la simulation aet (sections 5.3.1 et 5.3.2). Les températures aet peuvent être considérées comme étant la limite supérieure des températures futures modélisées.

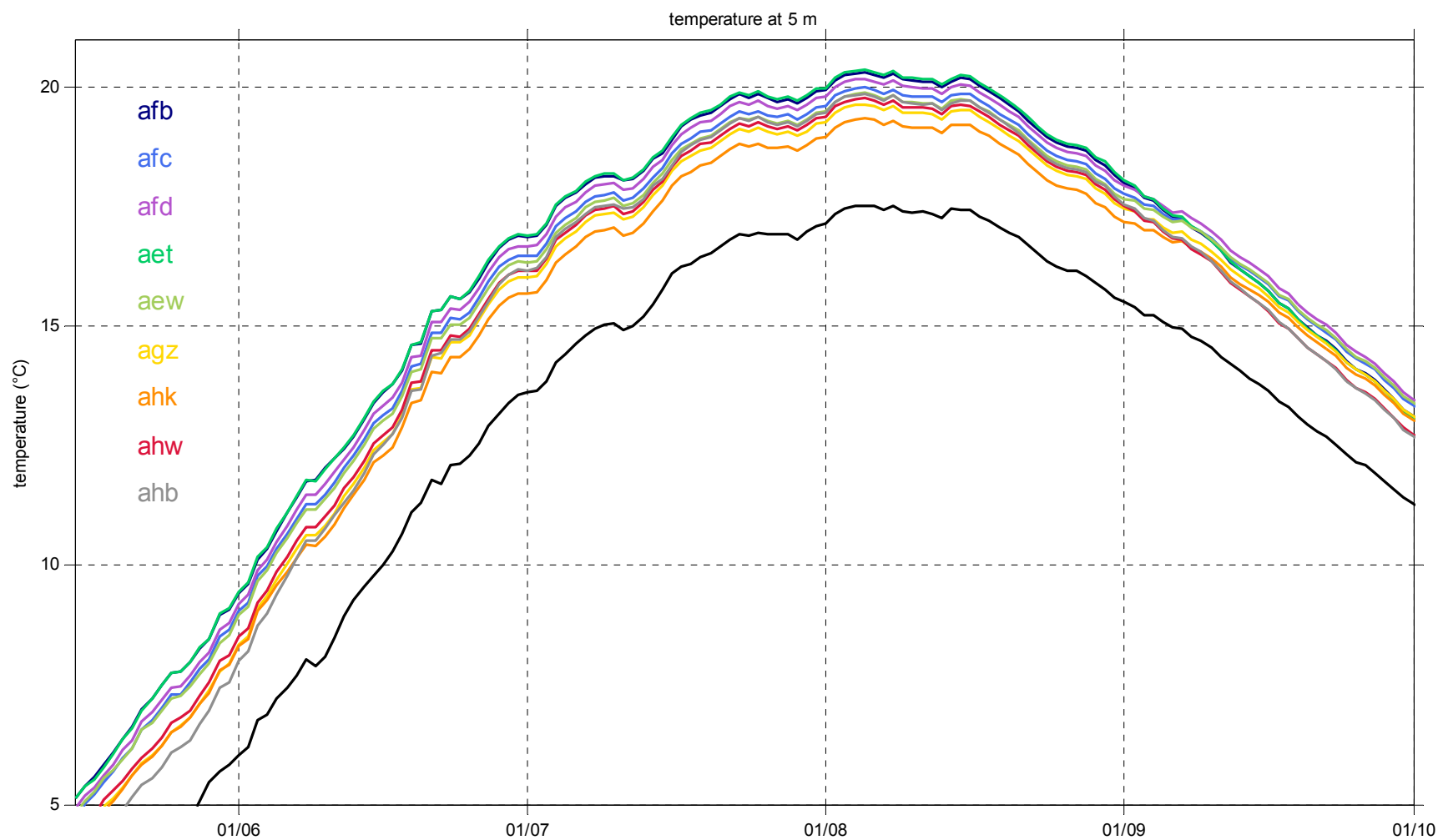


Figure 5.2.1 Évolution des températures futures 2040-2071 à 5 m entre mi-mai et fin septembre pour le lac Jacques-Cartier obtenues des résultats de neuf simulations climatiques (afb, afc, afd, aet, aew, agz, ahk, ahw et ahb). Évolution de la température passée en noir.

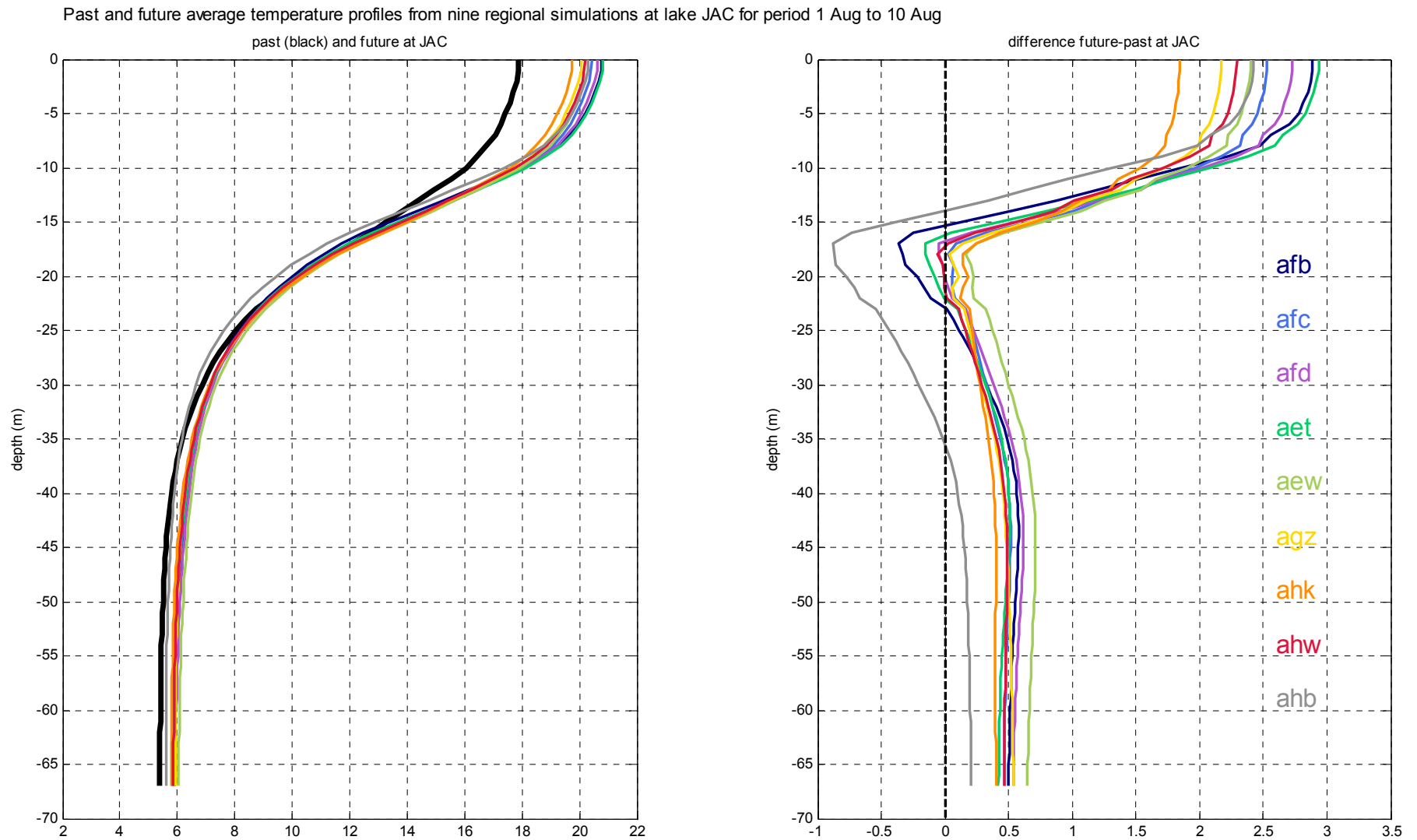


Figure 5.2.2 Profils de température passée (noir) et future 2040-2071 pour la première décade d'août pour le lac Jacques-Cartier obtenues des résultats de neuf simulations climatiques (afb, afc, afd, aet, aew, agz, ahk, ahw et ahb) et différences « futur-passé ».

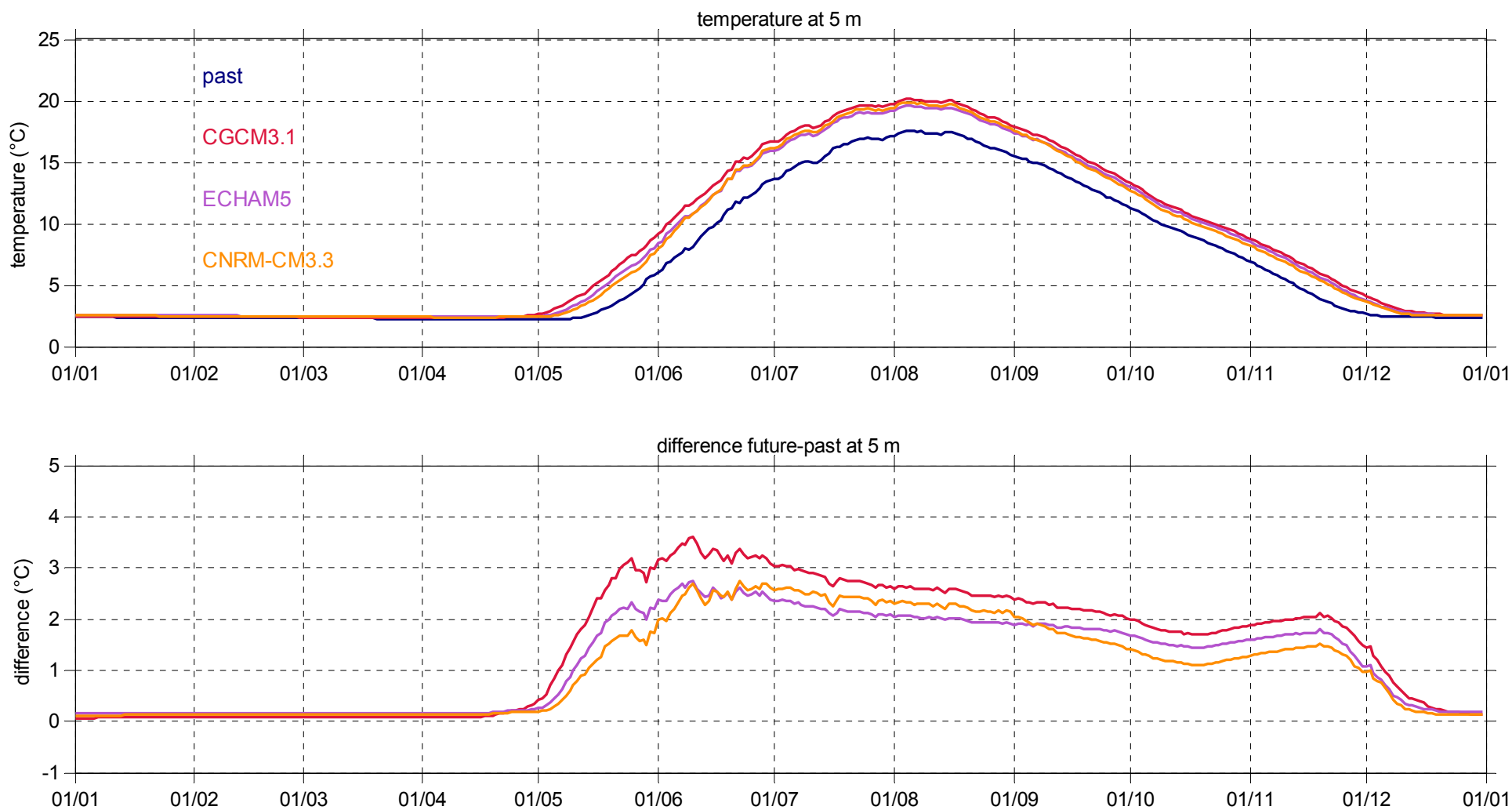


Figure 5.2.3 Cycle annuel des températures passée et future 2040-2071 à 5 m pour le lac Jacques-Cartier et différences « futur-passé ». Les températures futures sont obtenues des deltas moyens pour les simulations pilotées par les modèles globaux CGCM3.1, ECHAM5 et CNRM-CM3.3.

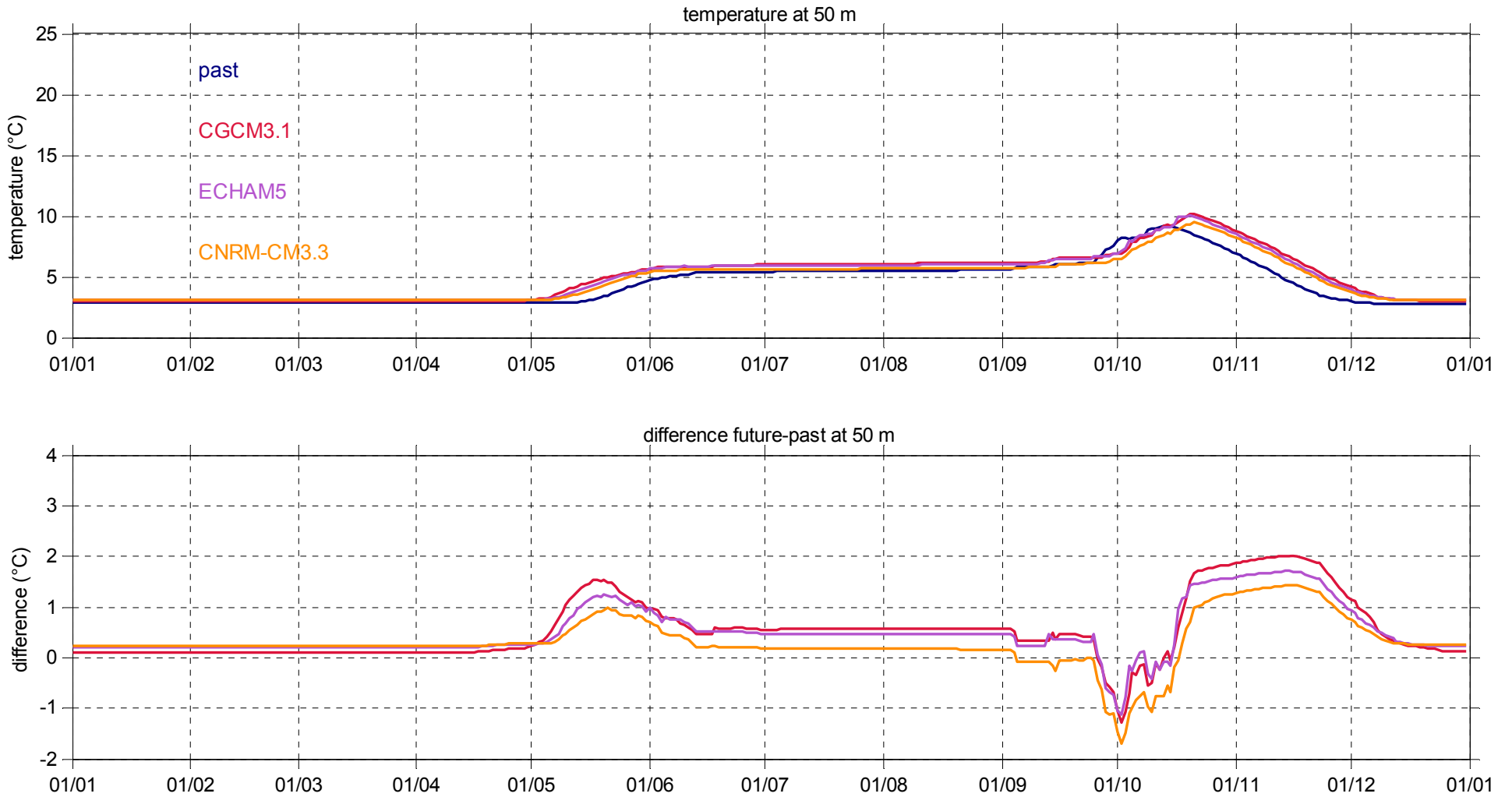


Figure 5.2.4 Cycle annuel des températures passée et future 2040-2071 à 50 m pour le lac Jacques-Cartier et différences « futur-passé ». Les températures futures sont obtenues des deltas moyens des simulations pilotées par les modèles globaux CGCM3.1, ECHAM5 et CNRM-CM3.3.

Tableau 4 Comparaison des résultats obtenus de neuf simulations pour le lac Jacques-Cartier, i.e. cinq simulations pilotées par le modèle CGCM3.1, trois simulations pilotées par le modèle ECHAM5, et une simulation pilotée par le modèle CNRM-CM3.3. Températures maximum à cinq profondeurs arbitrairement choisies, moyenne des températures maximum à ces cinq profondeurs, contenu en chaleur maximum, et température moyenne sur toute la colonne d'eau aux environs du maximum de contenu en chaleur. Températures et contenu en chaleur sont surlignés en vert pour la simulation aet, en orange pour la simulation agz. On donne aussi l'ordre décroissant des changements climatiques projetés (deltas) à la position du lac Jacques-Cartier pour deux indicateurs, i.e. la température estivale maximum et le nombre de degrés-jours en été.

	4 m		8 m		16 m		24 m		48 m	
	T max	sim.	T max	sim.	T max	sim.	T max	sim.	T max	sim.
1	20,57	aet	19,61	aet	16,12	afd	13,77	afc	10,43	afc
2	20,52	afb	19,48	afb	16,06	aew	13,74	aew	10,37	aew
3	20,38	afd	19,48	afd	16,04	afc	13,60	ahk	10,26	ahk
4	20,19	afc	19,33	afc	16,01	aet	13,55	agz	10,25	afd
5	20,06	aew	19,22	aew	15,88	agz	13,55	aet	10,24	aet
6	20,06	ahb	19,10	ahw	15,87	afb	13,53	afd	10,18	afb
7	19,95	ahw	19,03	agz	15,83	ahk	13,44	afb	10,15	agz
8	19,84	agz	19,03	ahb	15,79	ahw	13,38	ahw	10,04	ahw
9	19,53	ahk	18,76	ahk	15,44	ahb	12,93	ahb	9,64	ahb
10	17,71	past	17,08	past	14,75	past	12,54	past	9,30	past
	moy. cinq profondeurs		chaleur (GJ)		T moy. à chaleur max (18 août)		delta		delta	
	moy. T max	sim.	max chaleur	sim.	T moy.	sim.	max. T été	deg.-jours été		
1	16,00	aet	1,6019E+07	aet	10,07	aew	aet	aet		
2	15,95	afd	1,6014E+07	afd	10,02	afd	afb	afd		
3	15,95	afc	1,5995E+07	aew	9,96	aet	afd	afb		
4	15,90	afb	1,5939E+07	afc	9,95	afc	aew	afc		
5	15,89	aew	1,5915E+07	afb	9,93	afb	ahw	aew		
6	15,69	agz	1,5786E+07	ahw	9,89	agz	afc	ahw		
7	15,66	ahw	1,5782E+07	agz	9,88	ahw	ahb	ahb		
8	15,60	ahk	1,5648E+07	ahk	9,80	ahk	agz	agz		
9	15,42	ahb	1,5352E+07	ahb	9,49	ahb	ahk	ahk		
10	14,27	past	1,4586E+07	past	9,20	past				
	Pilote CGCM3.1		Pilote ECHAM5		Pilote CNRM-CM3.3					

5.3 Conditions climatologiques futures aux lacs réels

5.3.1 Horizon 2041-2070

Les cycles annuels de températures climatologiques passées et futures pour le lac Jacques-Cartier montrent que les augmentations de température à venir sont nettement plus marquées dans la partie supérieure de la colonne d'eau, c'est-à-dire de la surface jusqu'à 10 m environ, et le changement maximum survient tôt en été dû à un début de réchauffement plus hâtif (figure 5.3.1). En surface, les différences « futur-passé » maximums sont de 4,62 °C pour le futur aet, 4,33 °C pour le futur CGCM3.1, et 3,22 °C pour le futur ECHAM5. Après le maximum atteint, les différences de température pour l'épilimnion diminuent lentement jusqu'à un léger accroissement en novembre associé au retard du refroidissement automnal (figure 5.2.3).

Pour l'hypolimnion, les changements à venir résultent en grande partie de l'avance du mélange printanier et du retard du mélange automnal (figure 5.3.1). L'exportation de chaleur depuis la surface vers les profondeurs arrivant plus tôt au printemps, il en résulte un maximum local de différence « futur-passé ». Après cette période de mélange, les températures futures en profondeur sont encore légèrement supérieures aux températures passées, suggérant un accroissement de la quantité de chaleur exportée depuis surface. À 50 m par exemple, les différences « futur-passé » au 1^{er} août sont de 0,58 °C pour le futur CGCM3.1, et de 0,47 °C pour le futur ECHAM5 (figure 5.2.4). L'exportation de chaleur depuis la surface vers les profondeurs arrivant plus tard à l'automne, il en résulte aussi un maximum local de différence « futur-passé ». Cependant, comme la quantité de chaleur exportée est alors plus grande, ce maximum est précédé par une période de différences négatives ($T_{\text{futur}} < T_{\text{passé}}$) du fait du refroidissement en surface, et donc de la période de mélange (ou exportation de chaleur depuis la surface vers le fond), survenant plus tôt dans le passé. Sous 50 m, ces différences négatives peuvent alors être nettement marquées (jusqu'à -1,47 °C pour le futur aet).

Des différences négatives sont aussi prédites plus tôt dans la saison et plus haut dans la colonne d'eau (figure 5.3.1). Ces différences peuvent être attribuées à une réduction de l'intensité du mélange en été en raison d'un gradient de densité plus prononcé à la thermocline. La figure 5.3.2 donne un exemple de développement de différences négatives autour de 20 m (partie inférieure de la thermocline) sur une période de cinq jours dans la deuxième moitié d'août. Le gradient vertical de température (de densité) entre 10 m et 20 m est plus prononcé dans le futur et l'accroissement de température sur cinq jours (transfert de chaleur depuis la partie supérieure de la colonne d'eau) est faible comparativement à l'accroissement passé. Dans ce cas, le refroidissement en surface vient tout juste de débuter (figure 5.2.3) et une partie de cette différence négative pourrait être expliquée par le fait que le mélange induit par refroidissement à ce temps de l'année est vraisemblablement un peu moins rapide dans le futur que dans le passé (i.e. forcing plus faible en plus de stabilité accrue).

Les écarts-types donnent une indication du temps de l'année et de l'endroit dans la colonne d'eau où les variations de température interannuelles sont les plus grandes. Ces variations reflètent la variabilité interannuelle des données météorologiques NARR utilisées pour forcer le modèle. Les grandes variabilités interannuelles surviennent en début d'été (mi-mai à mi-juillet) près de la surface et à l'automne sous 20 m (figure 5.3.3). En été, la variabilité en profondeur est relativement faible par rapport à ces maximums (bien que plus élevée qu'en hiver) et est légèrement plus prononcée en climat futur qu'en climat passé (avec différence « futur-passé » augmentant avec la profondeur). On peut supposer que cette variabilité accrue en climat futur

résulte d'une plus grande variabilité de la quantité de chaleur exportée vers le fond en début de réchauffement. Par après, l'instauration d'une thermocline marquée peut pratiquement inhiber le mélange et fortement limiter l'augmentation de température en profondeur. Ceci est supporté par la faible augmentation de température ($\sim 0,3$ °C) à 50 m entre le 15 juin et le 1^{er} septembre (figure 5.2.4). La zone de grande variabilité associée au mélange automnal est légèrement retardée en climat futur, résultant en de grandes différences « futur-passé » d'écart-type, i.e. fortement négatives et positives de chaque côté d'une période où les variations interannuelles sont pratiquement semblables.

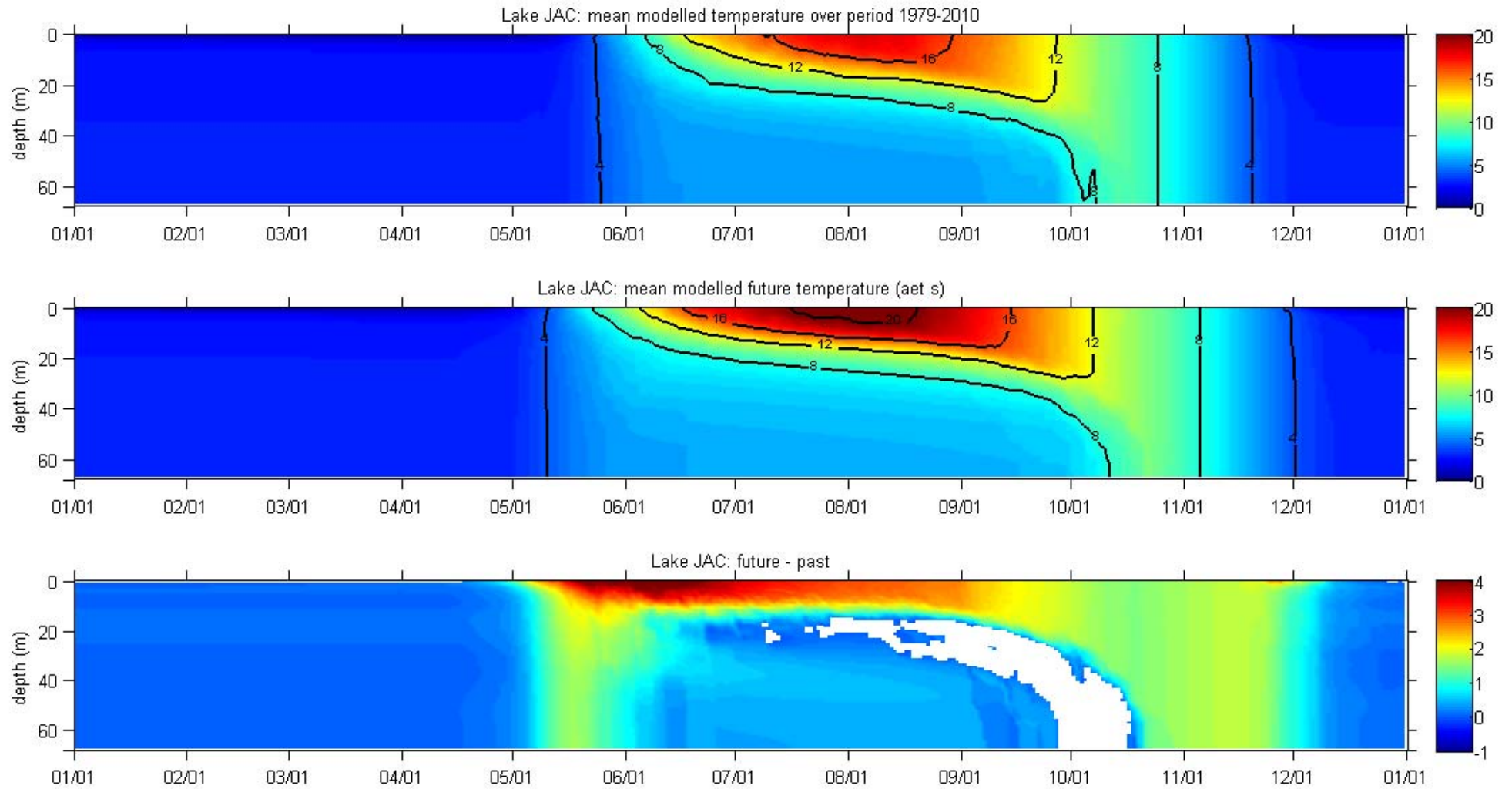


Figure 5.3.1 Cycle annuel des températures passées et futures 2040-2071 pour le lac Jacques-Cartier et différences « futur-passé ». Les températures futures sont obtenues de la simulation climatique aet. Les différences négatives ont été blanchies.

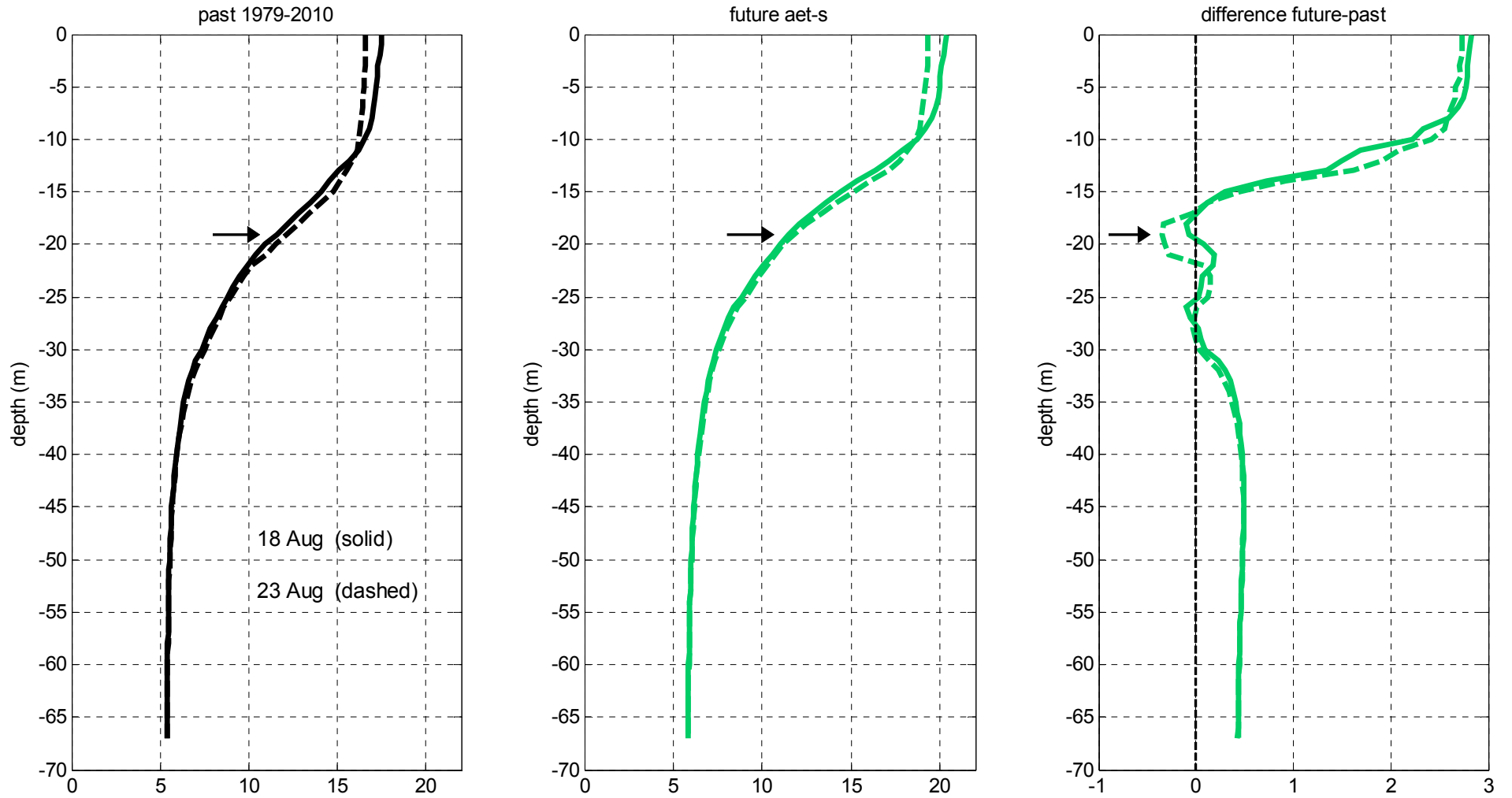


Figure 5.3.2 Exemple de développement de différences « futur-passé » négatives dans la partie inférieure de la thermocline. Lac Jacques-Cartier, profils de température passée et future (2041-2070) et différence « futur-passé » le 18 août (lignes continues) et le 23 août (lignes pointillées).

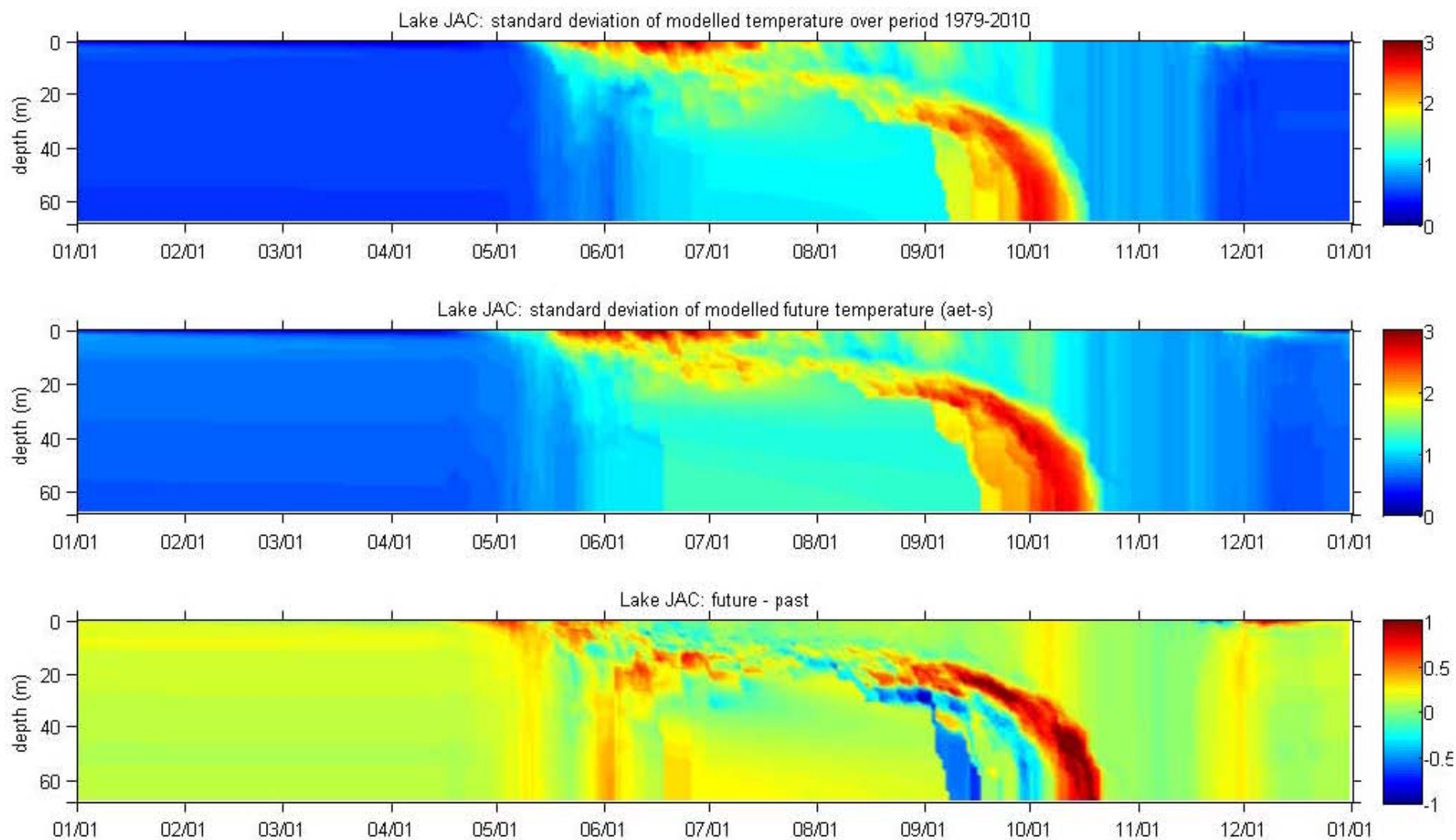


Figure 5.3.3 Évolution de l'écart-type sur un cycle annuel pour les températures passées et futures 2040-2071 pour le lac Jacques-Cartier et différences « futur-passé ». Les températures futures sont obtenues de la simulation climatique aet.

5.3.2 Horizon 2071-2100

Le cycle annuel moyen des températures journalières futures peut aussi être modélisé pour un horizon plus éloigné, à savoir pour la période 2071-2100. Ceci a été fait pour une seule simulation (aet, deltas saisonniers). Notons que de toutes les simulations considérées, la simulation aet pilotée par le modèle CGCM3.1 est celle qui produit le réchauffement le plus marqué (voir section 5.2). Les changements estimés via cette simulation peuvent donc, dans le contexte de la présente étude, être considérés comme limite supérieure des changements à venir. Les résultats pour l'horizon 2071-2100 laissent entrevoir des changements de température encore plus marqués pour la fin du XXI^{ème} siècle (figure 5.3.4). Par exemple, l'accroissement de la température de surface entre les horizons 2041-2070 et 2071-2100 varie entre 1,3 et 2,3 °C pour la période mi-mai à fin octobre. La différence « futur-passé » maximum survenant au début juin passerait de 4,2 à 6,5 °C. Par rapport au passé de référence, la période estivale comprise entre l'occurrence des profils printanier et automnal de 4 °C est rallongée de 26 jours pour l'horizon 2041-2070 et de 46 jours pour l'horizon 2071-2100.

Saloranta et al. (2009) ont estimé les températures futures à l'horizon 2071-2100 pour un lac finlandais ayant une superficie et une profondeur maximum proches de celles du lac Jacques-Cartier. Leurs résultats prédisent une augmentation des températures de l'épilimnion variant entre 3 et 7 °C pour les mois d'été, et l'occurrence des plus grandes différences en début d'été. Bien que nos résultats pour le lac Jacques-Cartier prédisent une augmentation maximum un peu inférieure (6,5 °C), peut-être explicable par la différence géographique, nos résultats semblent en accord tant pour la magnitude des changements de température que pour le timing des différences maximums (figure 5.3.5). À 5 m, la différence « futur-passé » est supérieure ou égale à 3 °C pour pratiquement sept mois consécutifs. Pour l'hypolimnion, les températures prédites sont aussi plus élevées (+1 °C en été à 50 m), sauf pour un intervalle d'une vingtaine de jours explicable par le retard de la redistribution thermique automnale (figure 5.3.6). On note la différence « futur-passé » plus grande en automne pour l'horizon 2071-2100 que pour l'horizon 2041-2070 (explicable par la plus grande chaleur préalablement emmagasinée dans la partie supérieure de la colonne d'eau) mais que la température maximum atteinte à 50 m est quand même pratiquement similaire.

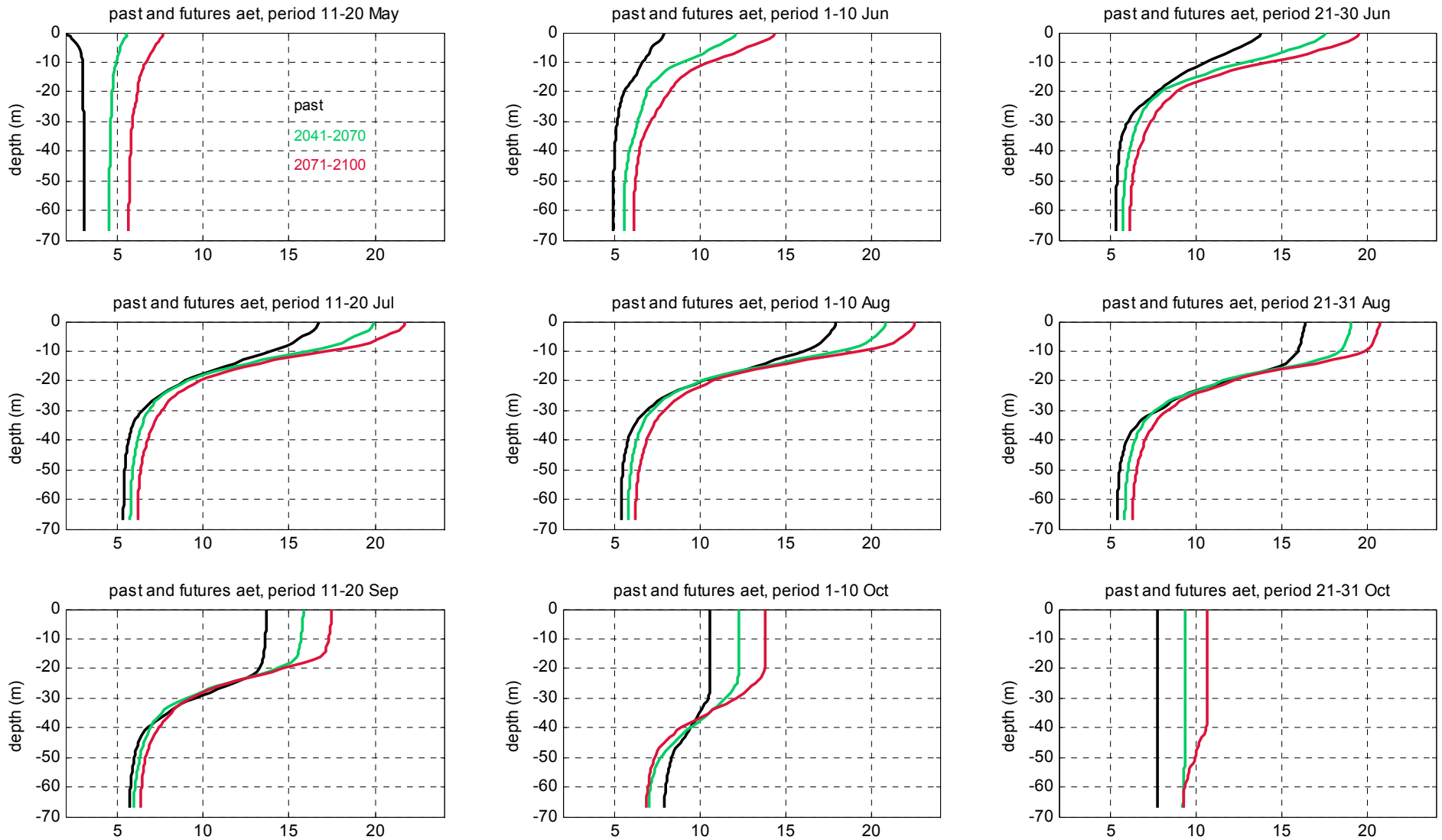


Figure 5.3.4 Profils de température passée, future 2041-2070 et future 2071-2100 pour le lac Jacques-Cartier pour neuf décades entre mi-mai et fin octobre. Les températures futures 2041-2070 et 2071-2100 sont obtenues de la simulation climatique aet.

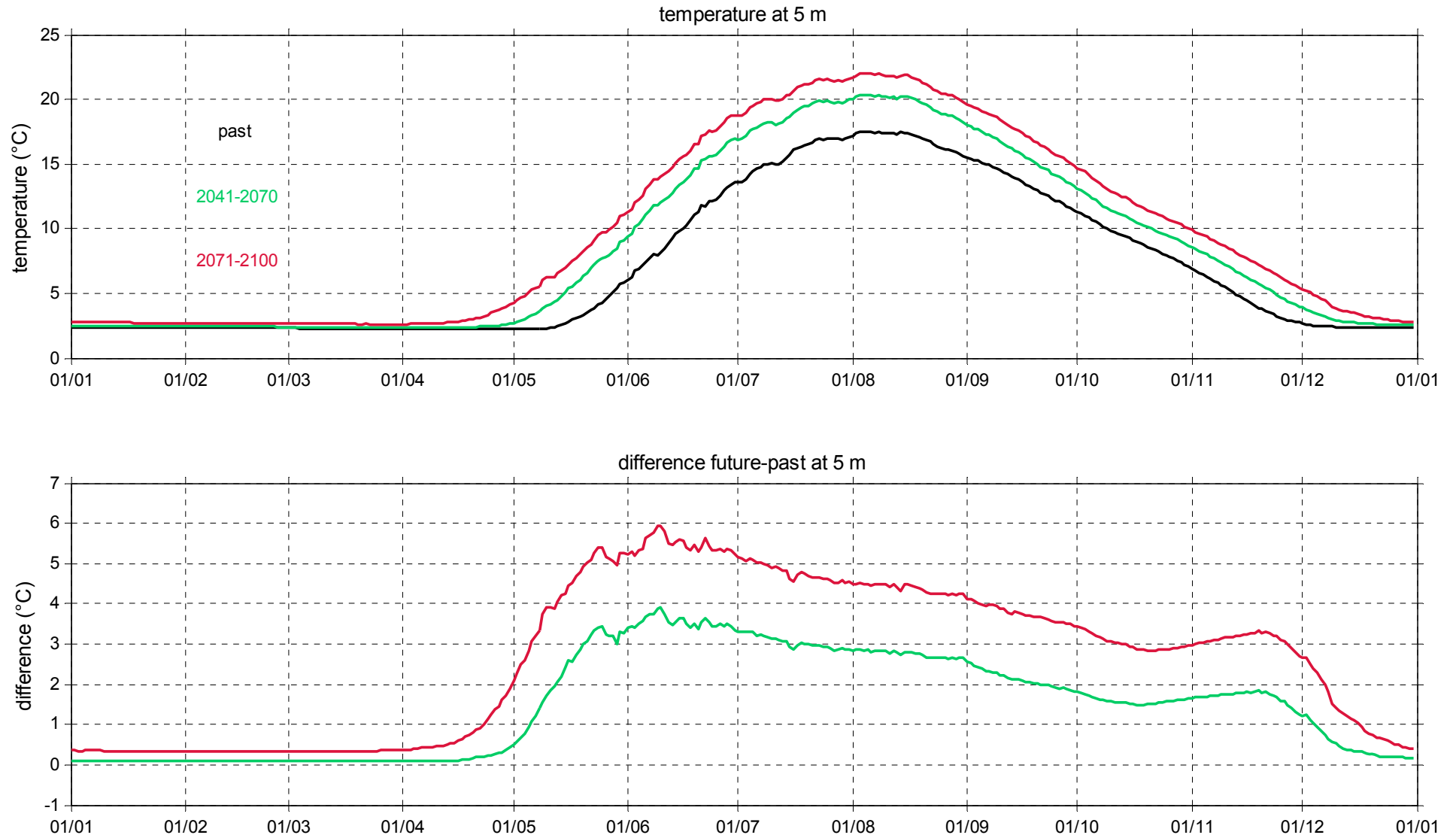


Figure 5.3.5 Cycle annuel des températures passée, future 2040-2071 et future 2071-2100 à 5 m pour le lac Jacques-Cartier et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 et 2071-2100 sont obtenues de la simulation climatique aet.

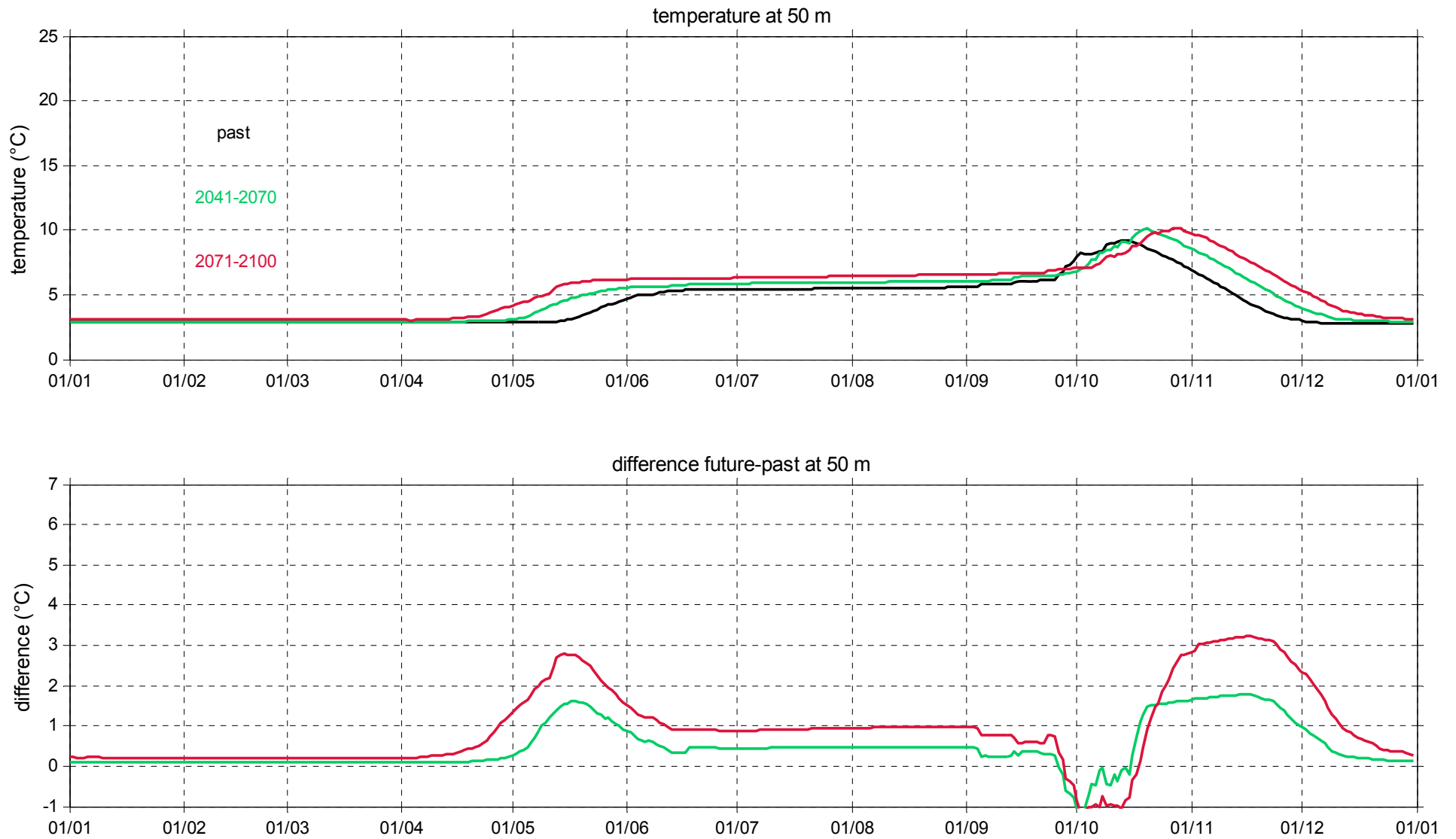


Figure 5.3.6 Cycle annuel des températures passée, future 2040-2071 et future 2071-2100 à 50 m pour le lac Jacques-Cartier et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 et 2071-2100 sont obtenues de la simulation climatique aet.

5.4 Variations nord-sud des conditions climatologiques futures pour un lac typique

Les sous-sections ci-dessous présentent différentes variations nord-sud passées et futures (2041-2070) pour le lac Jacques-Cartier (JAC) lorsque placé à huit latitudes le long du méridien 071 °O (figure 2.1). Les variations futures présentées ont été réalisées à partir des deltas saisonniers CGCM3.1 (une moyenne des deltas des cinq simulations CGCM3.1).

5.4.1 Cycle annuel du contenu en chaleur

Le contenu en chaleur par rapport à 0 °C est calculé à l'aide des températures modélisées et de la chaleur spécifique de l'eau. Bien que la chaleur spécifique de l'eau varie avec la température et la densité (pression), elle varie très faiblement et il est raisonnable dans le présent contexte d'utiliser une valeur constante. Nous avons utilisé la chaleur spécifique de l'eau à 6 °C (4,2 kJ / kg °K).

Les cycles annuels de contenu en chaleur montrent que le maximum de chaleur survient entre le 16/08 (HL7) et le 01/09 (HL1) et que l'occurrence du maximum devrait peu changer à l'horizon 2041-2070 (de 3 à 9 jours plus tard aux positions les plus au nord, de 4 à 6 jours plus tôt à HL4 et HL5, et aucun changement aux positions les plus au sud) (figure 5.4.1). L'augmentation du contenu en chaleur aux environs du maximum est entre 8,5 et 12,0 % (figure 5.4.2). On remarque deux périodes où l'accroissement en chaleur devrait être relativement marqué, c'est-à-dire au printemps et à l'automne, ces périodes survenant avec un délai variant du nord au sud. L'accroissement maximum au printemps est plus grand aux extrémités nord et sud qu'aux latitudes centrales (+51.1 % à HL1 et +59.7 % à HL8, et +31.6 % à HL5). L'accroissement maximum à l'automne varie moins avec la latitude (de 38,0 à 49,3 %) mais est également plus prononcé aux extrémités nord et sud. Pour le maximum du printemps (de l'automne), la propagation vers le nord (vers le sud) du maximum apparaît moins rapide autour des latitudes HL2 à HL5 (figure 5.4.3).

5.4.2 Occurrence des profils uniformes à 4 °C

Pour les lacs dimictiques, l'occurrence des profils uniformes à 4 °C peut être considérée comme délimitant les saisons hivernale et estivale. Pour le futur CGCM3.1 2041-2070, le profil à 4 °C du printemps survient de 9 à 17 jours plus tôt que pour le passé récent, les avances les plus courtes étant aux latitudes HL2 à HL5 (figures 5.4.4 et 5.4.5). Le profil à 4 °C de l'automne survient de 12 à 16 jours plus tard, les plus grands délais étant aux latitudes HL1 et HL8. Combinant les changements au printemps et à l'automne, la période avec des températures supérieures à 4 °C devrait s'allonger de 21 à 33 jours, les changements les plus marqués étant aux extrémités nord et sud de la gamme de latitudes considérée.

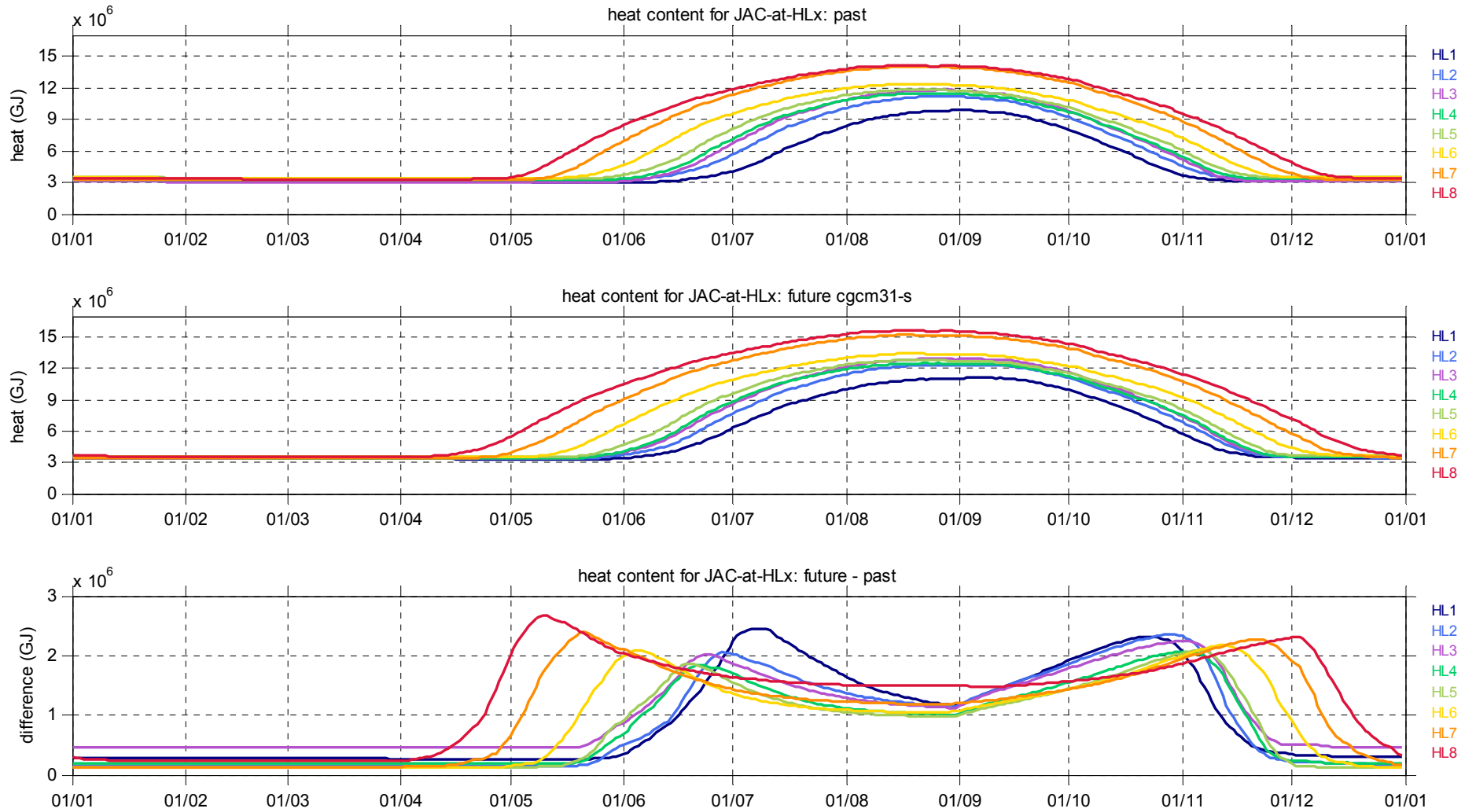


Figure 5.4.1 Cycle annuel de contenu en chaleur passé et futur 2040-2071 pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes, et différences « futur-passé ». Les contenus en chaleur futurs sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

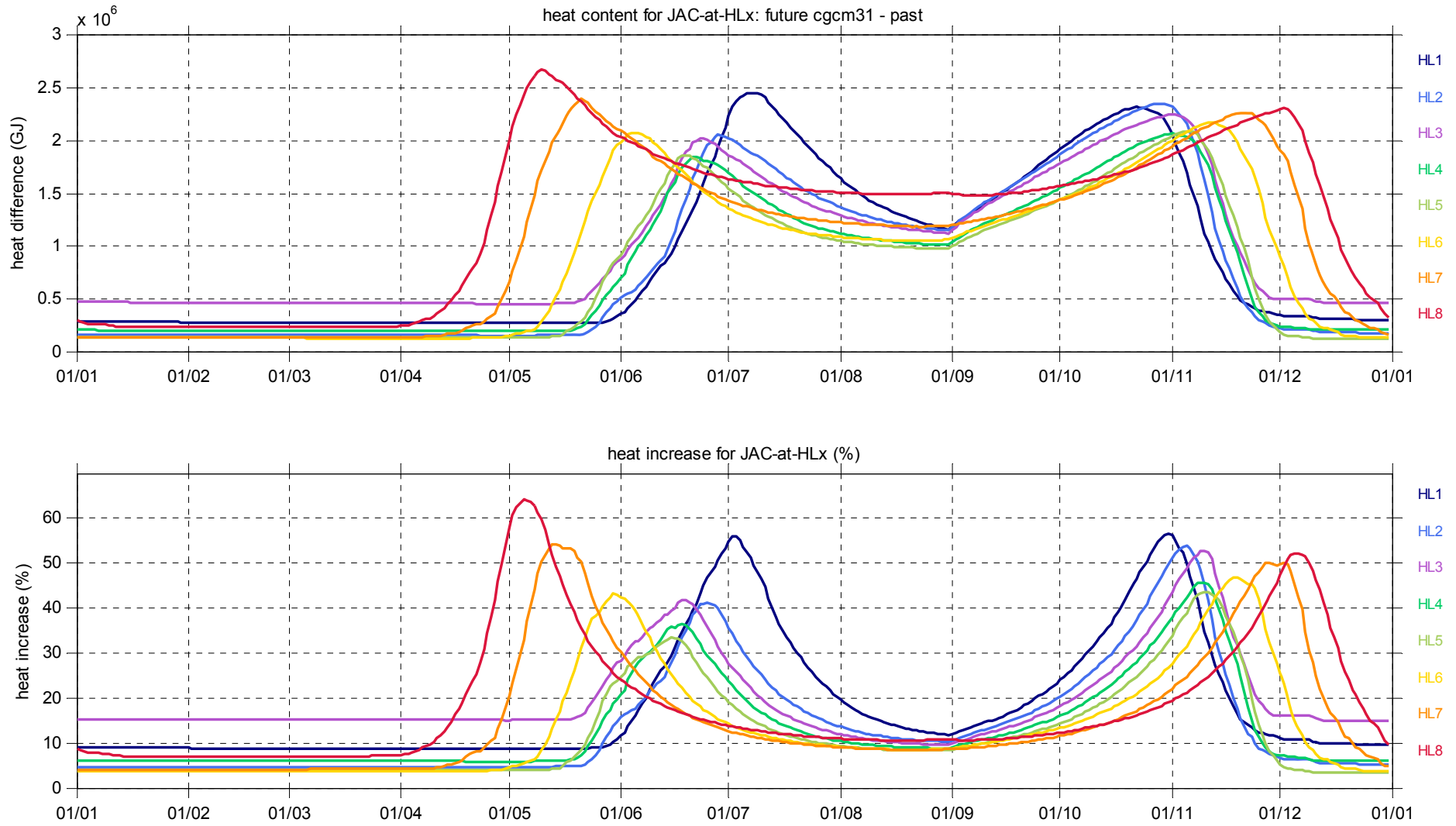


Figure 5.4.2 Cycle annuel des différences de contenu en chaleur « futur-passé » pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes. Différences exprimées en GJ et en pourcentage d'augmentation. Les contenus en chaleur futurs 2041-2070 sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

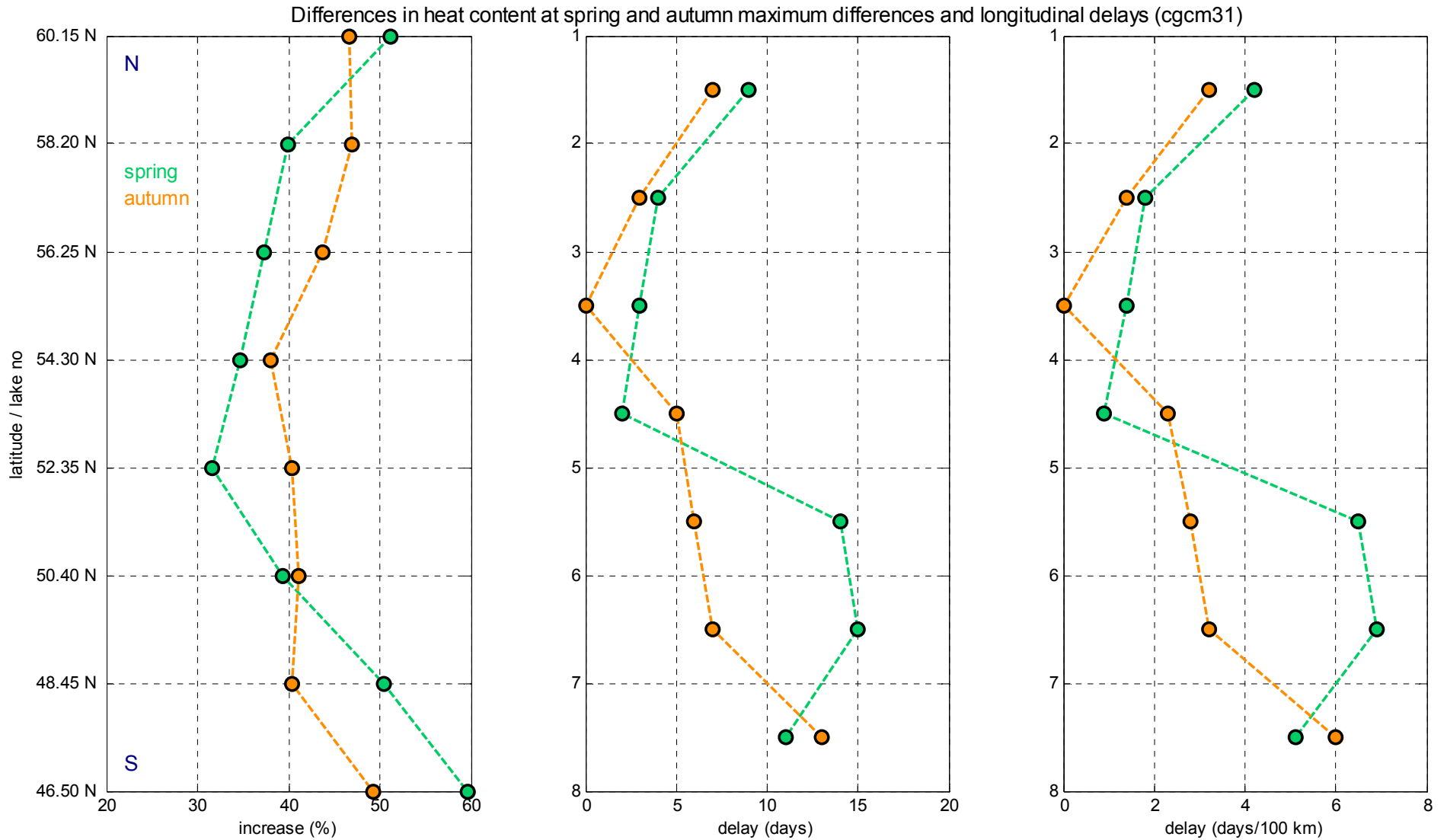


Figure 5.4.3 Différence « futur-passé » de contenu en chaleur (exprimée en pourcentage) aux différences maximums printanière et automnale pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes, et délais entre l'occurrence des différences maximums printanière et automnale à deux latitudes voisines. La différence maximum au printemps progresse du sud au nord, et la différence maximum à l'automne progresse du nord au sud. Les contenus en chaleur futurs sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

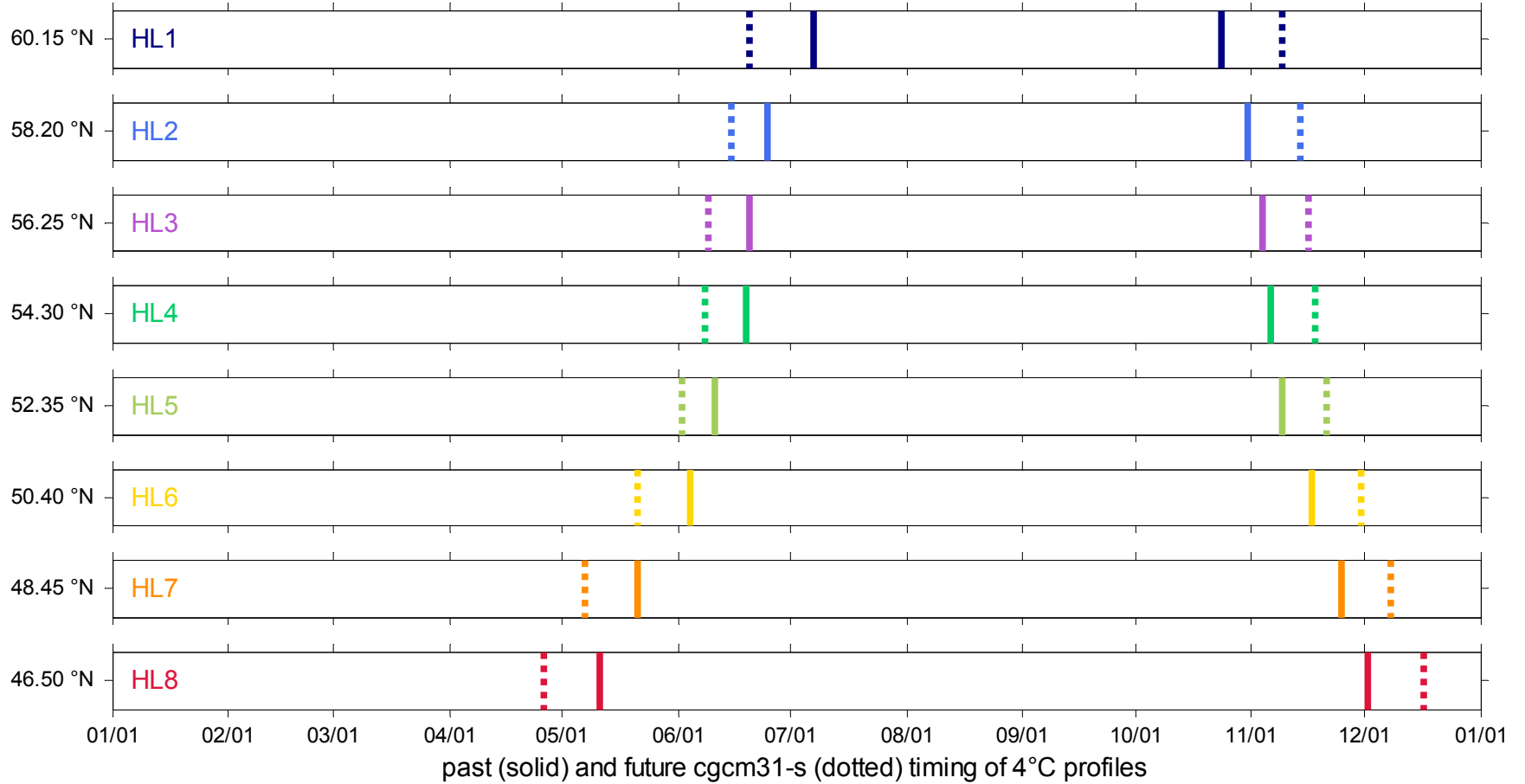


Figure 5.4.4 Figure 6.4 Occurrence passée (lignes continues) et future (lignes pointillées) des profils de température uniformes de 4 °C pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsqu'il est placé à huit latitudes. Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

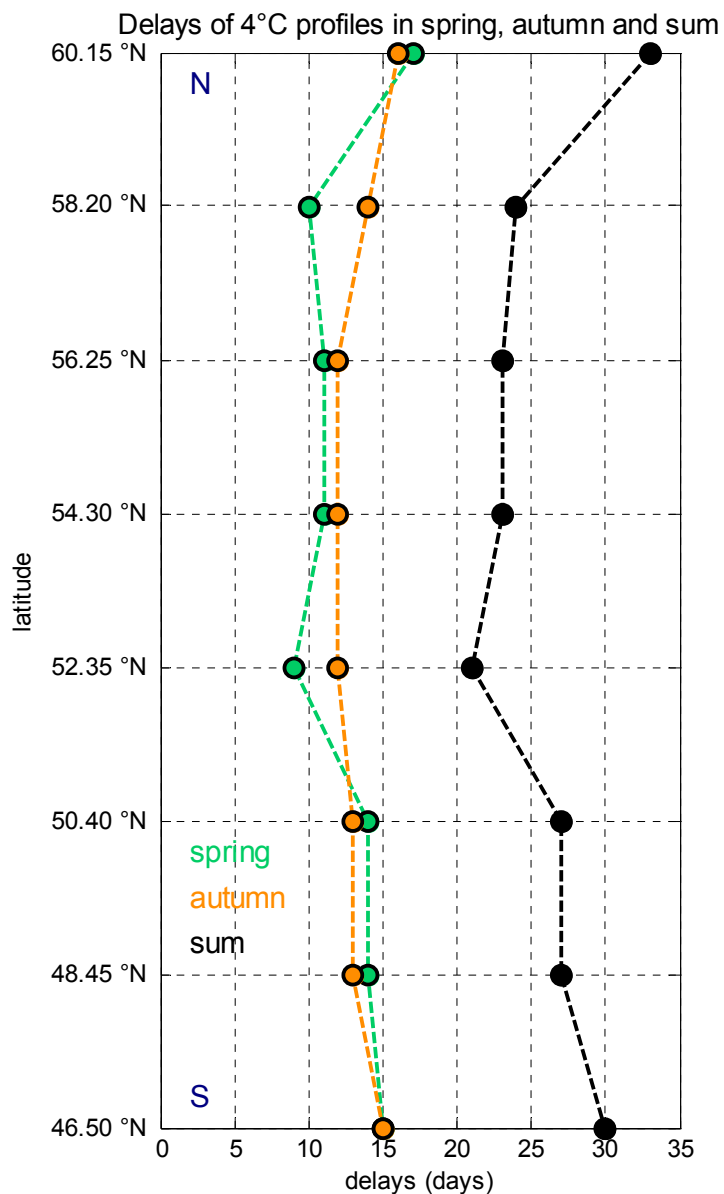


Figure 5.4.5 Délais entre les occurrences passée et future des profils de température uniformes de 4 °C pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes, et somme de l'avancée au printemps et du retard à l'automne. Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

5.4.3 Cycle annuel du couvert de glace

Les couvertures de glace modélisées ne furent pas comparées à des observations et doivent être considérées avec précaution. Cependant, nos séries temporelles d'épaisseur de glace ressemblent à celles présentées par Dibike et al. (2011a) (pour un lac hypothétique de 20 m de profondeur) et, pour le futur 2041-2070 CGCM3.1, montrent une différence « futur-passé » maximum survenant approximativement un mois avant la disparition de la glace (figure 5.4.6). La diminution de l'épaisseur de glace maximum varie de 0,06 m (HL3) à 0,14 m (HL8), les plus faibles diminutions survenant vers le centre de la gamme de latitudes considérée, en accord avec Dibike et al. (2011). Les maximums d'épaisseur de glace futurs surviennent de 5 à 12 jours plus tôt (figure 5.4.7). Le début du couvert de glace survient de 5 à 13 jours plus tard, le délai le plus marqué étant aux environs de la latitude HL7, toujours en accord avec Dibike et al. (2011). La fin du couvert de glace survient de 6 à 15 jours plus tôt. La période sans couvert de glace (d'albédo moins élevé) devrait s'allonger en moyenne de 19,5 jours, le changement le plus grand survenant à la position la plus nordique HL1 (25 jours) et les plus petits changements aux positions voisines HL2 et HL3 (14 et 11 jours).

5.4.4 Cycle annuel de température

L'évolution des profils de température passé et future entre mi-mai et mi-novembre, i.e. couvrant la période « d'été limnologique » entre les profils uniformes de 4 °C, est présentée à l'annexe A.6. On y voit que les différences « futur-passé » les plus grandes (~ 4 °C) surviennent en surface en début de réchauffement et que l'occurrence de ce maximum progresse du sud au nord entre la mi-mai et la mi-juillet. En période de réchauffement maximum, l'augmentation de température en profondeur est nettement plus marquée à la latitude la plus au sud (HL8).

Plumb et Blanchfield (2009) présentent deux gammes de limites théoriques de température pour l'habitat du touladi, une gamme étroite (8-12 °C) et une gamme large (5-15 °C). La figure 5.4.8 donne une idée de l'augmentation des conditions de température dépassant la limite supérieure de 12 °C via le nombre de m³-jours avec température au-delà de cette limite. Le nombre de m³-jours au-dessus de 12 °C augmente bien sûr du nord au sud. Les augmentations à venir exprimées en pourcentage sont substantielles (toujours > 26 %) et augmentent du sud au nord. Elles sont très grandes pour les lacs les plus au nord pour lesquels les températures au-dessus de cette limite étaient pratiquement absentes alors qu'elles apparaîtront ou deviendront plus fréquentes dans le futur. Lorsque calculés pour le futur ECHAM5, les changements de m³-jours exprimés en pourcentage sont généralement un peu moindres (écart de pourcentage entre 5,5 et 8,0 pour les latitudes HL3 à HL8) mais le changement à la latitude HL7 est singulièrement plus grand (écart de pourcentage de 11,9) et de direction opposée (figure 5.4.9).

Les cycles annuels passé et futur avec blanchiment des zones avec température supérieure aux limites de Plumb et Blanchfield (2009) et nombre de m³-jours au-dessus des limites sont présentés à l'annexe A.7. À une exception près, les augmentations de m³-jours exprimées en pourcentage augmentent toujours avec le seuil de température considéré. L'accroissement de l'augmentation en allant du sud au nord est beaucoup moins net pour un seuil de 5 °C. Pour ce seuil, la température sur toute la colonne d'eau est supérieure à la température seuil pour de longues périodes (passé et futur). Ce n'est généralement pas le cas pour un seuil de 8 °C mais il est intéressant de noter que les changements à venir devraient entraîner des températures > 8

°C sur toute la colonne d'eau à une certaine période de l'année à certaines latitudes, i.e. suite au mélange automnal et aux latitudes les plus élevées de la gamme considérée (plus spécialement HL2 et HL3). Qu'une telle température seuil soit dépassée en profondeur en automne et aux latitudes élevées peut en effet sembler contre-intuitif. Dans un tel cas, un organisme peu tolérant aux températures supérieures à 8 °C devrait forcément affronter des conditions défavorables pendant au moins une quinzaine de jours. Ceci est également visible via le cycle annuel du volume d'eau avec température au-dessus des mêmes seuils (annexe A.8). On y voit que ce volume augmente rapidement lorsque la température seuil est atteinte, puis le taux d'augmentation diminue, et finalement le volume avec température > seuil redevient abruptement nul à l'automne. Il y a deux périodes de l'année où les différences « futur-passé » sont nettement plus marquées, i.e. principalement à l'automne, et puis d'une manière un peu moins prononcée en début du réchauffement (avec différences décroissantes avec l'augmentation de la température seuil).

Les figures 5.4.10 et 5.4.11 donnent les variations à venir pour le nombre de m³-jours entre les températures limites de Plumb et Blanchfield (2009) (respectivement gamme étroite et gamme large). Remarquons qu'on peut s'attendre à plus de m³-jours au-dessus des limites inférieures et supérieures, et il est donc difficile de prévoir à priori comment évoluera le nombre de m³-jours pour les températures comprises entre ces limites. Le modèle prédit une augmentation du nombre de m³-jours pour les conditions optimales, et donc une domination du volume dépassant la limite inférieure par rapport au volume dépassant la limite supérieure, et ce même si les températures dépassant la limite supérieure sont près de la surface et que les volumes des couches près de la surface sont plus grands que ceux des couches profondes. Pour la gamme étroite, les variations exprimées en pourcentage varient entre 13,9 et 22,7 % pour les latitudes HL2 à HL8 (+18,4 % en moyenne) mais le changement est beaucoup plus marqué pour le lac le plus au nord (HL1, +69,0 %). Pour la gamme large, les variations sont légèrement moins prononcées (+15,7 % pour les lacs HL2 à HL8) et l'augmentation la plus marquée est aussi à HL1 (+31,0 %). Dans les deux cas, les augmentations modélisées sont relativement moins importantes aux latitudes moyennes (HL4 et HL5) et plus prononcées aux extrémités de la gamme de latitudes considérée.

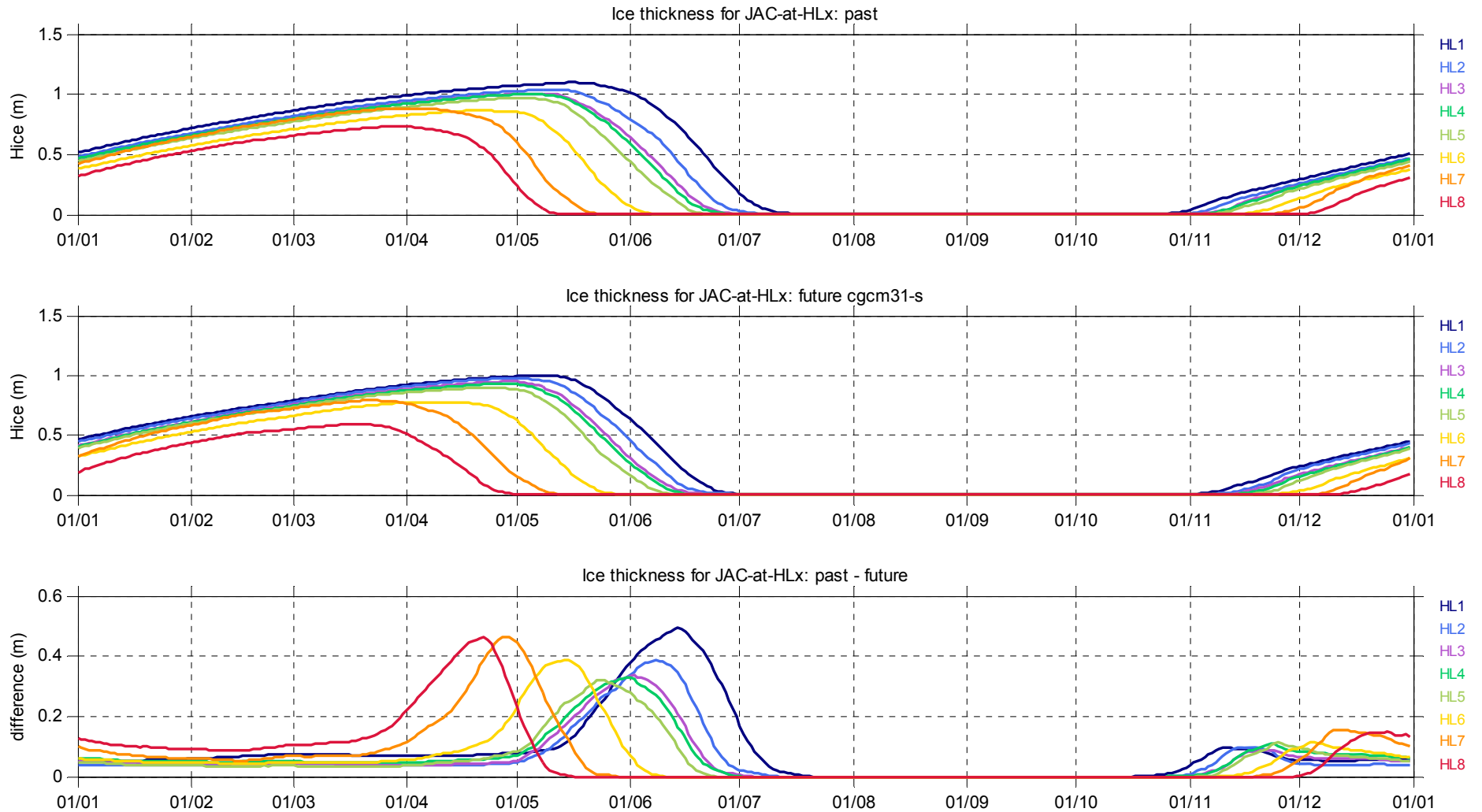


Figure 5.4.6 Cycle annuel de l'épaisseur du couvert de glace saisonnier passé et futur pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes, et différences « futur-passé ». Les épaisseurs de glace futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

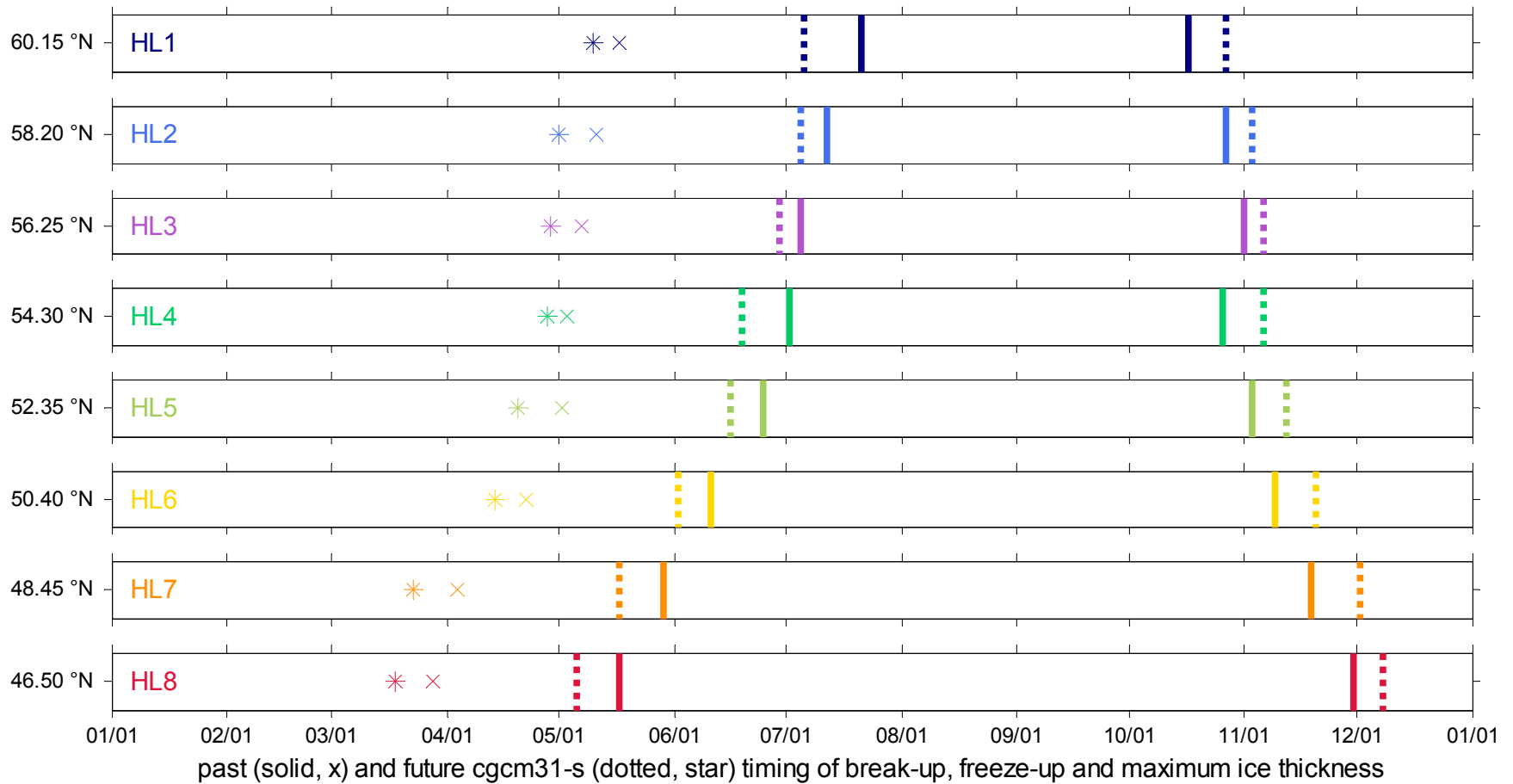


Figure 5.4.7 Occurrence passée (lignes continues) et future (lignes pointillées) du début et de la fin du couvert de glace saisonnier pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes, et occurrence passée (x) et future (*) de l'épaisseur maximum. Les épaisseurs de glace futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

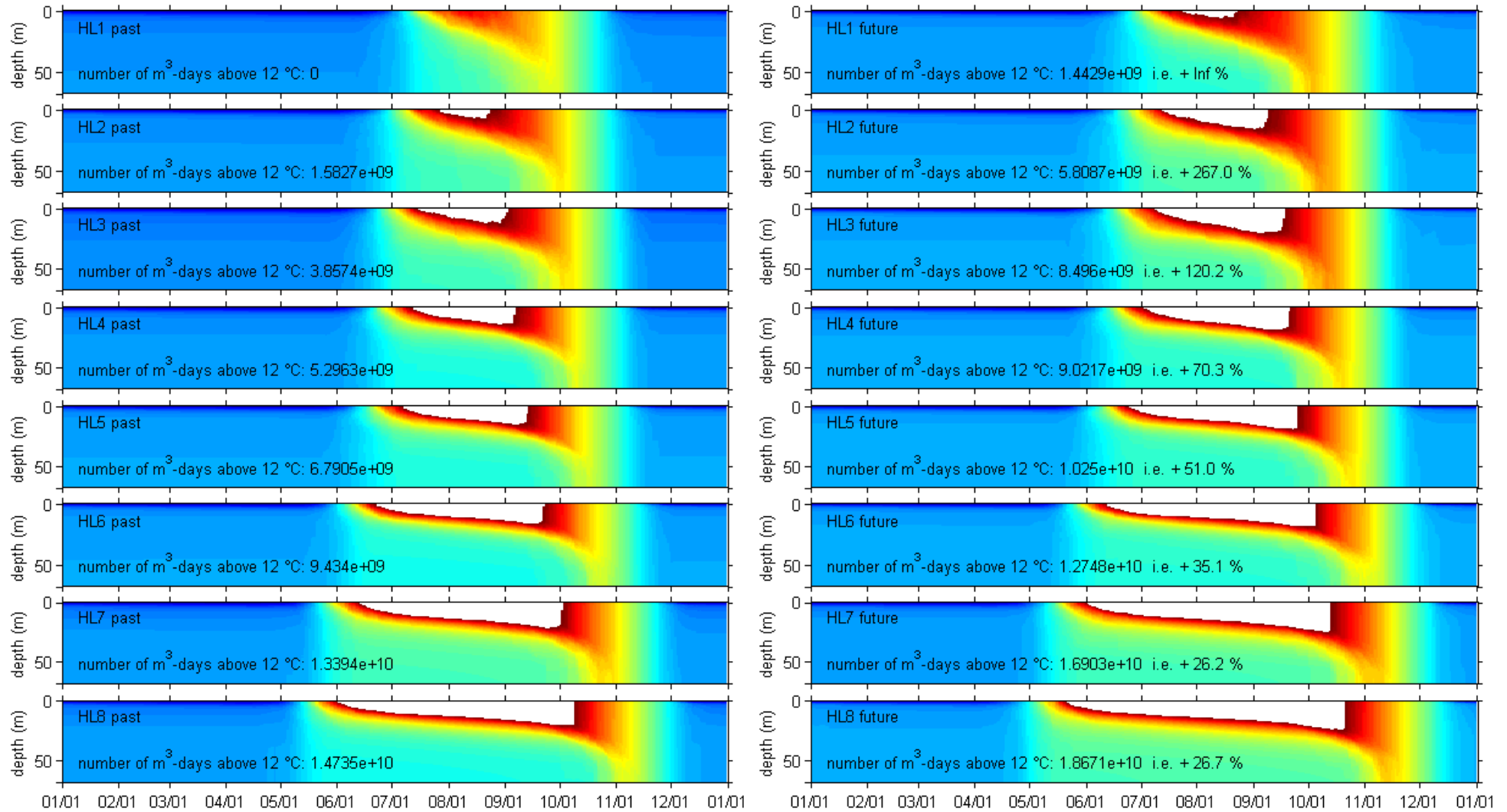
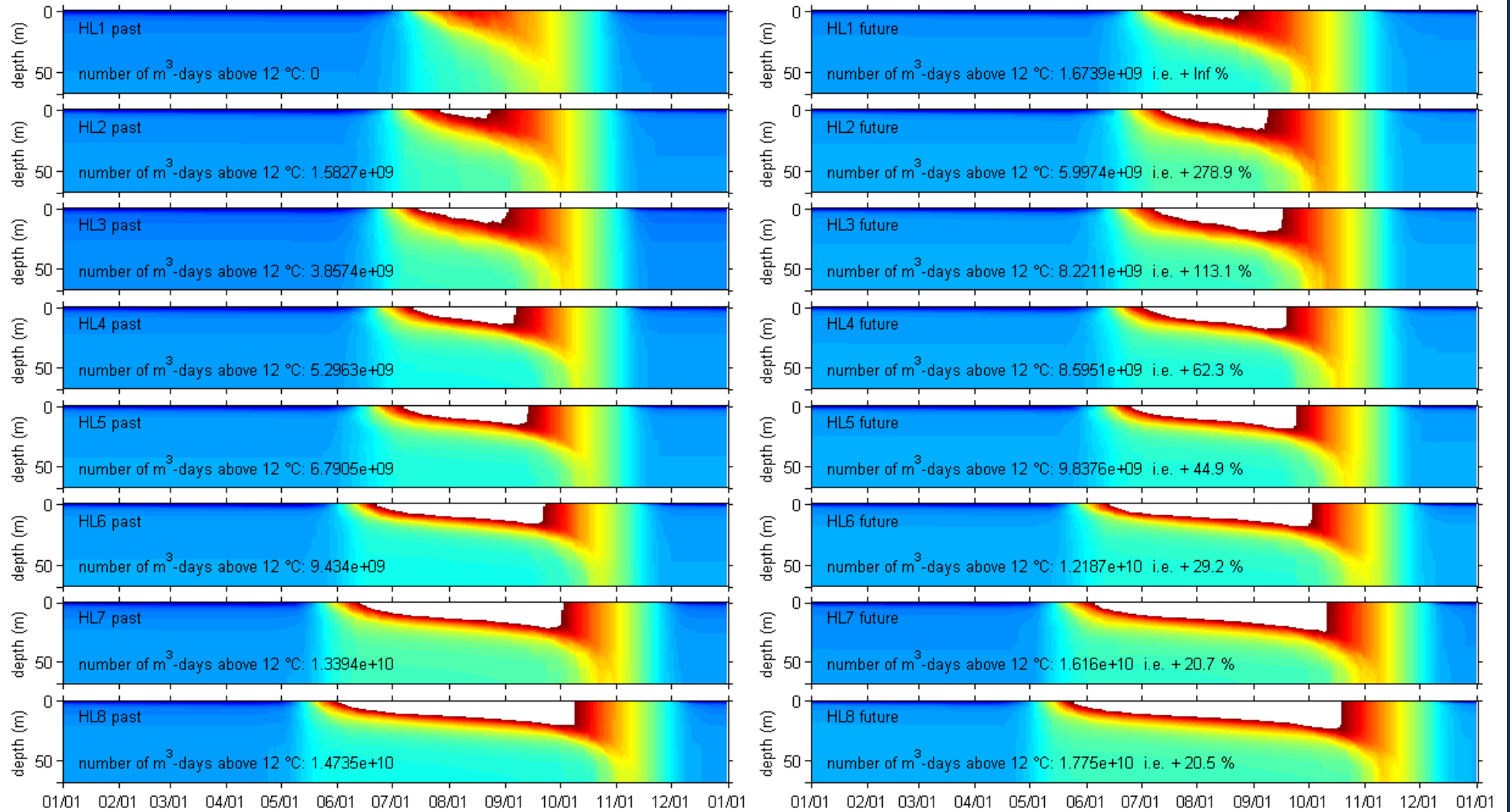


Figure 5.4.8 Cycle annuel des températures passées (à gauche) et futures (à droite) pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes avec blanchiment des températures supérieures à 12 °C et nombre de m^3 -jours au-dessus de cette température. Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.



Figures 5.4.9 Même contenu que pour figure 5.4.8, mais avec températures futures 2041-2070 obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global ECHAM5.

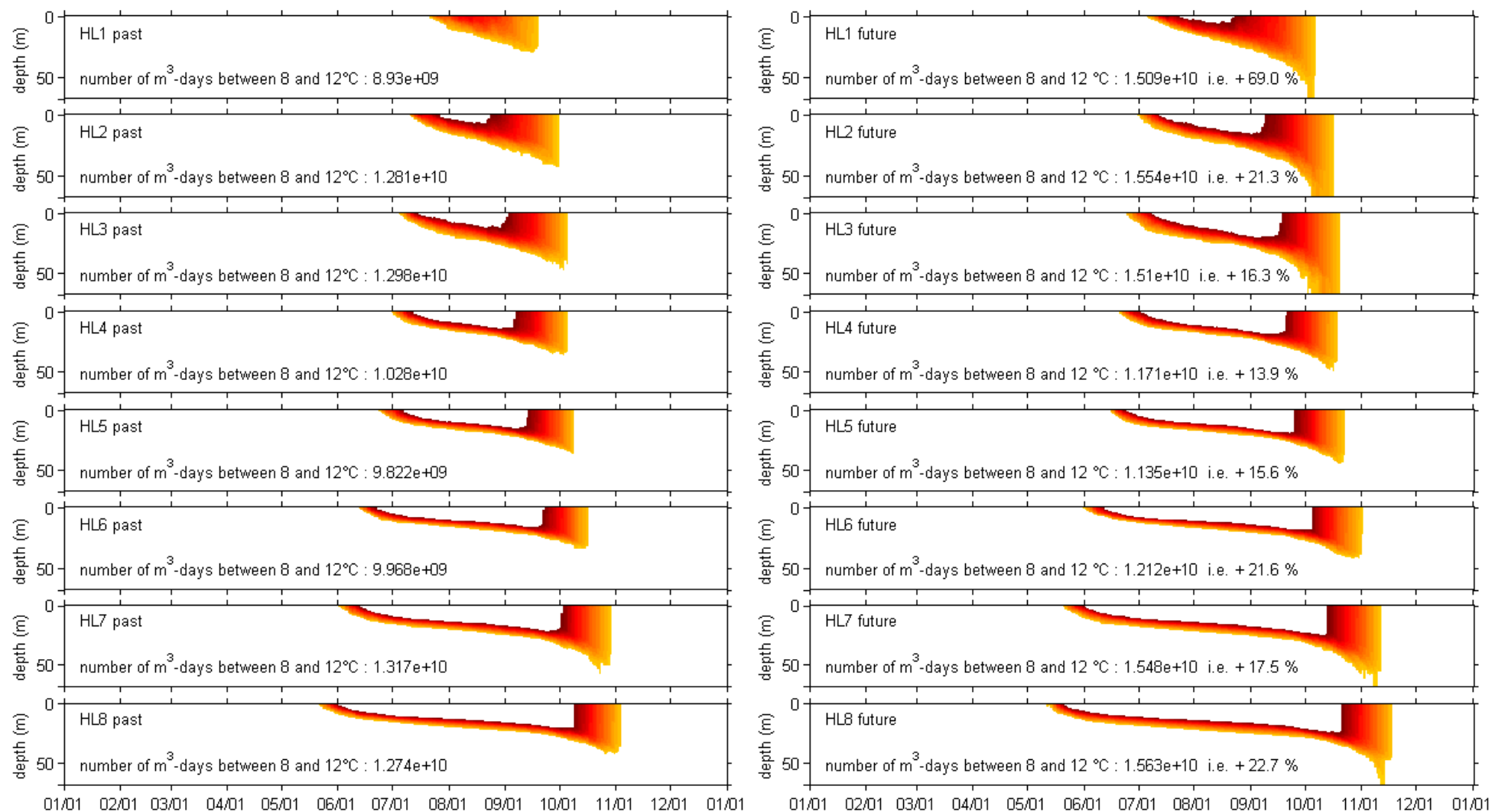


Figure 5.4.10 Cycle annuel des températures passées (à gauche) et futures (à droite) pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes avec blanchiment des températures supérieures et inférieures aux limites de la gamme étroite (8-12 °C) de Plumb et Blanchfield (2009), et nombre de m^3 -jours entre ces limites. Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

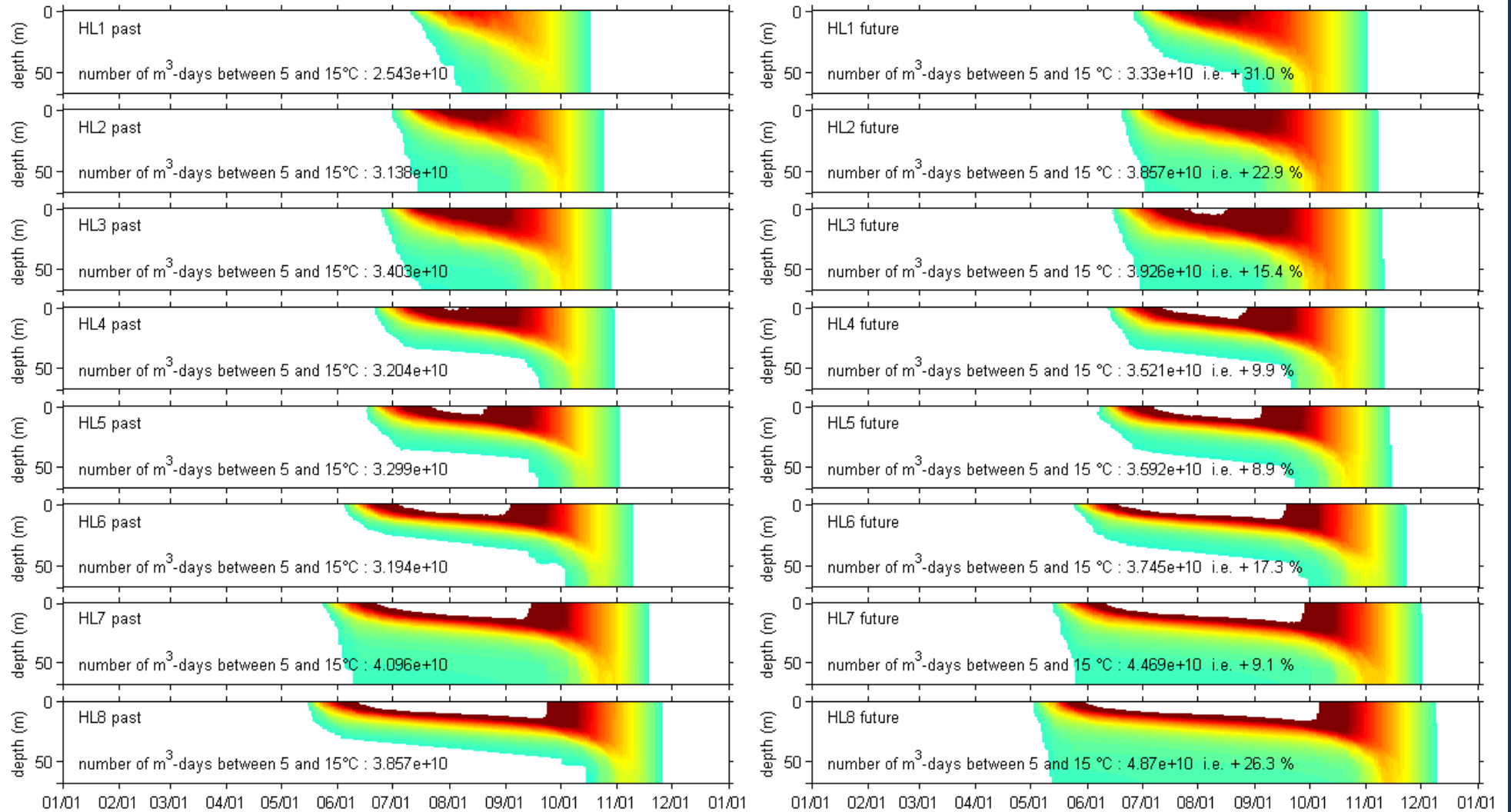


Figure 5.4.11 Même contenu que pour figure 5.4.10, mais pour la gamme large (5-15 °C) de Plumb et Blanchfield (2009).

5.5 Variations nord-sud pour lacs hypothétiques

5.5.1 Impact de la profondeur maximum du lac

Cette analyse de sensibilité s'intéresse à l'impact de la profondeur sur les changements de température à venir. Elle considère trois lacs hypothétiques de 10 km² ayant des profondeurs de 15, 30 et 60 m. Ces lacs sont positionnés à trois latitudes le long du méridien 071° O (latitudes HL1, HL4 et HL7, figure 2.1).

La superficie des lacs est proche de celle du lac Jacques-Cartier (JAC) (12,6 km²) et la calibration utilisée est celle de JAC-2010. Les variations de l'aire avec la profondeur sont obtenues d'une équation développée pour reproduire la variation observée pour le lac JAC (lac choisi pour considérer les variations nord-sud et pour lequel les données bathymétriques sont les meilleures) :

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

où d est la profondeur, d_{max} est la profondeur maximum, $\text{aire}(d)$ est l'aire à la profondeur d , aire_{max} est la superficie du lac en surface, et a est un paramètre ajustable ($a=20$ pour JAC). La même formule est utilisée pour chacun des lacs avec d_{max} différents de manière à ce que l'aire à un pourcentage donné de la colonne d'eau soit le même pour chaque lac. La figure 5.5.1 présente une comparaison des variations de l'aire avec la profondeur pour JAC (i.e. comparaison des variations observée et mathématiquement approximée) et la variation de l'aire avec la profondeur pour les trois lacs hypothétiques de 15, 30 et 60 m de profondeur.

La figure 5.5.2 montre que le contenu en chaleur à la latitude HL4 augmente avec la profondeur du lac (sans surprise puisque le volume d'eau augmente aussi avec la profondeur) et que l'augmentation à venir pour l'horizon 2041-2070 (futur CGCM3.1) devrait augmenter avec la profondeur. Par contre, le contenu en chaleur volumique (i.e. par unité de volume) diminue avec l'augmentation de la profondeur, et l'accroissement à venir devrait être plus marqué pour les lacs relativement peu profonds. En été, le contenu en chaleur volumique d'un lac relativement peu profond est plus grand mais à l'automne il perd sa chaleur plus rapidement et son contenu en chaleur volumique devient plus petit pour un certain temps. En climat futur 2041-2070, ces différences de contenu volumique selon la profondeur du lac surviennent plus tôt au printemps (augmentation davantage avancée pour un lac relativement peu profond) et durent plus longtemps à l'automne (diminution davantage retardée pour un lac relativement profond). [Les évolutions aux latitudes HL1 et HL7 sont présentées à l'annexe A.9.]

En été, moins un lac est profond et plus sa température est élevée (figure 5.5.3), mais cet ordre est renversé suite au mélange automnal (annexe A.10). À une latitude donnée, l'augmentation de température modélisée pour la couche de surface est plus élevée en début d'été pour un lac peu profond, puis légèrement plus grande pour un lac profond, puis suite au mélange automnal l'augmentation est de nouveau plus grande pour un lac peu profond (annexe A.10). Éventuellement, à l'approche de l'hiver l'accroissement de température à venir devient de nouveau moindre pour un lac peu profond.

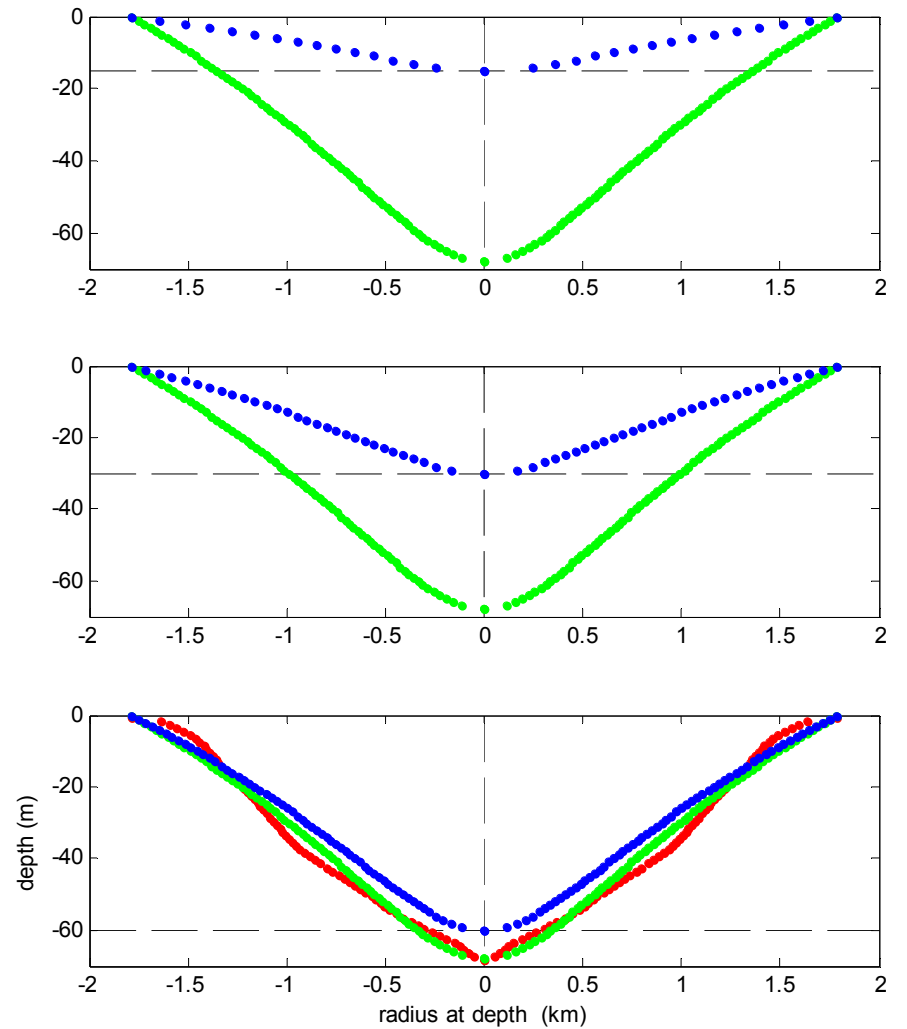
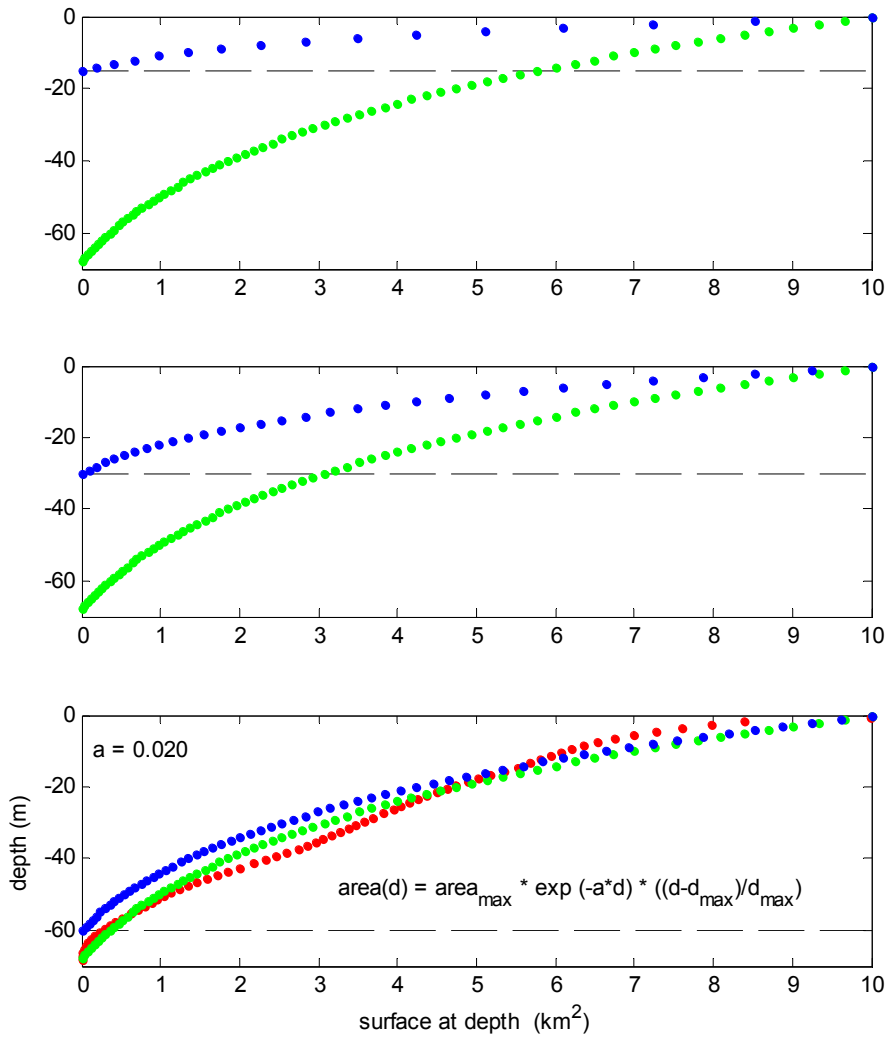


Figure 5.5.1 Variation de l'aire avec la profondeur (à gauche) et du diamètre avec la profondeur en supposant une surface circulaire à toutes profondeurs (à droite): variation observée pour le lac Jacques-Cartier (rouge), variation mathématiquement approximée pour le lac Jacques-Cartier (vert), et variations pour trois lacs hypothétiques de 15, 30 et 60 m de profondeur (bleu).

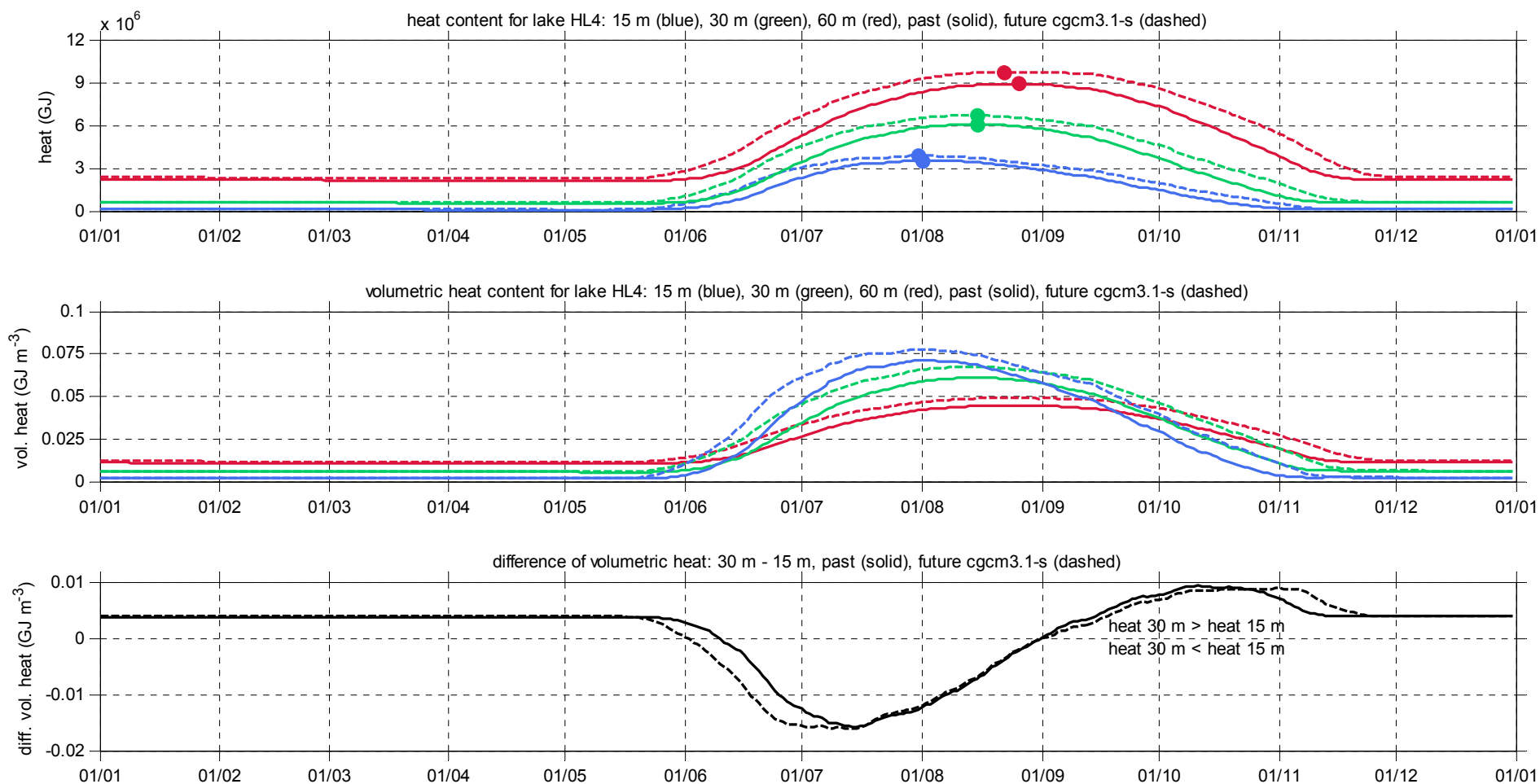


Figure 5.5.2 En haut : cycle annuel de contenu en chaleur passé (lignes continues) et futur (lignes pointillées) pour trois lacs hypothétiques de différentes profondeurs (15 m, bleu; 30 m, vert; 60 m, rouge) à la latitude HL4. Les points indiquent l'occurrence des maximums. Au milieu : idem pour contenu en chaleur volumique. En bas : différence de contenu en chaleur volumique « lac 30 m-lac 15 m » passée (ligne continue) et future (ligne pointillée). Les contenus en chaleur futurs sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

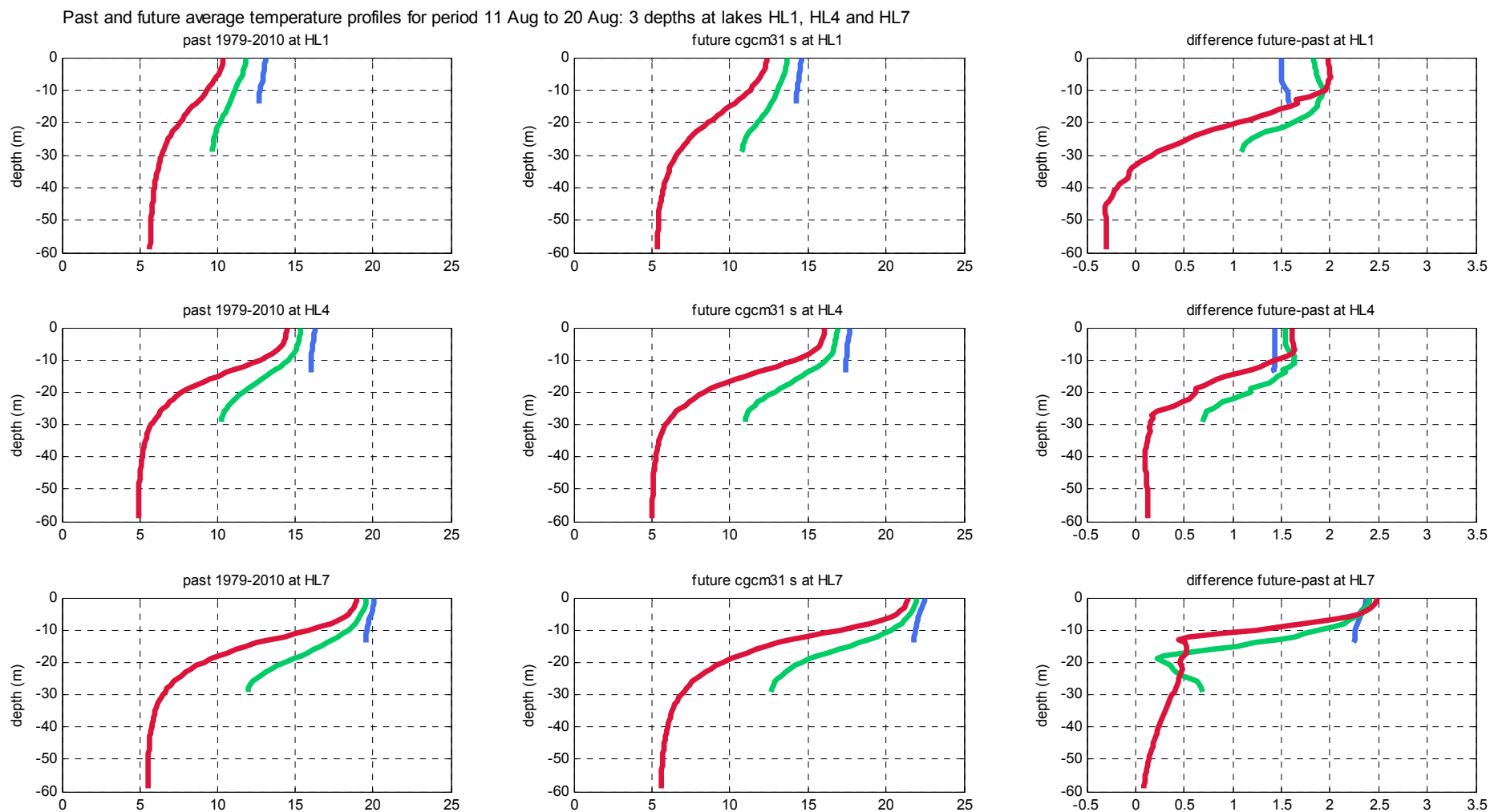


Figure 5.5.3 Profils de température passée et future pour la période 11-20 août pour trois lacs hypothétiques de différentes profondeurs (15 m, bleu; 30 m, vert; 60 m, rouge) lorsque placés aux latitudes HL1, HL4 et HL7, et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

5.5.2 Impact de la variation de l'aire avec la profondeur (volume)

Cette analyse de sensibilité s'intéresse à l'impact de la forme du lac sous la surface (volume) sur les changements de température à venir. Elle considère deux lacs hypothétiques de 10 km² ayant la même profondeur (30 m) mais des variations différentes d'aire en fonction de la profondeur. Ces lacs sont positionnés à trois latitudes le long du méridien 071° O (latitudes HL1, HL4 et HL7, figure 2.1).

La superficie des lacs est proche de celle du lac Jacques-Cartier (JAC) (12,6 km²) et la calibration utilisée est celle de JAC-2010. La variation de l'aire avec la profondeur du premier lac est obtenue de l'équation 1 (section 5.5.1) développée pour approximer la variation observée pour le lac JAC. La variation de l'aire avec la profondeur pour le second lac est obtenue de l'équation suivante :

$$\text{aire}(d) = \pi (r_{\max} \sin(((d_{\max}-d)/d_{\max}) (\pi/2))^2 \quad (\text{éq. 2})$$

$$\text{i.e.} \quad \text{aire}(d) = \pi (r(d))^2 \text{ et } r(d) = r_{\max} \sin(((d_{\max}-d)/d_{\max}) (\pi/2))$$

où d est la profondeur, d_{\max} est la profondeur maximum, $\text{aire}(d)$ 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 formulation, l'aire à mi-profondeur correspond à la moitié de l'aire en surface. La figure 5.5.4 présente la variation de l'aire avec la profondeur pour les lacs hypothétiques de 10 km² et 30 m de profondeur obtenus des équations 1 et 2. Ces lacs correspondent à des volumes de 0,10 et 0,15 km³ respectivement, c'est-à-dire un volume exactement 50 % plus grand pour le lac obtenu de l'équation 2.

Comparant le contenu en chaleur volumique pour ces deux lacs hypothétiques, l'accroissement en début d'été est plus rapide pour le lac moins volumineux et le maximum atteint est supérieur, mais la perte de chaleur est plus rapide à l'automne et le contenu en chaleur volumique pour le lac plus volumineux devient plus grand (figure 5.5.5, latitude HL4). Dans le futur 2041-2070 (CGCM3.1), les différences en début d'été et tard à l'automne devraient être encore plus prononcées. [Les évolutions aux latitudes HL1 et HL7 sont présentées à l'annexe A.11.]

Les températures pour le lac moins volumineux sont plus élevées en été mais moins élevées en automne (annexe A.12). Cependant, l'augmentation de température à venir à un temps de l'année donné est pratiquement toujours plus prononcée pour le lac moins volumineux, même à l'automne. Dépendamment du temps de l'année, ces différences d'augmentation plus grandes pour un lac moins volumineux s'étendent sur toute la colonne d'eau ou sur une partie seulement de celle-ci.

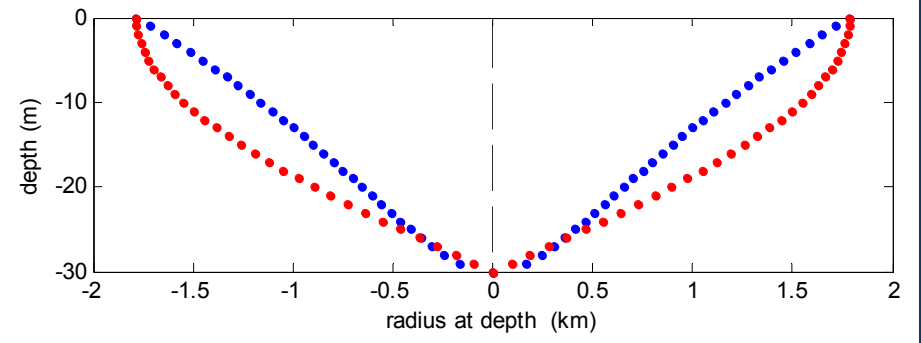
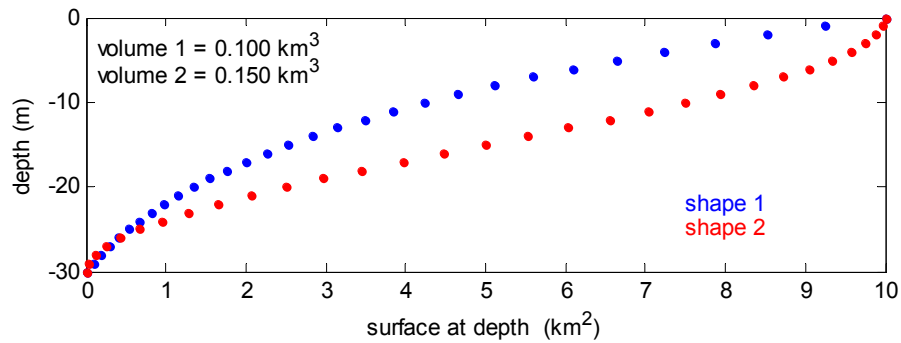
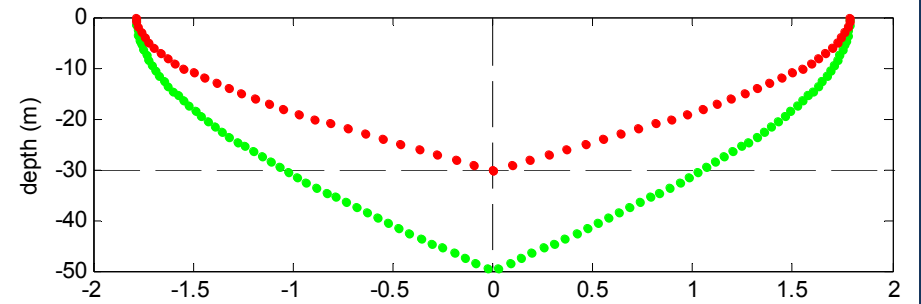
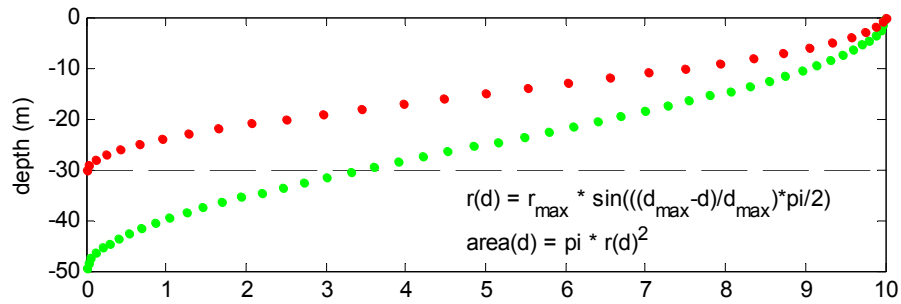
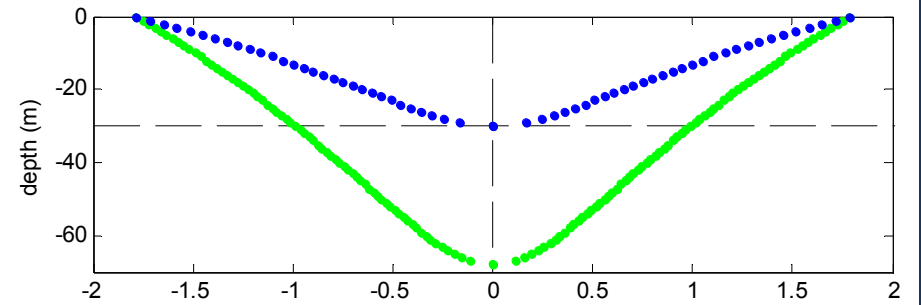
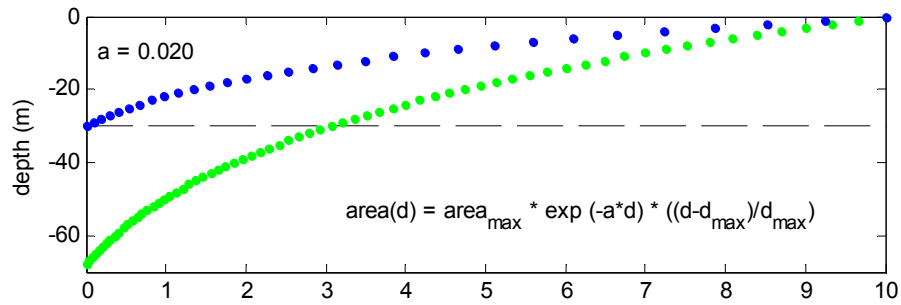


Figure 5.5.4 Variation de l'aire avec la profondeur (à gauche) et du diamètre avec la profondeur en supposant une surface circulaire à toutes profondeurs (à droite): variations obtenues des équations 1 (bleu) et 2 (rouge) pour des lacs hypothétiques de 10 km² et 30 m de profondeur. (En vert, variations pour les profondeurs maximales considérées lors du choix des équations.)

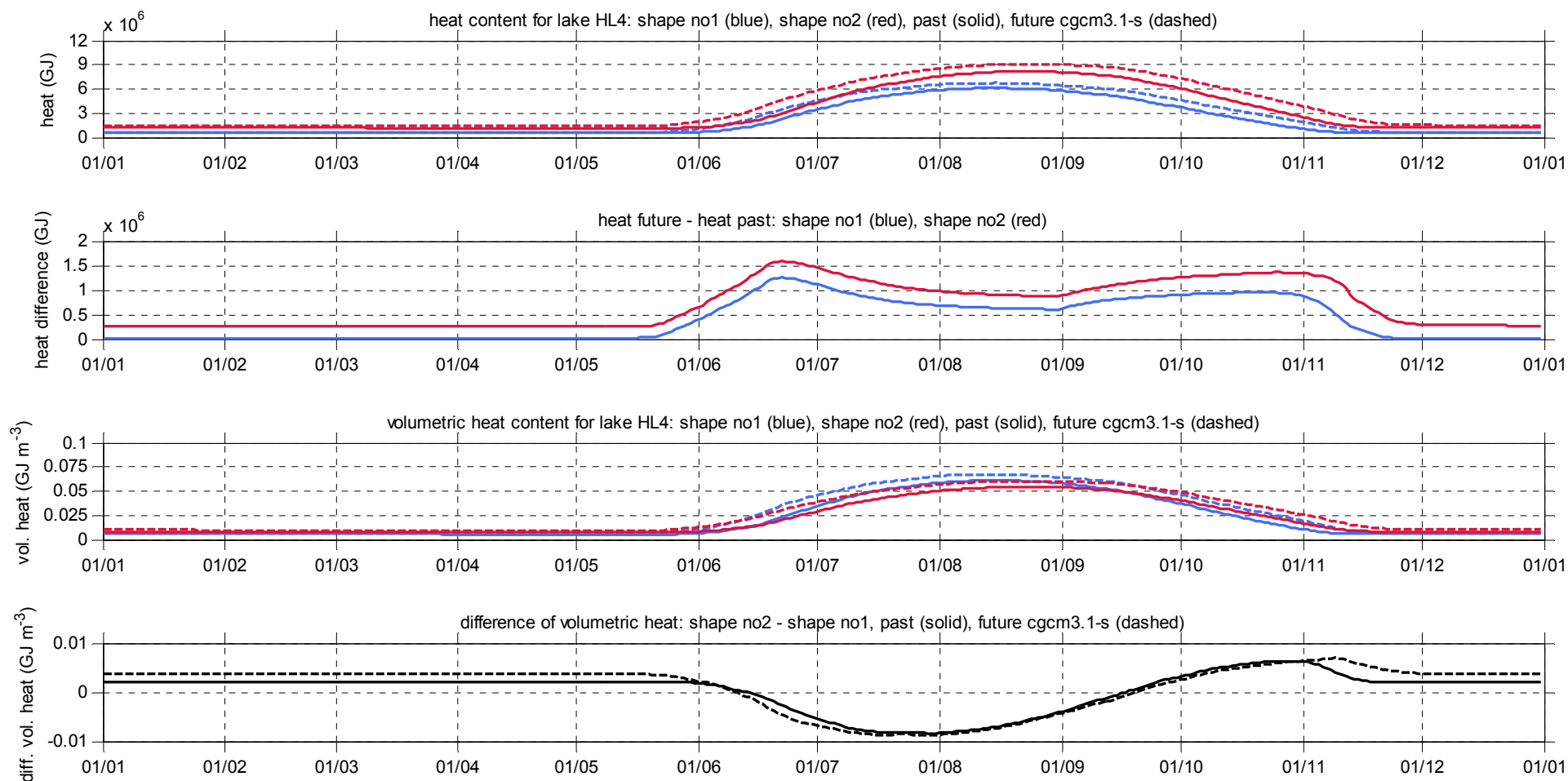


Figure 5.5.5 En haut : cycle annuel de contenu en chaleur passé (lignes continues) et futur (lignes pointillées) pour deux lacs hypothétiques de volume différent ($0,10 \text{ km}^3$, bleu; $0,15 \text{ km}^3$ rouge) à la latitude HL4. Deuxième panneau : différence « futur-passé » de contenu en chaleur. Troisième panneau : contenu en chaleur volumique. Quatrième panneau : différence de contenu en chaleur volumique « lac $0,15 \text{ km}^3$ - lac $0,10 \text{ km}^3$ » passée (ligne continue) et future (ligne pointillée). Les contenus en chaleur futurs sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

Past and future average temperature profiles for period 11 Aug to 20 Aug: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7

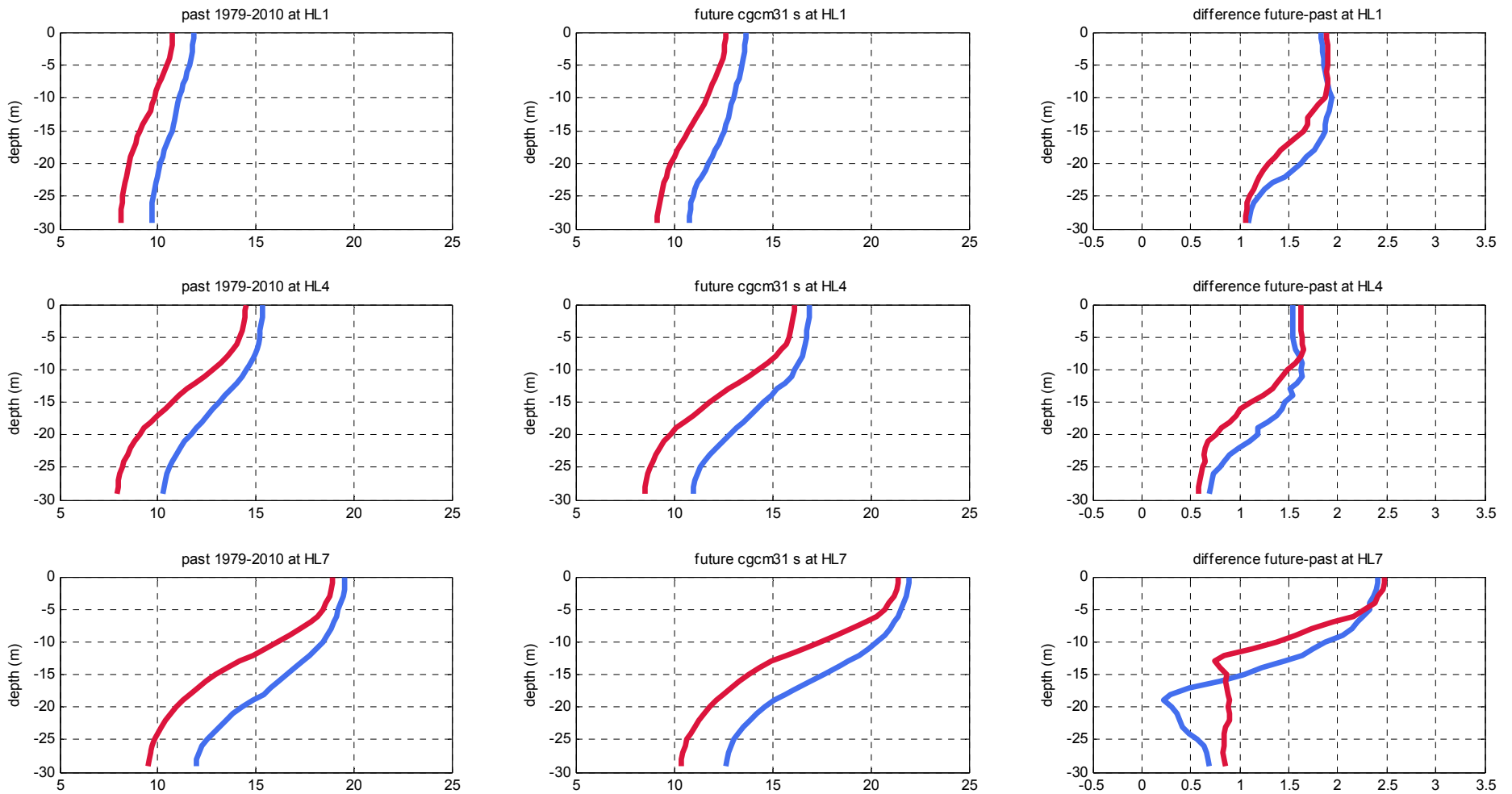


Figure 5.5.6 Profils de température passée et future pour la période 11-20 août pour deux lacs hypothétiques de volume différent ($0,10 \text{ km}^3$, bleu; $0,15 \text{ km}^3$ rouge) lorsque placés aux latitudes HL1, HL4 et HL7, et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

6. Discussion

6.1 Impacts des changements climatiques anticipés sur la variabilité des habitats et des refuges thermiques

Le cycle annuel futur (2041-2070) de température de la colonne d'eau pour le lac Jacques-Cartier a d'abord été modélisé à l'aide des résultats de diverses simulations climatiques afin de juger de la sensibilité des résultats à la simulation considérée. Dans tous les cas (neuf simulations), il y a augmentation de la température par rapport au passé de référence (1979-2010), mais la magnitude de l'augmentation diffère sensiblement d'une simulation à l'autre. Par exemple, l'accroissement de la température maximum en surface varie de 1,87 à 2,97 °C (simulations ahk et aet) alors que le maximum de différence « futur-passé », qui arrive tôt en début d'été et ne coïncide pas avec le maximum de température, varie de 3,12 à 4,62 °C (simulations ahk et aet). De manière générale, les simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1 prédisent des températures futures plus élevées que celles pilotées par les modèles ECHAM5 et CNRM-CM3.3. Les profils de température future en été générés à partir de l'unique simulation pilotée par le modèle CNRM-CM3.3 (ahb) ont un caractère particulier, à savoir que l'augmentation prédite de température est grosso modo intermédiaire pour l'épilimnion mais nettement moins marquée pour l'hypolimnion. Sans nécessairement attribuer cette particularité à cette différence, notons tout de même que c'est la seule des simulations considérées qui utilise le scénario d'émission A1B.

Les températures climatologiques modélisées pour le lac Jacques-Cartier montrent que les augmentations de température à venir sont nettement plus marquées dans la partie supérieure de la colonne d'eau (de la surface à 10 m environ) et que les augmentations les plus grandes surviennent tôt en été, favorisées par un début de réchauffement plus hâtif. Pour l'hypolimnion, les changements les plus marqués résultent de l'avance du mélange printanier et du retard du mélange automnal, l'exportation de chaleur vers le fond étant avancée au printemps et retardée à l'automne. À l'automne, ce retard peut entraîner des différences « futur-passé » négatives marquées (< -1 °C) en profondeur. D'autres cas de différences négatives moins marquées surviennent aussi plus tôt et plus haut dans la colonne d'eau à la faveur d'une stratification future accrue et/ou d'un retard dans le début du refroidissement en fin d'été. Employant le même modèle pour simuler la température de lacs hypothétiques de 20 m de profondeur placés à diverses latitudes le long de deux transects nord-sud, Dibike et al. (2011b) rapportent aussi des cas de différences négatives pour des périodes de référence et future légèrement différentes de celles que nous avons utilisées (pour un transect à 090 °E, augmentation de température pour la période sans couvert de glace variant entre ~ -1 et 4 °C). Pour leur transect nord-américain (105 °O), le seul cas de différence négative est à 50 °N, i.e. à la latitude du lac Chibougamau, un lac plus profond pour lequel on prévoit aussi l'occurrence temporaire de changements négatifs. Cependant, contrairement à ces résultats, nos résultats sur l'impact de la profondeur (annexe A.10) ne prédisent pas de différences « futur-passé » négatives pour les lacs relativement peu profonds (15 et 30 m), sauf pour un cas exceptionnel où une très faible différence négative est prédite avant le début du réchauffement printanier.

Pour le lac Jacques-Cartier, la température maximum modélisée augmente de $\sim 3,0$ °C entre le passé de référence (1979-2010) et l'horizon 2041-2070 (valeur pour la simulation climatique entraînant les changements les plus marqués). Considérant l'horizon plus éloigné 2071-2100, l'augmentation de la température maximum passe à $\sim 4,7$ °C. En surface, la température

dépasse alors 22 °C pendant plus d'un mois alors qu'elle n'atteint que très brièvement 18 °C en passé de référence. Ces résultats pour l'horizon 2071-2100 sont raisonnablement en accord avec ceux présentés par Saloranta et al. (2009) pour un lac finlandais ayant une superficie et une profondeur proches de celles du lac Jacques-Cartier. Leurs résultats prédisent pour l'épilimnion une différence « futur-passé » maximum de 7,0 °C alors que nos résultats prédisent une différence de 6,5 °C. En plus de la différence géographique qui peut contribuer à cet écart, notons aussi que notre passé de référence est 19 ans plus récent que le leur. Davantage de chaleur étant emmagasinée en été « 2071-2100 » dans la partie supérieure de la colonne d'eau, il en résulte aussi pour l'hypolimnion des différences « futur-passé » davantage marquées après la redistribution thermique automnale. Étant donné l'accroissement marqué des changements à venir entre les horizons 2041-2070 et 2071-2100, il apparaît souhaitable de bonifier ces résultats exploratoires en considérant davantage de simulations climatiques et d'autres lacs de dimensions et latitudes différentes.

On a conceptuellement placé un lac typique (Jacques-Cartier) à huit latitudes (46,50 à 60,15 °N) le long du méridien 071 °O et modélisé les cycles annuels de températures climatologiques passé et futur à ces latitudes. Les résultats montrent plusieurs variations nord-sud. Les augmentations prédites de contenu en chaleur maximum (futur 2041-2070 CGCM3.1) exprimées en GJ varient généralement peu avec la latitude, sauf à la latitude la plus au sud (HL8) où l'augmentation est plus prononcée. Par contre, exprimé en pourcentage c'est à la latitude la plus au nord que l'augmentation du contenu en chaleur maximum est la plus grande (+12 %). Les différences « futur-passé » de contenu en chaleur sont nettement plus prononcées à deux périodes de l'année. Un premier maximum survient en début d'été associé à l'avance du réchauffement, et un deuxième maximum survient en fin d'été associé au retard du refroidissement. À ces maximums de différence, les augmentations prédites de contenu en chaleur sont davantage marquées aux extrémités nord et sud de la gamme de latitudes considérée. La période entre l'occurrence des profils uniformes de 4 °C au printemps et à l'automne devrait s'allonger de 21 à 33 jours, les changements prédits les plus marqués étant encore une fois aux extrémités nord et sud. L'accroissement prédit de la période sans couvert de glace varie de 11 à 25 jours, les changements les plus grands étant aux latitudes HL1, HL4 et HL7. L'épaisseur de glace maximum devrait diminuer de 0,06 à 0,14 m, et encore une fois les changements prédits les plus marqués sont aux extrémités nord et sud (-0,10 m et -0,14 m).

En été, le contenu en chaleur volumique d'un lac peu profond (15 m) est plus grand que celui d'un lac profond (60 m), mais le lac peu profond perd sa chaleur plus rapidement à l'automne et son contenu en chaleur volumique devient moins grand que celui d'un lac profond. Les différences « futur-passé » de chaleur volumique sont maximales environ un mois après le début du réchauffement printanier. Ces différences sont toujours plus grandes pour un lac peu profond que pour un lac profond, sauf à la toute fin du refroidissement automnal. Ceci peut laisser croire que les changements de température à venir sont toujours plus grands pour un lac peu profond, mais les profils de différences de température « future-passé » montrent des exceptions. Pour la partie supérieure de colonne d'eau (0-10 m), les augmentations de température à venir sont plus grandes pour un lac profond une fois la thermocline bien établie (annexe A.10). Avec l'arrivée du refroidissement printanier, cette « anomalie » s'estompe rapidement et les différences de température « futur-passé » redeviennent plus grandes pour les lacs peu profonds. Cette particularité découle de l'impact de la profondeur sur le développement d'une thermocline bien marquée pouvant diminuer l'exportation de la chaleur vers l'hypolimnion.

Une différence de profondeur étant aussi une différence de volume, la plupart des résultats de l'analyse de sensibilité au volume sont semblables à ceux de l'analyse de sensibilité à la profondeur (contenu en chaleur volumique d'abord plus grand pour un lac peu volumineux puis plus petit, et températures en été plus élevées pour un lac peu volumineux). La différence « futur-passé » de contenu en chaleur volumique d'un lac moins volumineux est plus grande au premier maximum de différence (au début du réchauffement) et plus petite vers la fin du refroidissement automnal, et entre ces deux périodes les écarts de différence sont très petits. Les augmentations de température prédites sont généralement plus grandes pour un lac peu volumineux mais, comme pour l'impact de la profondeur, il arrive que les augmentations à venir dans la partie supérieure de la colonne d'eau soient un peu plus grandes pour un lac plus volumineux.

Considérant les limites supérieures d'habitat du touladi présentées par Plumb et Blanchfield (2009), l'augmentation du nombre de m^3 -jours au-dessus de ces limites donne une idée de l'accroissement à venir des conditions thermiques défavorables. Pour la limite supérieure de la gamme étroite ($12\text{ }^\circ\text{C}$), l'augmentation prédite varie entre $3,31 \times 10^9$ et $4,64 \times 10^9$ m^3 -jours, sauf à la latitude la plus au nord où elle est moins élevée ($1,44 \times 10^9$ m^3 -jours). Les augmentations prédites les plus marquées sont aux latitudes voisines HL2 et HL3. À ces latitudes, l'augmentation à venir équivaut à déplacer ces lacs vers le sud sur des distances respectives de 508 et 573 km. Ces déplacements virtuels diminuent pour les lacs plus au sud (400, 261 et 181 km pour les lacs HL4, HL5 et HL6). Lorsqu'exprimées en pourcentage, les augmentations prédites augmentent presque sans exception du sud au nord, une différence « futur-passé » moindre pouvant être compensée par une plus faible quantité de m^3 -jours en climat passé. Les volumes d'eau avec des températures en deçà de la limite supérieure restent quand même toujours importants, le maximum absolu du pourcentage de volume avec $T > 12\text{ }^\circ\text{C}$ passant de 61,5 % à 67,2 % (à HL7, bien que l'augmentation prédite soit légèrement plus grande à HL8) (annexe A.8). C'est à l'automne, i.e. suite au mélange automnal, que les différences « futur-passé » de volume d'eau avec $T > 12\text{ }^\circ\text{C}$ sont nettement plus marquées.

Pour la limite supérieure de la gamme large ($15\text{ }^\circ\text{C}$), l'augmentation prédite de m^3 -jours varie entre 0 et $3,33 \times 10^9$ m^3 -jours, les augmentations les plus grandes étant au sud dans ce cas (HL7, suivi de HL6). Pour le lac à la latitude HL3, les changements à venir en terme de m^3 -jours au-dessus de $15\text{ }^\circ\text{C}$ équivalent à déplacer ce lac de 335 km vers le sud (320, 213 et 230 km pour les latitudes HL4, HL5 et HL6). Les volumes d'eau restant en deçà de la limite de $15\text{ }^\circ\text{C}$ sont évidemment encore plus importants que pour la limite de $12\text{ }^\circ\text{C}$: le maximum absolu du pourcentage de volume avec $T > 15\text{ }^\circ\text{C}$ passant de 43,7 % à 50,9 % (HL7).

Malgré une diminution prédite de l'habitat, les résultats présentés pour un lac relativement profond peuvent sembler rassurants quant au stress thermique sur les salmonidés. Pour un lac aux dimensions et profondeur du lac Jacques-Cartier, il devrait toujours rester à l'horizon 2041-2070 au moins 32,8 % (49,1 %) du volume d'eau avec une température en deçà de la limite supérieure de $12\text{ }^\circ\text{C}$ ($15\text{ }^\circ\text{C}$). De plus, ces pourcentages augmentent lorsqu'obtenus à partir des simulations climatiques ECHAM5 (33,8 % et 51,4 %). Par ailleurs, le nombre de m^3 -jours avec une température entre les limites inférieure et supérieure des habitats théoriques (Plumb et Blanchfield, 2009), devrait même augmenter dû au dépassement plus fréquent de la limite inférieure (figures 5.4.10 et 5.4.11). Cependant, les prédictions sont moins rassurantes pour les lacs relativement peu profonds (ou moins volumineux en raison d'une morphologie différente). Pour ces lacs, les analyses de sensibilité indiquent des températures plus élevées et des augmentations de température généralement sensiblement plus grandes. Pour un lac peu

profond (~15 m) situé à la latitude HL2 (lac Stewart, 58,20 °N), le modèle prédit que la température seuil de 12 °C sera dépassée sur l'ensemble de la colonne d'eau pendant une vingtaine de jours en fin d'été (annexe A.5). Pour un lac plus profond (68 m), le modèle prédit qu'aux environs de cette latitude (plus précisément à HL2 et HL3) la température de 8 °C sera dépassée sur toute la colonne d'eau pendant une quinzaine de jours à l'automne (voir annexe A.7). La progression des changements à venir étant significative entre les horizons 2041-2070 et 2071-2100, un lac nordique un peu plus profond/volumineux que le lac Stewart qui n'aurait pas encore basculé dans ce scénario à l'horizon 2041-2070 pourrait bien s'y retrouver quelques années plus tard.

6.2 L'Oxygène dissous

La température de l'eau et la concentration en oxygène dissous sont les deux variables les plus limitantes pour la croissance et la survie des poissons (Stefan et al., 1996; Christie et Regier, 1988). Dans un premier temps, nous avons réussi à reproduire les profils verticaux de température observés dans trois lacs du sud, du centre et du nord du Québec, lacs où l'on retrouve des populations de touladis. Dans un second temps, nous avons déterminé l'impact des changements climatiques à venir sur les habitats thermiques des touladis. Il nous reste à déterminer les impacts changements climatiques sur les concentrations en oxygène dissous. L'évolution « climatique », i.e. à long terme, de la distribution de l'oxygène dissous comporte plus d'incertitude que celle de la température journalière. L'oxygène dissous est un paramètre délicat à simuler car, en plus de dépendre de la température, les concentrations sont aussi affectées par des processus biogéochimiques (photosynthèse, respiration planctonique, respiration benthique, transformation des sédiments, etc.). Le modèle MyLake permet, en principe, d'étudier la variabilité d'un traceur dissous ou particulaire quelconque en fonction de la température, du brassage par le vent et de sa sédimentation. Il permet aussi de tenir compte de la matière organique dissoute. MyLake utilise une approche advection-diffusion similaire à celle de Stefan et al. (1996) pour simuler l'évolution des concentrations d'oxygène dissous, par exemple. Dans MyLake, l'oxygène dissous n'est pas couplé au modèle de phytoplancton et nous n'avons pas tenté d'effectuer ce couplage, faute de temps. Avant d'être en mesure de simuler le comportement futur de l'oxygène dissous, il est indispensable d'avoir accès à une base de données de profils d'oxygène dissous. Nous avons obtenu du MRNF des séries supplémentaires de profils verticaux de température et d'oxygène dissous pour le lac St-Joseph (en 2006 et 2007), le lac des Aulnes (en 2004, 2007 et 2008) et le lac des Trente et Un Mille (en 2006, 2007 et 2010). Nous avons déjà calculé toutes les variables météorologiques pour la période 2000-2010 pour chacun de ces trois lacs. Nous avons aussi effectué une comparaison entre les variables météorologiques mesurées (ou estimées) à la position de deux lacs (des Aulnes et des Trente et Un Mille) et les variables produites par le projet NARR pour la période 1979-2010. De plus, nous avons les données bathymétriques de ces trois lacs. Il reste à produire une version de MyLAKE simulant non seulement les habitats thermiques pour chacun de ces trois lacs, mais simulant aussi la qualité de l'eau et donc les concentrations en oxygène dissous pour chacun des six lacs.

La réponse des écosystèmes lacustres aux changements climatiques (température de l'eau, stabilité thermique, lumière, habitat, saison de croissance, matière organique, nutriments, etc.) risque d'être fort complexe. C'est pourquoi l'incertitude quant à leurs effets sur les processus biochimiques et donc sur la concentration en oxygène dissous sera très probablement élevée.

Cet exercice demeure toutefois très intéressant car il permettra d'explorer les effets escomptés dans un contexte simplifié et la sensibilité du système à certaines variables clés.

7. Conclusion et recommandations

7.1 Conclusions

Le modèle MyLAKE a pu simuler de façon satisfaisante les observations de température pour des lacs de différentes dimensions et profondeurs.

Les cycles annuels de températures climatologiques futures ont été dérivés à partir de la différence entre les valeurs moyennes futures et passées des variables météorologiques simulées par le Modèle régional canadien du climat (CRCM). Les températures climatologiques futures pour le lac Jacques-Cartier ont été modélisées pour neuf simulations climatiques et les résultats ont été comparés. Pour l'augmentation de la température maximum, l'écart inter-simulation maximum est ~ 1.0 °C pour l'épilimnion et $\sim 0,8$ °C pour l'hypolimnion. Les simulations pilotées par le Modèle canadien global (CGCM3.1) induisent des changements légèrement plus grands que celles pilotées par le modèle global couplé de l'Institut Max-Planck (ECHAM5).

Plusieurs des changements modélisés pour l'horizon 2041-2070 résultent de l'avance du réchauffement en début d'été et du retard du refroidissement à l'automne, et conséquemment du déplacement des périodes de mélange (exportation de chaleur vers le fond) printanière et automnale. Les changements les plus marqués surviennent dans la partie supérieure de la colonne d'eau tôt en été. Pour l'hypolimnion, les changements les plus grands surviennent à la faveur du mélange automnal futur, la température ayant alors diminué en climat passé et la quantité de chaleur redistribuée étant plus grande en climat futur. Le délai du mélange automnal peut entraîner des températures futures inférieures aux températures passées (contre-intuitif) pour une période de quelques jours aux environs de la période de mélange en climat passé.

Les résultats exploratoires pour l'horizon 2071-2100 (lac Jacques-Cartier) prédisent des changements encore plus marqués, tant pour le maximum de température atteint (de $\sim +3,0$ °C à $\sim +4,7$ °C) que pour les accroissements maximums en surface tôt en été et en profondeur à l'automne.

Les variations nord-sud des changements à venir ont été considérées pour un lac typique (lac Jacques-Cartier) conceptuellement placé à huit latitudes le long du méridien 071 °O. Pour divers changements à venir (accroissements maximums printanier et automnal de contenu en chaleur, extension de la période entre les profils uniformes de 4 °C, diminution de l'épaisseur maximum de glace), les changements prédits sont plus marqués aux extrémités de la gamme de latitudes considérée qu'aux latitudes intermédiaires.

Des analyses de sensibilité pour l'impact de la profondeur maximum et la forme (le volume) du lac indiquent des températures plus élevées en été pour un lac moins profond/volumineux et une perte de chaleur plus rapide à l'automne. Les augmentations de température à venir sont généralement plus grandes pour un lac moins profond/volumineux mais elles peuvent aussi être plus petites dans la partie supérieure de la colonne d'eau une fois la thermocline estivale bien établie.

Le nombre de m³-jours au-dessus des limites supérieures d'habitat du touladi augmente en climat futur 2041-2070 et laisse entrevoir une diminution de l'habitat. Pour la limite supérieure de la gamme étroite (12 °C), les augmentations les plus marquées sont au nord aux latitudes 58,20 °N et 56,25 °N; pour la limite supérieure de la gamme large (15 °C), elles sont au sud aux latitudes 48,45 °N et 50,40 °N. Malgré une réduction de l'habitat en surface, les résultats peuvent sembler rassurants puisqu'il devrait toujours rester au moins 33 % et 49 % du volume d'eau en deçà des limites de 12 °C et 15 °C. Cependant, le volume restant est dans la partie inférieure de la colonne d'eau, i.e. là où un déficit en oxygène dissous est susceptible de survenir. Pour un lac relativement profond au nord de la gamme de latitudes considérée (i.e. entre 56,25 et 58,20 °N), le modèle prédit une période de plusieurs jours à l'automne pendant laquelle les températures seront supérieures à 8 °C sur toute la colonne d'eau. Pour un lac peu profond (~15 m) à 58,20 °N (lac Stewart), le modèle prédit que la température seuil de 12 °C sera alors dépassée sur toute la colonne d'eau pendant une vingtaine de jours.

7.2 Suggestions de travaux futurs

Les travaux futurs que nous proposons sont de deux types : des travaux indispensables pour terminer le projet original et des travaux qui amélioreraient la qualité des résultats sur les habitats thermiques.

Les travaux indispensables sont, évidemment, les simulations des profils d'oxygène dissous. Il faut débiter par compléter nos simulations pour les lacs manquants : St-Joseph, des Aulnes et des Trente et Un -Milles. Ces lacs ont été mis de côté pour l'instant parce que nous n'avons, contrairement aux trois autres, que des séries de profils verticaux, mais surtout parce que nous avons manqué de temps pour développer une méthodologie pour traiter ce type de données. Pour ce qui est de l'oxygène dissous, le modèle MyLAKE possède des modules « qualité de l'eau » de base. Il faudrait expérimenter avec ces options à partir d'un lac pour lequel il existe des données. Par la suite, le modèle pourrait être appliqué à plusieurs classes de lacs comme l'ont fait Stefan et al. (1996) qui ont effectué une classification des lacs du Minnesota à partir d'une base de données de plus de 3000 lacs. Ils se sont restreints à deux sous-régions, nous pourrions revenir à notre classifications originales de trois régions : au nord du 60^{ième} parallèle, entre le 60^{ième} et le 55^{ième}, et au sud du 55^{ième}. Une telle modélisation pourrait facilement prendre entre un et trois ans, surtout s'il faut recueillir de nouvelles données d'oxygène dissous et de température. Le modèle biologique intégré est du type PPZD (phosphate, phytoplancton, zooplancton et détritits) et nous pourrions avoir besoin d'une nouvelle série de paramètres, surtout les éléments nutritifs.

Les autres travaux suggérés visent à compléter nos études de sensibilité et donc à accroître notre confiance dans les résultats de nos simulations des habitats futurs.

- 1) Il faudrait compléter l'analyse de sensibilité reliée à l'aire des lacs. Les lacs sont déjà choisis et le modèle est prêt et a déjà été utilisé pour ces lacs. Les résultats ne sont pas encore satisfaisants et n'ont donc pas été présentés dans notre rapport. Certains paramètres ajustables devront varier avec l'aire des lacs, comme le pourcentage d'efficacité du mélange par le vent, par exemple.

- 2) Il faut effectuer une comparaison entre la méthode des deltas et la méthode des biais. À notre connaissance, une seule étude basée sur l'utilisation de MyLake a utilisé la méthode des deltas auparavant (Dibike et al., 2011b).
- 3) Les biais. Nous devons vérifier les biais en été pour les deltas du modèle CNRM-CM3 et produire un cycle annuel des deltas, s'il n'y a pas d'erreurs dans les calculs actuels. De manière générale, il faudrait compléter notre comparaison des deltas saisonniers par rapport aux deltas mensuels.
- 4) Il y a probablement très peu d'effet de l'évolution du climat sur l'humidité relative (HR) et par conséquent dans ce travail nous avons considéré que les deltas pour l'HR étaient négligeables (i.e. séries d'HR futures égales aux séries d'HR passées). Toutefois, cela resterait à valider avec une étude plus poussée.
- 5) Explorer d'avantage le futur 2070-2100. On pourrait considérer davantage de simulations climatiques. Nous pourrions produire les mêmes simulations le long du gradient NS que celles pour 2041-2070.
- 6) Les glaces saisonnières. MyLake simule la couverture saisonnière de glace. Pour plusieurs lacs et en particulier le lac Stewart, un suivi des conditions annuelles de glace est effectué. Il serait nécessaire de comparer nos résultats de simulation avec les données réelles des dates de gel et de dégel.
- 7) Indices de stabilité. On pourrait facilement ajouter des calculs d'indices de stabilité, l'indice de stabilité de Schmidt par exemple, un indice qui permet de caractériser l'ensemble de la colonne d'eau par une seule valeur et qui est très utilisé par les limnologues. Ces indices pourraient être utiles pour les modèles de prévision des concentrations futures en oxygène dissous.
- 8) Finalement, nous avons considéré des débits égaux à l'entrée et à la sortie des lacs. Il est cependant possible de faire varier les caractéristiques de l'eau entrant dans le lac : le débit à l'entrée, la température des eaux entrantes, leur charge sédimentaire, les concentrations en carbone organique dissous et les concentrations en phosphore particulaire et dissous.

8. Références

- ACIA (2005), Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge University Press, 1042 p.
- 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.
- Caya, D. et R. Laprise (1999), A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model: the Canadian RCM, *Mon. Weather Rev.*, 127: 341-362.
- Chu, C., N. Jones et L. Allen (2010), Linking the thermal regimes of streams in the Great Lakes Basin, Ontario, to landscape and climate variables, *River Res. Appl.*, 26: 221-241.
- 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.
- Cullen, A.C. et H.C. Frey (1999), Probabilistic Techniques in Exposure Assessment, Plenum Press, New York, NY, 335 p.
- Dibike, Y., T. Prowse, B. Bonsal, L. de Rham, et T. Saloranta (2011a), Simulation of North American lake-ice cover characteristics under contemporary and future climate conditions, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.2300.
- Dibike, Y., T. Prowse, T. Saloranta, et R. Ahmed (2011b), Response of Northern Hemisphere lake-ice cover and lake-water thermal structure patterns to a changing climate, *Hydrol. Process.*, 25, 2942-2953.
- Dillon, P.J., K.M. Somers, J. Findeis et M.C. Eimers (2003), Coherent response of lakes in Ontario, Canada to reductions in sulphur deposition: the effects of climate on recovery. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 7: 583-595.
- 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.
- Fortin, J.G., F. Anctil, L.-E. Parent, et M.A. Bolinder (2008), Comparison of empirical daily surface incoming solar radiation models, *Agric. Forest Meteorol.*, 148, 1332–1340.
- Huard, D. (2012), Scénarios climatiques pour l’habitat des salmonidés. Rapport SCEN – no. 2012–06
- Forcius, M., T. Saloranta, L. Arvola, S. Salo, M. Verta, P. Ala-Opas, M. Rask, et J. Vuorenmaa (2010), Physical and chemical consequences of artificially deepened thermocline in a small humic lake – a paired whole-lake climate change experiment, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 2629-2642.
- IPCC (2007), Climate Change 2007: The physical science basis, Summary for policymakers, contribution of the Working Group 1 to the fourth Assessment Report on the Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 p.

IPCC 2000, Emission Scenarios, Nakicenovic, N. et R. Swart [eds]. Cambridge University Press, Cambridge, 570 p.

Jobling, M., H.K. Johnsen, G.W. Pettersen et R.J. Henderson (1995), Effect of temperature on reproductive development in Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), J. therm. Biol., 20, No. 1/2: 157-165.

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.

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.

Mearns, L.O., R. Arritt, S. Biner, M. S. Bukovsky, S. McGinnis, S. Sain, D. Caya, J. Correia Jr., D. Flory, W. Gutowski, E. S. Takle, R. Jones, R. Leung, W. Moufouma-Okia, L. McDaniel, A. M. B. Nunes, Y. Qian, J. Roads, L. Sloan, et M. Snyder (2012), The North American Regional Climate Change Assessment Program, Bull. A.M.S., 93, 1337-1362.

Mueller, D.R., P. Vaqñ 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.

Plumb, J.M. et 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.

Prowse, T., K. Alfredsen, S. Beltaos, B. Bonsal, C. Duguay, A. Korhola, J. McNamara, R. Pienitz, W.F. Vincent, V. Vuglinsky, et G.A. Weyhenmeyer (2011a), Past and future changes in Arctic lakes and river ice, Ambio, 40, 53-62.

Prowse, T., K. Alfredsen, S. Beltaos, B.R. Bonsal, W.B. Bowden, C.R. Duguay, A. Korhola, J. McNamara, W.F. Vincent, V. Vuglinsky, K.M. Walter Anthony, et G.A. Weyhenmeyer (2011b), Effects of changes in Arctic lakes and rivers, Ambio, 40, 63-74.

Saloranta, T.M. et 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. et T. Andersen (2005), MyLake (v.1.2) : Technical model documentation and user's guide for version 1.2., NIVA, unpublished report.

Saloranta, T.M. et 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., M. Forcius, M. Järvinen, et L. Arvola (2009), Impacts of projected climate change on thermodynamics of a shallow and deep lake in Finland: model simulation and Bayesian uncertainty analysis, Hydrol. Res., 40, 234-248.

Stefan, H.G., M. Hondzo, X. Fang, J.G. Eaton et J. H. McCormic (1996), Simulated long-term temperature and dissolved oxygen characteristics of lakes in the north-central United States and associated fish habitat limits. *Limnol. Oceanogr.* 41: 1124-1135.

Vincent, A.C., D.R. Mueller et W.R. Vincent (2008), Simulated heat storage in a perennially ice-covered high Arctic lake: sensitivity to climate change, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.29/2007JC004360.

Annexe 1

Estimation de la radiation solaire et des couvertures nuageuses

A1.1 Estimation des variables

Il y a peu de stations mesurant la radiation solaire au Québec. Les stations disponibles sont identifiées sur la figure A1.1.

Pour estimer la valeur incidente de la radiation solaire à la position de nos différents lacs, nous (D.I. Jeong) avons comparé trois méthodes d'estimation et trois méthodes de simulation stochastique. Les trois méthodes d'interpolation sont: a) le voisin le plus proche (NN), une version pondérée de la méthode de la distance inverse (IDW) et le krigeage ordinaire (OK). Les trois méthodes de simulations utilisent les réseaux neuroniques artificiels (ANN). Dans la méthode NN, on utilise simplement la valeur du point le plus proche. Pour la IDW, on estime la valeur en un point en calculant une moyenne pondérée des valeurs de radiation à tous les autres points. Le poids d'une station est inversement proportionnel à l'inverse de la distance entre ce point et celui pour lequel nous désirons obtenir une estimation. Dans le OK, on commence par calculer les corrélations entre chacun des points, pour chacune des variables. On construit par la suite un semi-variogramme, i.e. une fonction qui décrit la corrélation en fonction des distances entre chaque point. Ces corrélations sont ensuite utilisées comme poids dans le calcul des moyennes pondérées, au lieu de la distance inverse. Pour une description exhaustive des semi-variogrammes, voir le livre de Journel et Huijbregts (1978). On trouvera plus d'informations sur les différents types de krigeage dans l'excellent livre de Davis (1978). Ce livre décrit aussi toutes les méthodes usuelles d'interpolation.

Les réseaux neuroniques sont de plus en plus utilisés afin de développer des modèles stochastiques prédictifs; pour plus de détails sur ces réseaux voir le livre d'Haykin (1994). Nous avons donc comparés trois modèles de réseaux neuroniques utilisant des variables météorologiques locales : la température journalière maximale (T_{max}), la température journalière minimale (T_{min}) et l'humidité relative (H). R_a est la radiation solaire incidente à la surface de l'atmosphère. Les trois réseaux neuroniques utilisent une combinaison de ces variables.

$$\hat{R} = ANN(T_{max}, T_{min}, R_a)$$

$$\hat{R} = ANN(H, R_a)$$

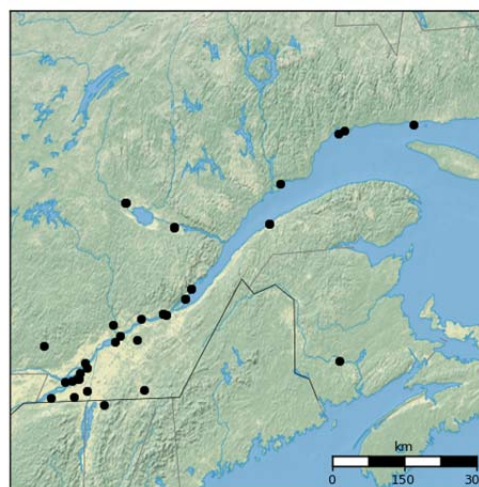


Figure A1.1 Stations où la radiation solaire est mesurée dans l'est du Canada.

$$\hat{R} = ANN(T_{\max}, T_{\min}, H, R_a)$$

Une comparaison entre les valeurs observées à 19 stations (Tableau A1.1) et les valeurs des mêmes variables estimées à partir des autres variables météorologiques observées à ces stations est présentée sur la figure A1.2. En résumé, les modèles géostatistiques donnent de meilleurs résultats pour les stations localisées dans une région où beaucoup de stations de mesures sont disponibles, tandis que les modèles stochastiques produisent de meilleurs résultats dans les régions où il y a peu de stations météorologiques. La méthode stochastique produit les meilleurs résultats quand nous utilisons à la fois la température et l'humidité relative. Nous avons donc utilisé les stations les plus proches pour tous les lacs, sauf pour le lac Stewart pour lequel nous avons utilisé les réseaux neuroniques et la fonction ANN(T_{\max} , T_{\min} , H , R_a). Plus de détails sur les méthodes et l'analyse des résultats seront disponibles dans Jeong et al. (en préparation).

A1.2 Utilisation des données produites par les réanalyses NARR

Nous avons été obligés d'utiliser les couvertures nuageuses produites par le NAAR : *North American Regional Reanalysis project*. En effet, les données de couvertures nuageuses sont très rares et les interpolations sont tellement mauvaises qu'elles sont inutilisables. Les observations sont rares car elles sont habituellement obtenues visuellement par un observateur. Les champs météorologiques générés par le projet NARR sont les mêmes que ceux qui sont produits par les modèles prévisionnels usuels mais ils sont obtenus *a posteriori* par assimilation des observations. Ces champs sont disponibles huit fois par jour pour la période 1979 à 2010. Même si les prévisions ne sont toujours pas aussi bonnes que les observations, ces champs sont distribués sur une grille d'environ 32 km par 32 km, ce qui les rend très utiles là où il y a peu de stations météorologiques. Les données NARR sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.narr.monolevel.html>

Nous avons utilisés les champs NARR pour obtenir la couverture nuageuse aux quatre lacs choisis car la couverture nuageuse est un paramètre très important du modèle : elle diminue la quantité de radiation solaire qui pénètre jusqu'à la surface du lac. Nous avons aussi utilisé les champs NARR pour nos simulations des régimes thermiques présents et futurs dans les huit lacs théoriques. Afin de nous assurer que notre choix était « raisonnable », nous avons comparé les observations avec les résultats des simulations NARR à la position de chacun des lacs choisis, pour la période 1971-2010. Cette comparaison est présentée dans le tableau A1.2. Sans surprise, nous observons que les estimations NARR sont généralement bonnes, sauf pour les précipitations et les vitesses du vent, un problème connu mais incontournable.

Références

- Davis, J. C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd ed, John Wiley & Sons. New York, 289 p.
- Haykin, S., 1994. *Neural networks*. MacMillan College Publishing Company.
- Jeong, D.I., A. St-Hilaire, C. Bélanger et Y. Gratton (en préparation). *Simulation and regionalization of daily global solar irradiation: A case study in Québec, Canada*.
- Journel, A.G. and Ch. J. Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York, 600 p.

Tableau A1.1. Numéro de station, localisation (latitude, longitude et altitude), périodes d'analyse (périodes de calibration et de validation), et moyenne annuelle de la radiation solaire globale journalière (GSR) pendant la période d'analyse, à chacune des 19 stations d'observation.

No.	Station #	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Altitude (m)	Période Calibration	Période Validation	Moyenne annuelle GSR (MJ/m ² /day)
1	7022579	45.05	72.86	152.4	2003-2008	2009-2010	11.54
2	702FQLF	45.12	74.29	49.1	2003-2008	2009-2010	12.81
3	702LED4	45.29	73.35	43.8	2003-2008	2009-2010	13.24
4	7024280	45.37	71.82	181.0	2003-2008	2009-2010	11.63
5	702S006	45.47	73.74	32.1	2003-2008	2009	12.51
6	702327X	45.72	73.38	17.9	2003-2008	2009-2010	13.08
7	7025442	46.23	72.66	8.0	2003-2008	2009-2010	12.57
8	7011983	46.69	71.97	61.0	2003-2008	2009-2010	12.24
9	701Q004	46.78	71.29	91.4	2003-2008	2009-2010	11.06
10	7041JG6	47.08	70.78	6.0	2003-2008	2009-2010	11.91
11	7086716	48.25	79.03	318.0	2003-2008	2009-2010	11.77
12	7056068	48.51	68.47	4.9	2003-2008	2009-2010	12.31
13	7065639	48.84	72.55	137.2	2003-2008	2009-2010	12.77
14	7047912	50.22	66.25	53.1	2003-2007	2008	11.19
15	7044328	50.27	64.23	11.0	2003-2008	2009-2010	11.06
16	7095480	53.20	70.90	536.1	1977-1982	1983-1984	11.19
17	7093GJ3	53.76	73.68	306.3	1987-1992	1993-1994	10.94
18	7113E37	58.10	68.42	39.3	1987-1992	1993-1994	10.29
19	7103282	58.47	78.08	24.4	1985-1990	1991-1992	10.92

Table A1.2 Comparaison entre les observations et les réanalyses NARR pour la période allant de 1971 à 2010.

- μ_O , SD_O : moyennes et déviations standard des observations
- μ_N , SD_N : moyennes et déviations standard des réanalyses
- MBE: erreur moyenne des biais
- RMSE: erreur quadratique moyenne
- R-carré: coefficient de détermination

Lacs	Variables	μ_O	μ_N	SD_O	SD_N	MBE	RMSE	R-carré
BED	Température (°C)	3.1	1.0	11.8	12.4	2.1	3.7	0.94
	Pression (hPa)	961.3	932.4	7.9	8.4	28.9	29.1	0.83
	Humidité relative (%)	79.2	73.6	10.1	13.3	5.6	12.0	0.38
	Précipitations (mm)	3.5	6.3	5.1	8.9	-2.9	8.8	0.15
	Vitesse du vent (m/sec)	5.2	3.3	2.6	1.9	2.0	3.2	0.18
	Couverture nuageuse (prob.)	0.6	0.7	0.3	0.3	-0.1	0.2	0.45
	Radiation solaire (MJ m ⁻² day ⁻¹)	14.0	12.8	8.2	8.1	1.2	4.1	0.79
	Fréquence des précipitations	0.3	0.5	0.5	0.5	-0.1	0.6	0.13
JAC	Température (°C)	0.9	0.8	11.8	12.5	0.1	2.9	0.95
	Pression (hPa)	938.5	920.8	7.9	8.0	17.7	17.9	0.91
	Humidité relative (%)	80.3	74.8	10.1	13.1	5.5	12.2	0.34
	Précipitations (mm)	3.5	6.1	5.1	8.7	-2.6	8.5	0.16
	Vitesse du vent (m/sec)	5.0	3.1	2.4	1.7	2.0	2.9	0.25
	Couverture nuageuse (prob.)	0.6	0.7	0.3	0.3	-0.1	0.2	0.53
	Radiation solaire (MJ m ⁻² day ⁻¹)	15.2	13.2	8.6	8.3	2.0	4.4	0.79
	Fréquence des précipitations	0.4	0.5	0.5	0.5	-0.1	0.6	0.13
CHI	Température (°C)	1.1	0.6	13.2	13.5	0.5	3.5	0.93
	Pression (hPa)	972.3	967.0	7.7	8.1	5.2	6.0	0.87
	Humidité relative (%)	79.9	72.3	10.0	14.1	7.5	13.9	0.34
	Précipitations (mm)	3.7	5.2	4.6	10.7	-1.5	10.9	0.04
	Vitesse du vent (m/sec)	3.5	3.4	1.7	1.4	0.1	1.7	0.18
	Couverture nuageuse (prob.)	0.7	0.7	0.3	0.3	0.0	0.2	0.38
	Radiation solaire (MJ m ⁻² day ⁻¹)	13.2	13.0	8.2	7.1	0.2	4.1	0.75
	Fréquence des précipitations	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5	0.20
STW	Température (°C)	-4.3	-4.9	13.2	13.9	0.6	3.3	0.95
	Pression (hPa)	1005.0	1006.9	9.4	9.8	-1.9	3.4	0.92
	Humidité relative (%)	82.0	73.1	9.3	11.1	8.9	13.3	0.29
	Précipitations (mm)	3.1	3.0	3.3	4.4	0.1	3.6	0.33
	Vitesse du vent (m/sec)	3.6	4.0	1.9	2.0	-0.5	1.6	0.49
	Couverture nuageuse (prob.)	0.7	0.7	0.3	0.3	0.0	0.3	0.24
	Radiation solaire (MJ m ⁻² day ⁻¹)	10.6	10.1	8.3	7.6	0.5	4.1	0.76
	Fréquence des précipitations	0.4	0.3	0.5	0.5	0.1	0.5	0.28

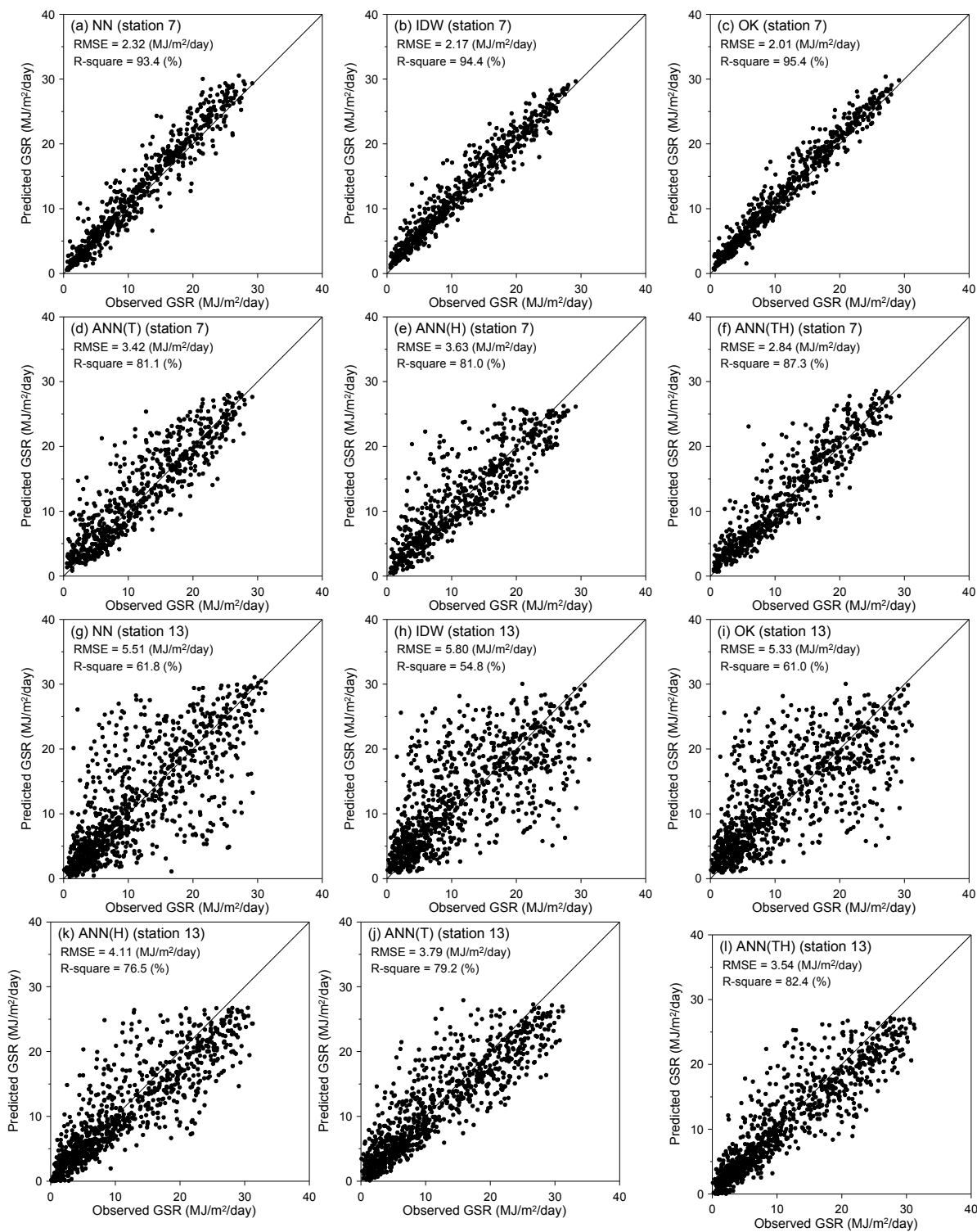


Figure A1.2 Comparaison pour les stations 7 et 13 (voir le Tableau A.1.1) entre les valeurs mesurées (abscisse) et les valeurs simulées (ordonnées) par les six méthodes utilisées.

Annexe 2

Scénarios climatiques et la méthode des deltas

Nous avons utilisé les scénarios climatiques produits par Ouranos pour forcer le modèle MyLAKE et ainsi estimer les températures lacustres pour les périodes 2041-2070 et 2071-2100. Ces scénarios ont été préparés par David Huard d'Ouranos. Le rapport de David Huard est inclus en entier à partir de la page suivante.



CONSORTIUM SUR LA CLIMATOLOGIE RÉGIONALE
ET L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

www.ouranos.ca

Scénarios climatiques pour l'habitat des salmonidés

OURANOS est un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, initiative conjointe du gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et du service météorologique du Canada avec la participation de l'UQAM, de l'INRS et des universités Laval et McGill.

SCEN-No. 2012-06

©2012, Ouranos

Scénarios climatiques pour l'habitat des salmonidés

Auteurs : David Huard

Contributeurs : Diane Chaumont

Résumé

Ce document présente la méthode de production des scénarios climatiques ainsi qu'une brève analyse des principales caractéristiques des changements projetés.

Table des matières

Table des matières	v
1 Introduction	1
2 Sélection des simulations	3
3 Analyse des simulations	7
3.1 Calcul des deltas	8
3.2 Validation avec les observations	8
3.3 Calcul du biais	8
3.4 Changements climatiques projetés	9
4 Conclusion	11
Bibliographie	13
A Validation des simulations en climat de référence	17
B Estimation des changements climatiques	23
C Portrait des simulations utilisées	29
D Acronymes	31

1 Introduction

Dans le cadre du projet “Habitats des salmonidés”, Ouranos a été sollicité pour fournir des scénarios de changements climatiques devant servir à étudier l'évolution des conditions bio-climatiques des lacs du Québec. Les salmonidés requièrent des conditions de température et d'oxygène dissous qui, dans un climat plus chaud, pourraient être menacées. Le projet consiste donc à calibrer un modèle physique de lac (MyLake) sur des observations, puis de le piloter par des scénarios de changements climatiques afin d'évaluer l'impact de ces changements sur le profil de température du lac. Ce rapport décrit la méthodologie de construction de ces scénarios climatiques en plus de présenter une brève analyse des principaux changements attendus aux variables climatiques pertinentes. Il est bon de rappeler que cette étude se veut une de sensibilité, ce qui implique qu'on ne cherche pas le comportement futur le plus probable, mais une plage de futurs plausibles.

Les lacs choisis pour cette étude sont présentés dans le tableau 1.1. En plus de ces cinq lacs, huit lacs *synthétiques* ont été définis le long d'un transect Nord-Sud afin d'étudier la progression des conditions à mesure que l'on se déplace vers le Nord du Québec. Ces lacs synthétiques sont illustrés à la figure 1.

Tab. 1.1 : Coordonnées des lacs

Lac	Latitude	Longitude
Lac Bédard	47° 16' 19.20" N	71° 7' 23.88" W
Lac Jacques-Cartier	47° 35' 1.00" N	71° 13' 12.00" W
Lac Stewart	58° 11' 7.40" N	68° 25' 51.40" W
Lac des 31-Milles	46° 9' 50.00" N	75° 47' 29.00" W
Lac des Aulnes	47° 9' 54.50" N	72° 7' 37.50" W

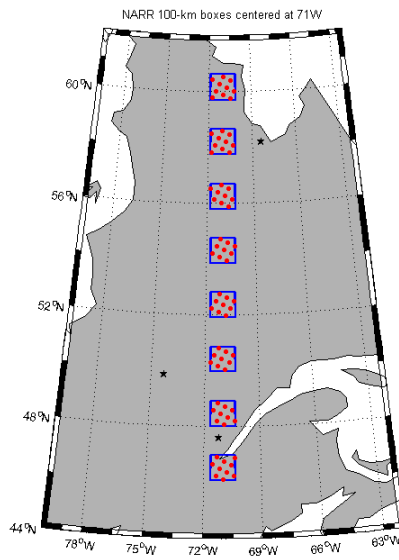


Fig. 1.1 : Position des lacs synthétiques le long d'un transect Nord-Sud.

2 Sélection des simulations

Toutes les simulations régionales disponibles sur le Québec et pour lesquelles les variables de pilotages étaient disponibles ont été considérées dans l'étape de sélection (voir le tableau 2.1). Les simulations régionales ont été préférées aux simulations globales afin d'obtenir un portrait plus détaillé des différents climats du Québec le long d'un gradient Nord-Sud. L'ensemble comprend donc les simulations produites à Ouranos ainsi que celles contribuées par les différents groupes participant au projet NARCCAP (*Mearns et al.*, 2009; *Mearns*, 2007, updated 2011). Plus spécifiquement, l'ensemble comprend six Modèles de Climat Globaux (MCG) différents : le Modèle couplé climatique global du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique (MCCG)(*Scinocca et al.*, 2008; *Flato et al.*, 2000), le Modèle global couplé du Max-Planck-Institut (ECHAM5)(*Jungclaus et al.*, 2006; *Roeckner et al.*, 2003), le Modèle global couplé du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM CM3)(*Salas-Mélias et al.*, 2005), le Community Climate System Model version 3 (CCSM3)(*Collins et al.*, 2006), le Hadley Centre Coupled Model version 3 (HadCM3)(*Gordon et al.*, 2000; *Pope et al.*, 2000) et le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model version 2 (GFDL CM2)(*GAMDT*, 2004). Ces MCG pilotent quatre Modèles Régionaux de Climat (MRC) : le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC)(*de Elía and Côté*, 2010; *Caya and Laprise*, 1999), le Weather Research & Forecasting Model (WRF)(*Skamarock et al.*, 2005), le Hadley Regional Model version 3 (HadRM3P)(*Jones et al.*, 2003) et le Regional Climate Model version 3 (RegCM3)(*Giorgi et al.*, 1993a,b; *Pal et al.*, 2007). Cependant, il est pertinent de rappeler que l'ensemble de simulations régionales ne couvre qu'une partie des réponses climatiques plausibles couvertes par l'ensemble CMIP3 (*Meehl et al.*, 2007) de modèles globaux. Cette couverture est illustrée à la figure 2.1 pour le changement de température et de précipitation à l'échelle annuelle. Cette sous-représentation est justifiée du fait que le projet est à l'étape d'étude de sensibilité. Une vue d'ensemble des choix de sélection des modèles est donnée à l'appendice C.

La sélection des modèles s'est fait sur la base d'indicateurs climatiques qui, *a priori*, ont une influence sur la température des lacs du Québec. Ces variables sont : la température estivale maximale, la température estivale minimale, la pointe estivale de vent, les degrés-jours de chaleur en été (mois de juin, juillet et août), les degrés-jours de froid en hiver (mois de décembre, janvier et février), la précipitation estivale ainsi que la précipitation hivernale. Pour chacune de ces variables, les changements climatiques moyens projetés par dif-

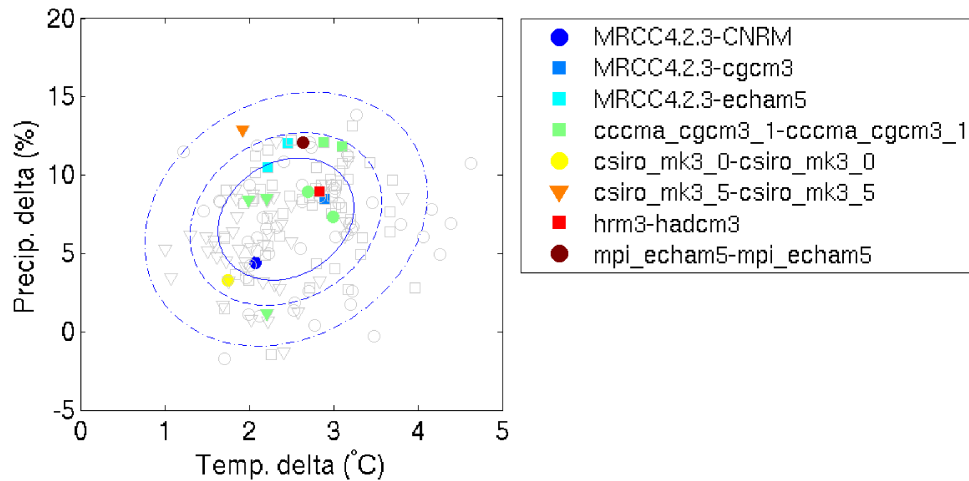


Fig. 2.1 : Changements projetés par l'ensemble des modèles régionaux disponibles à Ouranos par rapport à l'ensemble des modèles globaux participant à CMIP3. Les changements projetés (deltas) sont calculés sur le Sud du Québec à l'échelle annuelle.

férentes simulations climatiques ont été calculées au point de grille le plus proche du Lac Stewart (voir Tableau 1.1). Les changements aux indicateurs décrits plus hauts sont calculés entre la période future (2041–2070) et la période de référence (1961–2000) et sont illustrés à la figure 2.2.

Suite à une série de discussions avec les membres du projet, les simulations agx/agz, ahi/ahk et aet/aeu ont été sélectionnés pour faire des premiers tests. Lors de l'extraction des données de pilotage, certains champs de forçage se sont avérés manquants et la simulation aeu a été remplacée par aet, une simulation jumelle pilotée par la même simulation globale et dont les caractéristiques sont semblables. Les séries ont cette fois été extraites pour les variables de pilotage du modèle de lac MyLake, soit : la radiation solaire, la température de surface, l'humidité spécifique, la pression à la surface, la vitesse du vent de surface (10m), la précipitation et la couverture nuageuse. Les variables sont archivées en format natif CCC aux 3 ou 6 heures selon la simulation, et ont été agrégées à l'échelle journalière avant d'être converties en format netCDF. Un fichier a été créé pour chaque lac, comprenant de 4 à 6 points de grille.

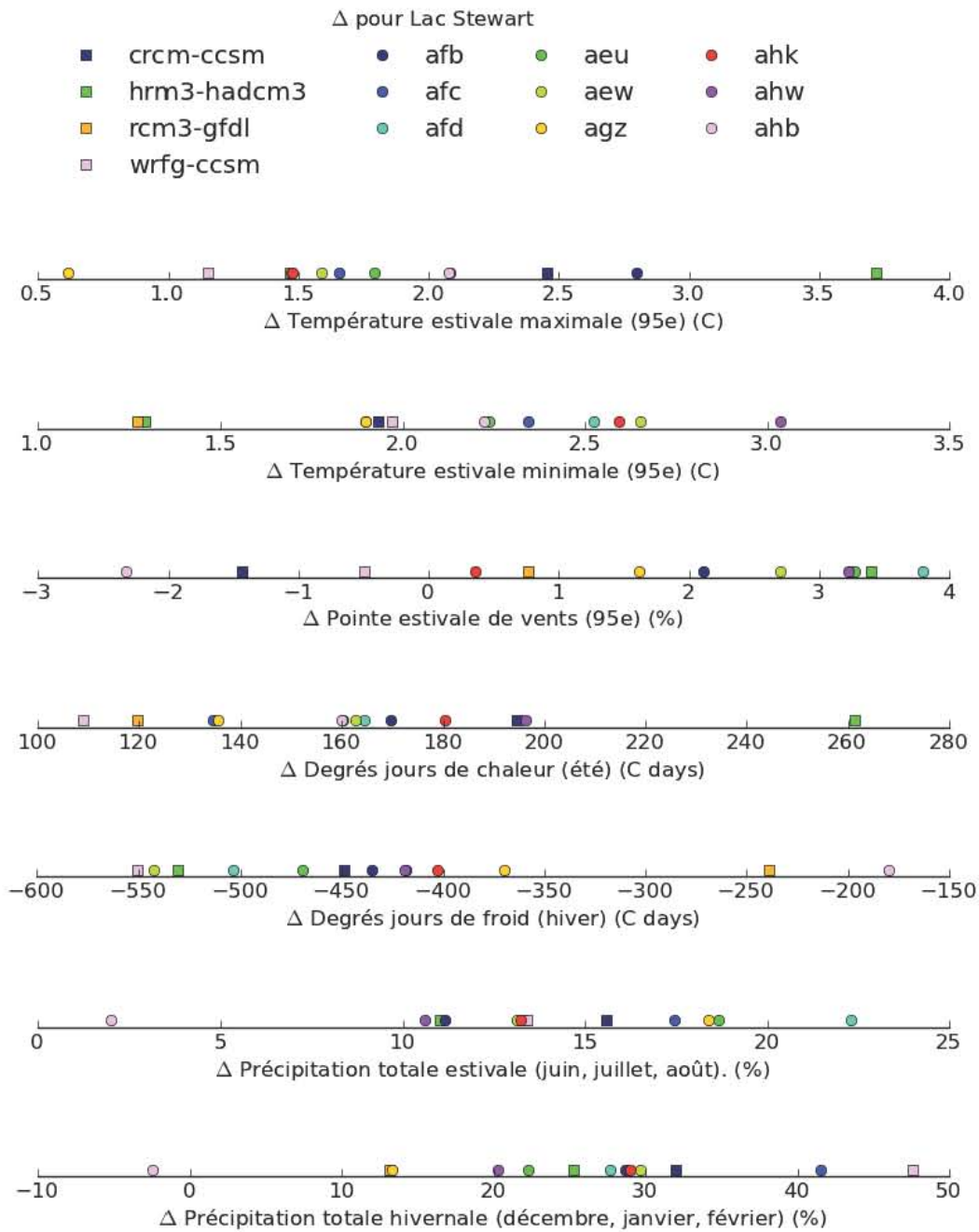


Fig. 2.2 : Changements projetés (deltas) aux indicateurs climatiques pouvant avoir, *a priori*, une influence sur la température des lacs. Les deltas sont calculés au point de grille le plus proche du Lac Stewart pour toutes les simulations du tableau 2.1 entre la période future (2041-2070) et celle de référence 1961-2000).

Tab. 2.1 : Détails des simulations régionales choisies.

Pilote	MRC	Scénario	Alias MRCC	
			Référence	2041–2070
CGCM3.1 ^a #1	CRCM4.2.3	A2	aey	afb
CGCM3.1 #2	CRCM4.2.3	A2	aez	afc
CGCM3.1 #3	CRCM4.2.3	A2	afa	afd
CGCM3.1 #4	CRCM4.2.3	A2	aet	aet
CGCM3.1 #5	CRCM4.2.3	A2	aev	aew
ECHAM5 #1	CRCM4.2.3	A2	agx	agz
ECHAM5 #2	CRCM4.2.3	A2	ahi	ahk
ECHAM5 #3	CRCM4.2.3	A2	ahj	ahw
CNRM-CM3.3 #1	CRCM4.2.3	A1B	agw	ahb
CCSM3 ^b	CRCM4.2.0	A2	ahs	aht
CCSM3	WRF	A2		
HadCM3 ^c	HadRM3P	A2		
GFDL CM2.1	RegCM3	A2		

^aRésolution T47.

^bSimulations b30.030e (référence) et b30.042e (futur).

^cMembres #2 (référence) et #1 (futur).

3 Analyse des simulations

Bien qu'il soit toujours possible d'utiliser les données brutes des simulations pour forcer un modèle d'impact (ici le modèle MyLake), c'est une option déconseillée *Wood et al. (2004)*; *Ines and Hansen (2006)*; *Christensen et al. (2008)*. La raison principale tient au fait que les sorties de modèles climatiques comprennent habituellement des biais par rapport aux observations, surtout à des échelles régionales. Par exemple, pour une région donnée, il n'est pas étonnant que la température moyenne soit de deux ou trois degrés Celsius supérieure ou inférieure à la température moyenne observée. Ces biais varient en fonction des modèles utilisés, et une première mesure à prendre consiste à évaluer un ensemble de simulations de plusieurs modèles différents plutôt que les simulations d'un seul modèle.

Une première approche consiste à corriger ces biais systématiques. La méthode usuelle consiste à calculer sur une base mensuelle ou saisonnière la différence entre les observations et les sorties d'une simulation climatique au cours de la période d'observation, puis de soustraire ces différences aux simulations futures. On obtient ainsi des séries d'un modèle corrigées. L'hypothèse qui est posée est que le biais reste constant en climat futur. La validité de cette hypothèse est débattue et il est hasardeux de s'y fier uniquement (*Buser et al., 2009*; *Ehret et al., 2012*).

Une deuxième approche consiste à calculer la différence entre les simulations climatiques en climat futur par rapport au climat de référence. Ces différences, communément appelées deltas, sont ensuite appliquées aux séries observées afin de générer des scénarios en climat futur. Cette fois ci, ce sont les observations qui sont corrigées par la méthode des deltas.

Les méthodes des deltas et de correction de biais comportent chacune des avantages et des inconvénients. La correction de biais assume que les biais sont constants dans le temps. La méthode des deltas, si elle est utilisée pour un ensemble de projections, génère des scénarios tous basés sur la même série observée. Dans certains contextes, l'une ou l'autre peuvent être plus appropriée, mais en cas de doute, il peut-être prudent de recourir aux deux approches afin de s'assurer que les conclusions générales restent les mêmes. Dans le présent travail, c'est la méthode des deltas qui est principalement utilisée. Pour un lac (Jacques-Cartier) et deux simulations (aev, agx), la méthode des biais est employé afin de comparer les résultats et de pouvoir mettre à profit les longues séries continues (2000-2100) disponibles.

TAB. 3.1 : Les deltas, comme les biais, sont additifs (+) ou multiplicatifs (×) selon la variable considérée.

Variable	Radiation solaire	Température	Humidité spécifique	Pression	Vitesse du vent	Précipitation	Couverture nuageuse
Δ	+	+	+	+	×	×	+

3.1 Calcul des deltas

Les deltas sont calculés à l'échelle saisonnière en comparant les moyennes des valeurs journalières appartenant à chaque saison du climat futur par rapport au climat de référence. Les deltas sont additifs ou multiplicatifs selon la variable, tel qu'indiqué au tableau 3.1. Les deltas sont calculés en faisant la moyenne des membres. C'est-à-dire que l'on calcule la moyenne de tous les membres en climat futur par rapport à la moyenne de tous les membres en climat de référence. De cette manière, si l'ensemble est suffisamment grand, on minimise les variations dues à la variabilité naturelle du climat. Dans le cas du modèle Modèle couplé climatique global du Canada (CGCM3), on dispose de cinq simulations alors que dans le cas du modèle CNRM CM3, une seule est disponible. On peut donc s'attendre à ce que la variabilité naturelle soit largement éliminée des deltas du CGCM3 alors qu'elle joue fort probablement un effet dans le cas du CNRM CM3.

3.2 Validation avec les observations

Deux types de données d'observations utilisées dans ce projet : les données aux stations interpolées aux lacs, les données de réanalyse North American Regional Reanalysis (NARR). Les tableaux A.1 à A.5 comparent les moyennes observées et simulées pour les cinq lacs choisis. Les différences entre les simulations et les observations sont en général du même ordre de grandeur que les différences entre les observations aux stations (EC) et les réanalyses NARR. Une exception notable est le lac Stewart, où le biais de température pour le CGCM3 atteint 7°C en hiver.

3.3 Calcul du biais

Les méthodes de calcul pour le biais sont en tout point similaires à celles des deltas, à l'exception que les facteurs de corrections sont calculés entre les simulations de référence et les observations. Les biais sont disponibles dans

les fichiers Excel livrés avec le rapport. Les biais ont été calculés à la fois par rapport aux observations d'EC! (EC!) et par rapport aux réanalyses NARR. Ces biais devront être appliqués aux séries projetées par le modèle régional afin d'obtenir des scénarios en climat futur débiaisés. Ces séries ont également été livrées en format netCDF avec le rapport pour deux simulations le lac Jacques-Cartier.

3.4 Changements climatiques projetés

Les changements climatiques sont décrits par des “deltas”, dans ce cas-ci des changements aux moyennes climatiques saisonnières calculées entre les simulations en climat de référence et les projections en climat futur. Les valeurs des deltas, calculés sur les membres pilotés par le même MCG sont données aux tableaux B.1 à B.5. Les résultats sont cohérents avec les conclusions du rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (*Christensen et al.*, 2007), soit que les températures de l'Amérique du Nord vont en augmentant, et que cette augmentation est plus prononcée à mesure que l'on s'approche du Nord. Pour ce qui est des précipitations, les modèles climatiques projettent leur augmentation, particulièrement au Nord du Québec. Pour le Sud du Québec, les projections indiquent une augmentation hivernale mais le *statu quo* ou une légère diminution l'été. Pour ce qui est de l'humidité spécifique, on constate une légère augmentation, ce qui est cohérent avec l'augmentation des températures. La radiation solaire semble diminuer légèrement l'hiver et augmenter l'été, en adéquation avec la couverture nuageuse dont le comportement est inversé. Les changements de vitesse du vent paraissent insignifiant, tout comme les changements de pression.

4 Conclusion

Ce rapport présente la méthodologie employée pour construire des scénarios de changements climatiques sur cinq lacs du Québec et huit lacs synthétiques. Une brève analyse des résultats est présentée pour les cinq lacs synthétiques.

Bibliographie

- Buser, C., H. Künsch, D. Lüthi, M. Wild, and C. Schär (2009), Bayesian multi-model projection of climate: bias assumptions and interannual variability, *Climate Dynamics*, 33(6), 849–868, doi:10.1007/s00382-009-0588-6.
- Caya, D., and R. Laprise (1999), A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM, *Monthly Weather Review*, 127, 341–362.
- Christensen, J., et al. (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chap. Regional Climate Projections, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Christensen, J. H., F. Boberg, O. B. Christensen, and P. Lucas-Picher (2008), On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, 35(20), L20709, doi:10.1029/2008GL035694.
- Collins, W. D., et al. (2006), The community climate system model version 3 (ccsm3), *J. Climate*, 19(11), 2122–2143.
- de Elía, R., and H. Côté (2010), Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America, *Meteorologische Zeitschrift*, 19(4), 325–339.
- Ehret, U., E. Zehe, V. Wulfmeyer, K. Warrach-Sagi, and J. Liebert (2012), Hess opinions” should we apply bias correction to global and regional climate model data?”, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 9, 5355–5387.
- Flato, G. M., G. J. Boer, W. G. Lee, N. A. McFarlane, D. Ramsden, M. C. Reader, and A. J. Weaver (2000), The canadian centre for climate modelling and analysis global coupled model and its climate, *Climate Dynamics*, 16, 451–467, doi:10.1007/s003820050339.
- GAMDT, G. (2004), The new gfdl global atmospheric and land model am2-lm2: Evaluation with prescribed sst simulations, *Journal of Climate*, 17, 4641–4673, the GFDL Global Model Development Team.
- Giorgi, F., M. Marinucci, and G. Bates (1993a), Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes, *Monthly Weather Review*, 121(10).

- Giorgi, F., M. Marinucci, G. Bates, and G. De Canio (1993b), Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). II : Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions, *Monthly Weather Review*, *121*(10), 2814-2832.
- Gordon, C., C. Cooper, C. Senior, H. Banks, J. Gregory, T. Johns, J. Mitchell, and R. Wood (2000), The simulation of sst, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the hadley centre coupled model without flux adjustments, *Climate Dynamics*, *16*(2), 147-168.
- Ines, A. V., and J. W. Hansen (2006), Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, *Agricultural and Forest Meteorology*, *138*, 44-53, doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.009.
- Jones, R., D. Hassell, D. Hudson, S. Wilson, G. Jenkins, and J. Mitchell (2003), Generating high resolution climate change scenarios using precis, *Tech. rep.*, Hadley Centre for Climate Prediction and Research.
- Jungclaus, J., N. Keenlyside, M. Botzet, H. Haak, J. Luo, M. Latif, J. Marotzke, U. Mikolajewicz, and E. Roeckner (2006), Ocean circulation and tropical variability in the coupled model echam5/mpicom, *Journal of Climate*, *19*(16), 3952-3972.
- Mearns, L. O. (2007, updated 2011), The north american regional climate change assessment program dataset, National Center for Atmospheric Research Earth System Grid data portal, doi:10.5065/D6RN35ST, data downloaded 2011.
- Mearns, L. O., W. J. Gutowski, R. Jones, L.-Y. Leung, S. McGinnis, A. M. B. Nunes, and Y. Qian (2009), A regional climate change assessment program for north america, *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, *90*, 311-312, doi:10.1029/2009EO360002.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor (2007), The WCRP CMIP3 multi-model dataset : A new era in climate change research, *Bulletin of the American Meteorological Society*, *88*, 1383-1394, doi:10.1175/BAMS-88-9-1383.
- Pal, J., et al. (2007), Regional climate modeling for the developing world : The ICTP RegCM3 and RegCNET, *Bulletin of the American Meteorological Society*, *88*(9), 1395-1409.

- Pope, V. D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree, and R. A. Stratton (2000), The impact of new physical parametrizations in the hadley centre climate model : Hadam3, *Climate Dynamics*, 16, 123-146, 10.1007/s003820050009.
- Roeckner, E., et al. (2003), The atmospheric general circulation model echam5 : Model description, *Tech. Rep. 349*, Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Salas-Mélia, D., F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, J. Gueremy, P. Marquet, S. Planton, J. Royer, and S. Tyteca (2005), Description and validation of the cnrm-cm3 global coupled model, *CNRM working note 103*, Centre National de Recherches Météorologiques.
- Scinocca, J. F., N. A. McFarlane, M. Lazare, J. Li, and D. Plummer (2008), Technical Note : The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(23), 7055-7074.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers (2005), A description of the advanced research wrf version 2, *NCAR TECHNICAL NOTE 468+STR*, NCAR.
- Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmaier (2004), Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Climatic Change*, 62(1), 189-216, doi:10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e.

A Validation des simulations en climat de référence

Tab. A.1 : Moyennes saisonnières au Lac Jacques-Cartier des observations aux stations (EC), des réanalyses (NARR) et des simulations climatiques au cours de la période de référence, moyennées sur les membres.

Saison	Variable	EC	NARR	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Température [K]	258.8	259.8	256.7	257.5	257.3
	Précipitation [mm]	2.8	1.2	1.8	1.7	1.2
	Radiation solaire [W/m ²]	70.5	85.2	56.8	52.7	54.1
	Couverture nuageuse [%]	68.0	58.1	62.9	69.9	68.4
	Vitesse du vent [m/s]	3.2	5.4	3.9	3.8	3.7
	Humidité relative [%]	75.5	83.3	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	1.2	1.2	1.1
	Pression [kPa]	91.6	93.5	94.8	95.2	94.6
Spring	Température [K]	273.1	272.5	270.5	273.1	272.0
	Précipitation [mm]	3.1	1.9	2.4	2.3	2.3
	Radiation solaire [W/m ²]	201.9	218.4	190.9	185.4	182.5
	Couverture nuageuse [%]	66.1	59.8	57.1	61.5	58.8
	Vitesse du vent [m/s]	3.4	5.0	3.8	3.7	3.7
	Humidité relative [%]	69.1	77.2	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	2.7	3.4	3.0
	Pression [kPa]	92.0	93.8	94.9	95.3	95.1
Summer	Température [K]	287.5	286.9	285.2	286.3	286.1
	Précipitation [mm]	4.2	2.9	3.9	3.7	4.0
	Radiation solaire [W/m ²]	238.6	273.5	213.9	202.8	202.7
	Couverture nuageuse [%]	64.7	50.8	67.7	74.4	72.0
	Vitesse du vent [m/s]	2.7	4.4	3.8	3.6	3.2
	Humidité relative [%]	74.9	78.4	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	7.7	8.5	8.5
	Pression [kPa]	92.2	94.0	95.1	95.4	95.3
Fall	Température [K]	276.3	276.1	274.6	273.9	273.6
	Précipitation [mm]	4.2	2.5	2.8	2.5	2.1
	Radiation solaire [W/m ²]	100.2	125.9	91.6	85.9	85.4
	Couverture nuageuse [%]	73.7	60.6	70.5	76.9	76.6
	Vitesse du vent [m/s]	3.1	5.3	4.1	3.9	3.3
	Humidité relative [%]	79.5	82.4	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	4.4	4.3	4.3
	Pression [kPa]	92.2	94.0	95.3	95.4	95.1

Tab. A.2 : Moyennes saisonnières au lac Bédard des observations aux stations (EC), des réanalyses (NARR) et des simulations climatiques au cours de la période de référence, moyennées sur les membres.

Saison	Variable	EC	NARR	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Température [K]	259.1	261.7	257.4	258.1	257.9
	Précipitation [mm]	2.9	1.2	1.9	1.7	1.2
	Radiation solaire [W/m ²]	68.3	79.9	60.5	56.9	58.5
	Couverture nuageuse [%]	68.2	62.1	58.1	64.5	61.8
	Vitesse du vent [m/s]	3.4	5.7	3.7	3.6	3.6
	Humidité relative [%]	74.7	84.3	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	1.2	1.3	1.2
	Pression [kPa]	92.8	95.9	95.8	96.1	95.5
Spring	Température [K]	273.2	274.7	271.0	273.6	272.5
	Précipitation [mm]	3.1	1.8	2.4	2.3	2.3
	Radiation solaire [W/m ²]	193.5	201.2	193.6	189.0	185.1
	Couverture nuageuse [%]	66.5	63.2	55.6	59.2	57.2
	Vitesse du vent [m/s]	3.6	5.2	3.6	3.5	3.5
	Humidité relative [%]	67.7	75.8	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	2.8	3.5	3.1
	Pression [kPa]	93.2	96.1	95.8	96.3	96.0
Summer	Température [K]	287.7	289.2	285.8	286.9	286.7
	Précipitation [mm]	4.2	2.8	3.6	3.5	3.8
	Radiation solaire [W/m ²]	231.2	254.1	220.9	209.7	208.8
	Couverture nuageuse [%]	64.9	54.4	64.5	71.4	69.5
	Vitesse du vent [m/s]	2.7	4.6	3.7	3.5	3.1
	Humidité relative [%]	73.8	77.4	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	7.9	8.7	8.7
	Pression [kPa]	93.4	96.2	96.0	96.3	96.2
Fall	Température [K]	276.4	278.4	275.3	274.6	274.2
	Précipitation [mm]	4.1	2.3	2.7	2.4	2.1
	Radiation solaire [W/m ²]	99.2	114.1	97.0	91.6	89.6
	Couverture nuageuse [%]	73.5	64.9	66.1	72.4	73.2
	Vitesse du vent [m/s]	3.2	5.5	3.9	3.7	3.2
	Humidité relative [%]	78.2	79.6	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	4.5	4.4	4.4
	Pression [kPa]	93.4	96.3	96.2	96.4	96.0

Tab. A.3 : Moyennes saisonnières au lac des Aulnes des observations aux stations (EC), des réanalyses (NARR) et des simulations climatiques au cours de la période de référence, moyennées sur les membres.

Saison	Variable	EC	NARR	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Température [K]	261.9	261.6	257.6	258.3	258.0
	Précipitation [mm]	2.6	1.4	1.9	1.8	1.2
	Radiation solaire [W/m ²]	63.3	78.6	58.9	55.0	56.4
	Couverture nuageuse [%]	65.8	69.0	62.0	69.0	66.8
	Vitesse du vent [m/s]	3.6	4.7	3.1	3.1	2.9
	Humidité relative [%]	73.2	84.7	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	1.2	1.3	1.2
	Pression [kPa]	94.4	95.4	97.1	97.4	96.8
Spring	Température [K]	276.2	274.8	271.6	274.3	273.2
	Précipitation [mm]	2.9	2.1	2.5	2.5	2.2
	Radiation solaire [W/m ²]	178.0	201.9	194.5	188.9	188.2
	Couverture nuageuse [%]	64.2	65.6	54.8	59.4	55.0
	Vitesse du vent [m/s]	3.6	4.5	3.3	3.2	3.2
	Humidité relative [%]	65.9	75.9	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	2.9	3.7	3.2
	Pression [kPa]	95.3	95.6	97.0	97.5	97.3
Summer	Température [K]	290.4	289.1	286.5	287.6	287.4
	Précipitation [mm]	3.9	3.3	4.0	4.0	4.0
	Radiation solaire [W/m ²]	214.0	260.8	226.4	213.9	219.1
	Couverture nuageuse [%]	63.2	57.4	62.2	70.2	65.5
	Vitesse du vent [m/s]	3.0	3.8	3.6	3.4	3.0
	Humidité relative [%]	72.8	78.7	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	8.3	9.1	9.0
	Pression [kPa]	98.3	95.7	97.1	97.4	97.4
Fall	Température [K]	279.1	278.4	275.7	275.0	274.5
	Précipitation [mm]	3.8	2.8	2.9	2.6	2.1
	Radiation solaire [W/m ²]	92.3	115.9	96.5	91.1	91.0
	Couverture nuageuse [%]	72.4	68.6	66.7	73.2	72.6
	Vitesse du vent [m/s]	3.4	4.5	3.4	3.2	2.7
	Humidité relative [%]	77.0	80.5	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	4.6	4.5	4.5
	Pression [kPa]	95.4	95.8	97.4	97.6	97.3

Tab. A.4 : Moyennes saisonnières au lac des 31-Milles des observations aux stations (EC), des réanalyses (NARR) et des simulations climatiques au cours de la période de référence, moyennées sur les membres.

Saison	Variable	EC	NARR	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Température [K]	262.6	263.9	259.2	259.8	259.4
	Précipitation [mm]	2.0	1.2	1.8	1.7	1.1
	Radiation solaire [W/m ²]	64.9	75.0	63.5	59.4	61.5
	Couverture nuageuse [%]	67.6	71.3	59.8	67.1	64.4
	Vitesse du vent [m/s]	2.5	3.2	3.0	2.9	2.6
	Humidité relative [%]	74.4	83.9	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	1.3	1.4	1.3
	Pression [kPa]	83.1	99.3	98.5	98.8	98.3
Spring	Température [K]	277.2	277.3	273.1	275.9	274.6
	Précipitation [mm]	2.2	2.0	2.4	2.5	2.1
	Radiation solaire [W/m ²]	181.1	202.2	198.9	192.1	196.8
	Couverture nuageuse [%]	64.6	63.3	53.3	59.0	52.1
	Vitesse du vent [m/s]	2.7	3.3	3.2	3.0	2.9
	Humidité relative [%]	64.8	73.6	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	3.2	4.1	3.5
	Pression [kPa]	85.4	99.2	98.4	98.8	98.6
Summer	Température [K]	290.9	291.2	288.4	289.2	289.0
	Précipitation [mm]	2.9	3.0	3.5	3.8	3.4
	Radiation solaire [W/m ²]	217.8	263.6	244.5	229.7	239.6
	Couverture nuageuse [%]	61.2	53.5	57.3	66.6	60.8
	Vitesse du vent [m/s]	2.1	2.7	3.2	3.0	2.7
	Humidité relative [%]	73.2	78.7	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	9.0	9.8	9.7
	Pression [kPa]	95.0	99.2	98.4	98.7	98.6
Fall	Température [K]	279.6	280.5	277.3	276.6	276.3
	Précipitation [mm]	2.9	2.5	2.7	2.5	1.9
	Radiation solaire [W/m ²]	93.5	117.7	103.8	97.2	98.3
	Couverture nuageuse [%]	67.9	66.7	65.3	71.8	71.7
	Vitesse du vent [m/s]	2.4	3.2	3.2	3.0	2.5
	Humidité relative [%]	78.8	79.3	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	5.0	4.9	5.0
	Pression [kPa]	81.3	99.4	98.7	98.9	98.6

Tab. A.5 : Moyennes saisonnières au lac Stewart des observations aux stations (EC), des réanalyses (NARR) et des simulations climatiques au cours de la période de référence, moyennées sur les membres.

Saison	Variable	EC	NARR	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Température [K]	252.0	252.8	245.7	249.3	253.3
	Précipitation [mm]	1.1	1.2	0.7	0.9	1.0
	Radiation solaire [W/m ²]	36.2	35.2	24.3	20.0	20.9
	Couverture nuageuse [%]	61.3	78.4	62.0	73.9	70.9
	Vitesse du vent [m/s]	4.1	3.6	3.8	4.2	4.5
	Humidité relative [%]	68.0	84.2	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	0.4	0.6	0.9
	Pression [kPa]	100.6	100.4	99.8	99.9	99.3
Spring	Température [K]	265.2	265.7	261.6	264.3	266.7
	Précipitation [mm]	1.0	1.3	0.8	1.0	1.0
	Radiation solaire [W/m ²]	182.9	173.4	180.7	167.7	172.6
	Couverture nuageuse [%]	69.5	70.9	55.7	63.3	61.1
	Vitesse du vent [m/s]	4.2	3.4	4.1	4.2	4.3
	Humidité relative [%]	71.1	82.5	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	1.6	2.0	2.2
	Pression [kPa]	101.1	100.9	99.9	100.1	100.2
Summer	Température [K]	283.2	283.4	279.5	280.9	282.9
	Précipitation [mm]	2.0	1.9	1.9	2.2	2.1
	Radiation solaire [W/m ²]	191.1	210.8	182.1	165.5	171.6
	Couverture nuageuse [%]	74.2	66.4	75.1	78.3	76.4
	Vitesse du vent [m/s]	3.7	3.2	4.7	4.8	4.4
	Humidité relative [%]	72.3	75.7	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	5.5	6.2	7.0
	Pression [kPa]	100.5	100.4	99.5	99.7	99.9
Fall	Température [K]	272.9	272.7	267.4	268.8	270.2
	Précipitation [mm]	2.0	2.1	1.6	1.6	1.4
	Radiation solaire [W/m ²]	57.5	69.2	52.4	46.4	50.8
	Couverture nuageuse [%]	80.3	78.3	76.8	83.8	78.6
	Vitesse du vent [m/s]	4.1	4.1	5.3	5.4	4.9
	Humidité relative [%]	79.1	85.9	–	–	–
	Humidité spécifique [g/kg]	–	–	2.6	3.0	3.3
	Pression [kPa]	100.5	100.4	99.5	99.7	99.7

B Estimation des changements climatiques

Tab. B.1 : Changements climatiques saisonniers projetés par trois MCG différents sur le lac Jacques-Cartier. Les variables dont le delta est multiplicatif ont l'unité de %.

Saison	Variable	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Δ Température [°C]	4.2	2.9	2.4
	Δ Précipitation [%]	27	17	10
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-4.2	-3.2	-1.1
	Δ Couverture nuageuse [-]	3.8	4.7	0.4
	Δ Vitesse du vent [%]	2	0	0
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.5	0.3	0.2
	Δ Pression [hPa]	0.0	0.3	-0.3
Spring	Δ Température [°C]	2.7	1.9	1.4
	Δ Précipitation [%]	22	15	4
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-6.8	-7.1	-2.7
	Δ Couverture nuageuse [-]	0.8	3.6	-0.7
	Δ Vitesse du vent [%]	2	1	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.7	0.6	0.4
	Δ Pression [hPa]	0.5	0.2	-0.6
Summer	Δ Température [°C]	2.8	2.3	2.4
	Δ Précipitation [%]	1	5	-2
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	11.2	5.8	13.5
	Δ Couverture nuageuse [-]	-4.4	-1.9	-3.9
	Δ Vitesse du vent [%]	-1	0	-3
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.5	1.4	1.4
	Δ Pression [hPa]	0.9	0.7	0.7
Fall	Δ Température [°C]	3.0	2.6	2.2
	Δ Précipitation [%]	13	9	10
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-1.1	-2.4	-3.1
	Δ Couverture nuageuse [-]	2.6	1.7	2.2
	Δ Vitesse du vent [%]	1	1	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.0	0.9	0.7
	Δ Pression [hPa]	0.9	0.8	0.1

Tab. B.2 : Changements climatiques saisonniers projetés par trois MCG différents sur le lac Bédard. Les variables dont le delta est multiplicatif ont l'unité de %.

Saison	Variable	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Δ Température [°C]	4.1	2.8	2.3
	Δ Précipitation [%]	29	18	9
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-3.9	-2.7	-1.3
	Δ Couverture nuageuse [-]	3.1	4.3	0.3
	Δ Vitesse du vent [%]	2	0	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.5	0.3	0.2
	Δ Pression [hPa]	-0.1	0.2	-0.4
Spring	Δ Température [°C]	2.7	2.0	1.4
	Δ Précipitation [%]	21	14	4
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-6.5	-6.3	-3.2
	Δ Couverture nuageuse [-]	0.4	3.2	-0.7
	Δ Vitesse du vent [%]	2	1	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.8	0.7	0.4
	Δ Pression [hPa]	0.5	0.2	-0.6
Summer	Δ Température [°C]	2.9	2.3	2.4
	Δ Précipitation [%]	1	3	0
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	11.6	6.2	13.1
	Δ Couverture nuageuse [-]	-4.9	-2.4	-3.8
	Δ Vitesse du vent [%]	-2	0	-4
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.5	1.4	1.4
	Δ Pression [hPa]	0.8	0.7	0.6
Fall	Δ Température [°C]	3.0	2.6	2.2
	Δ Précipitation [%]	12	8	8
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-0.8	-2.0	-3.0
	Δ Couverture nuageuse [-]	2.3	1.5	2.4
	Δ Vitesse du vent [%]	1	1	-2
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.0	0.9	0.8
	Δ Pression [hPa]	0.9	0.7	0.1

Tab. B.3 : Changements climatiques saisonniers projetés par trois MCG différents sur le lac des Aulnes. Les variables dont le delta est multiplicatif ont l'unité de %.

Saison	Variable	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Δ Température [°C]	4.2	2.9	2.5
	Δ Précipitation [%]	28	16	9
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-3.8	-3.1	-1.1
	Δ Couverture nuageuse [-]	3.2	4.2	0.1
	Δ Vitesse du vent [%]	3	0	1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.5	0.3	0.3
	Δ Pression [hPa]	-0.3	0.1	-0.5
Spring	Δ Température [°C]	2.8	1.9	1.5
	Δ Précipitation [%]	24	15	8
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-7.1	-7.1	-4.0
	Δ Couverture nuageuse [-]	1.0	3.3	0.2
	Δ Vitesse du vent [%]	2	1	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.8	0.7	0.4
	Δ Pression [hPa]	0.4	0.1	-0.8
Summer	Δ Température [°C]	2.9	2.3	2.4
	Δ Précipitation [%]	0	9	0
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	11.7	5.6	14.7
	Δ Couverture nuageuse [-]	-5.0	-2.3	-4.2
	Δ Vitesse du vent [%]	-2	0	-3
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.6	1.4	1.5
	Δ Pression [hPa]	0.7	0.6	0.5
Fall	Δ Température [°C]	3.0	2.6	2.3
	Δ Précipitation [%]	14	9	12
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-1.2	-1.8	-3.7
	Δ Couverture nuageuse [-]	2.3	1.4	2.6
	Δ Vitesse du vent [%]	1	1	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.1	0.9	0.8
	Δ Pression [hPa]	0.7	0.6	-0.1


Tab. B.4 : Changements climatiques saisonniers projetés par trois MCG différents sur le lac des 31-Milles. Les variables dont le delta est multiplicatif ont l'unité de %.

Saison	Variable	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Δ Température [°C]	4.2	3.0	2.7
	Δ Précipitation [%]	30	14	16
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-3.5	-2.4	-2.3
	Δ Couverture nuageuse [-]	2.8	3.9	0.4
	Δ Vitesse du vent [%]	3	1	2
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.5	0.3	0.3
	Δ Pression [hPa]	-0.7	-0.0	-0.8
Spring	Δ Température [°C]	2.8	2.0	1.4
	Δ Précipitation [%]	23	17	14
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-7.4	-5.9	-8.6
	Δ Couverture nuageuse [-]	1.3	2.9	2.7
	Δ Vitesse du vent [%]	2	1	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.9	0.8	0.5
	Δ Pression [hPa]	0.1	-0.1	-1.0
Summer	Δ Température [°C]	3.1	2.4	2.6
	Δ Précipitation [%]	-7	4	-4
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	12.1	5.8	13.6
	Δ Couverture nuageuse [-]	-5.8	-3.2	-5.9
	Δ Vitesse du vent [%]	-1	-1	-4
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.7	1.6	1.6
	Δ Pression [hPa]	0.5	0.5	0.2
Fall	Δ Température [°C]	2.9	2.4	2.3
	Δ Précipitation [%]	14	8	16
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-0.1	-0.4	-3.8
	Δ Couverture nuageuse [-]	1.5	0.9	2.7
	Δ Vitesse du vent [%]	1	0	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	1.1	0.9	0.9
	Δ Pression [hPa]	0.5	0.5	-0.2

Tab. B.5 : Changements climatiques saisonniers projetés par trois MCG différents sur le lac Stewart. Les variables dont le delta est multiplicatif ont l'unité de %.

Saison	Variable	CGCM3.1	ECHAM5	CNRM-CM3
Winter	Δ Température [°C]	5.2	4.3	1.9
	Δ Précipitation [%]	32	20	-5
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-2.3	-1.9	-0.6
	Δ Couverture nuageuse [-]	5.8	5.1	1.8
	Δ Vitesse du vent [%]	6	7	-4
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.3	0.2	0.1
	Δ Pression [hPa]	-1.4	-1.5	-0.3
Spring	Δ Température [°C]	2.5	2.3	1.3
	Δ Précipitation [%]	23	13	4
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-7.2	-7.1	-5.9
	Δ Couverture nuageuse [-]	1.4	3.3	0.1
	Δ Vitesse du vent [%]	1	1	1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.3	0.4	0.2
	Δ Pression [hPa]	-0.8	-0.5	-0.3
Summer	Δ Température [°C]	1.8	1.9	1.8
	Δ Précipitation [%]	18	14	2
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-16.6	-10.3	1.6
	Δ Couverture nuageuse [-]	3.3	2.0	-1.1
	Δ Vitesse du vent [%]	3	2	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.8	0.9	0.9
	Δ Pression [hPa]	-0.4	-0.3	-0.3
Fall	Δ Température [°C]	3.1	2.7	2.0
	Δ Précipitation [%]	21	23	6
	Δ Radiation solaire [MJ/m ²]	-4.8	-3.7	-2.3
	Δ Couverture nuageuse [-]	3.3	1.9	3.3
	Δ Vitesse du vent [%]	6	5	-1
	Δ Humidité spécifique [g/kg]	0.6	0.6	0.5
	Δ Pression [hPa]	-0.5	-0.6	-0.7

C Portrait des simulations utilisées

		Soumis par : David Huard		Date : 28 septembre 2012						
Projet : Refuge thermique des salmonidés										
Ce document décrit de façon succincte le scénario climatique fourni, et permet à l'utilisateur d'être informé de ses limites. Pour chaque paramètre (de a. à f.), plus le cercle rouge est à droite, plus l'analyse s'approche de la situation idéale (reposant sur plus de simulations, une meilleure résolution, des modèles plus sophistiqués, etc.). En général, une analyse idéale n'est pas possible pour tous les paramètres considérés simultanément, et un compromis s'avère nécessaire.										
a. Nombre de scénarios d'émissions. Les valeurs considérées pour les émissions anthropiques futures (de GES et d'aérosols) relèvent de scénarios supposant différentes évolutions socio-économiques mondiales durant les décennies à venir. Utiliser plusieurs de ces scénarios d'émissions permet d'obtenir un scénario climatique plus robuste face à l'incertitude sur l'évolution socio-économique. A1B, A2, B1, B2, etc., sont des scénarios d'émissions.										
1	2 : A2 et A1B	3	4	Plus						
b. Nombre de modèles (diversité des modèles). Différents modèles du climat produisent différentes projections climatiques, dû aux différences dans leurs formulations. L'utilisation de plusieurs modèles est recommandée pour construire un scénario climatique plus robuste face aux détails de la formulation physique et numérique des modèles. Un cercle pointillé indique le nombre total de simulations considérées avant la sélection des simulations fournies.										
<i>GCM (3/6)</i>	1	3	6	9	14	19	24	Plus		
<i>RCM (1/4)</i>	1	3	6	9	14	19	24	Plus		
c. Nombre de simulations (robustesse statistique). Pour chaque modèle utilisé, il est souhaitable de considérer plusieurs simulations, afin de constituer un sous-scénario statistiquement plus robuste face à la nature chaotique du système atmosphérique (par contre, cette robustesse statistique ne garantit pas la qualité des projections).										
<i>GCM (0)</i>	1	5	10	20	50	100	200	Plus		
<i>RCM (9/13)</i>	1	5	10	20	50	100	200	Plus		
d. Résolution horizontale (en km). Les modèles permettent d'ajuster les résolutions spatiales (horizontale et verticale) et temporelle sur une certaine plage de valeurs. Certains phénomènes ou certaines variables sont en principe mieux représentés lorsque la résolution est plus fine.										
<i>MCG (-)</i>	500	250	100	50						
	MRC (45 km)			50	15	10	5	1	Estimation ponctuelle	
e. Cuvée. Année de production des simulations climatiques. En principe, les modèles sont améliorés avec le temps et l'avancée des connaissances.										
avant	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
f. Niveau de connaissance dans les modèles. Le nombre de processus décrits dans les modèles ainsi que la qualité de ces descriptions évoluent rapidement avec le temps. Ce paramètre donne une idée de la complexité des modèles utilisés, dont la génération est identifiée au rapport d'évaluation du GIEC auquel ils ont servi.										
Génération SAR (Deuxième rapport du GIEC) <i>Océan 3D.</i>		Génération TAR (Troisième rapport du GIEC) <i>Schéma de surface complexe.</i>		Génération AR4 (quatrième rapport du GIEC) <i>Aérosols, dynamique des glaces.</i>		Génération AR5 (cinquième rapport du GIEC) <i>Cycle du carbone, végétation dynamique, chimie, effet indirect des aérosols, biologie marine.</i>				

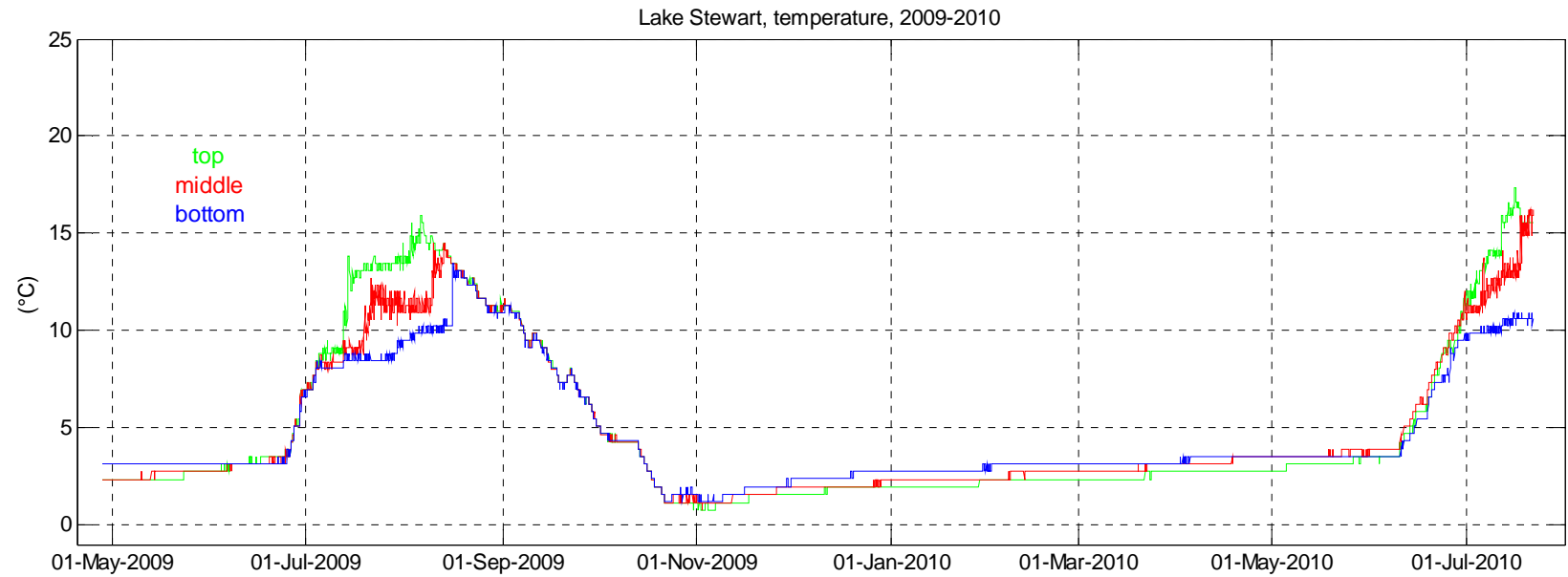
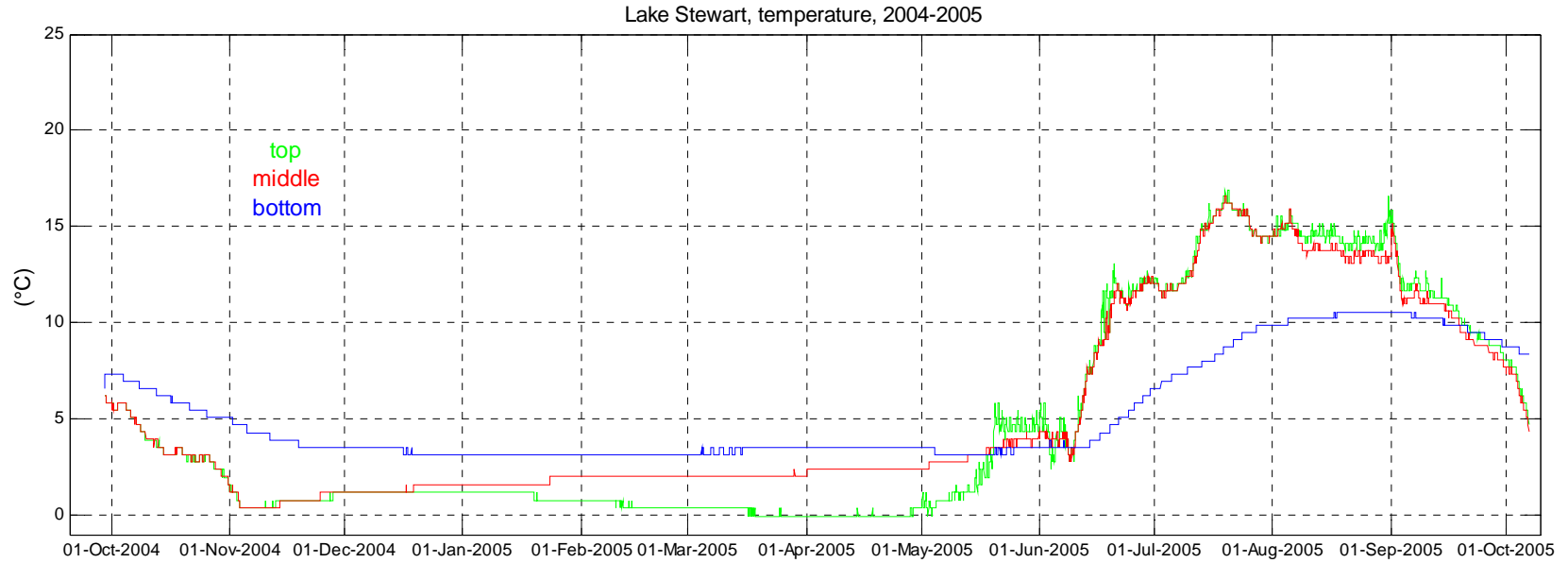
Commentaires additionnels	
Méthode de sélection des modèles et simulations climatiques.	
p.ex. : Analyse de sensibilité pour un ensemble de sept variables choisies a priori.	
Précisions relatives aux paramètres en recto (a. à f.).	
p.ex. : Les simulations choisies sont celles du MRCC4.2 .3 pilotées par CGCM3, ECHAM5 et CNRM-CM3.	
Autres précisions.	
-Certaines variables requises sont rarement extraites et analysées et il y a peu d'expériences sur leur utilisation en mode delta : couverture nuageuse, radiation solaire, humidité spécifique, pression.	
Changements climatiques projetés selon les simulations utilisées, relativement à l'ensemble des projections disponibles.	Biais passés des simulations utilisées, relativement à l'ensemble des simulations disponibles.
Ce graphique indique comment certaines variables climatiques devraient changer en moyenne sur une certaine région et entre 2 périodes données.	Ces tableaux révèlent la performance d'un modèle quant à la simulation de certaines variables dans un passé récent. Un biais élevé par rapport aux observations rend un modèle suspect, mais un biais plus faible n'indique pas nécessairement un meilleur modèle (de mauvaises raisons pouvant mener à un bon résultat).
Voir figure 2.1	Voir tableaux A.1 à A.5.

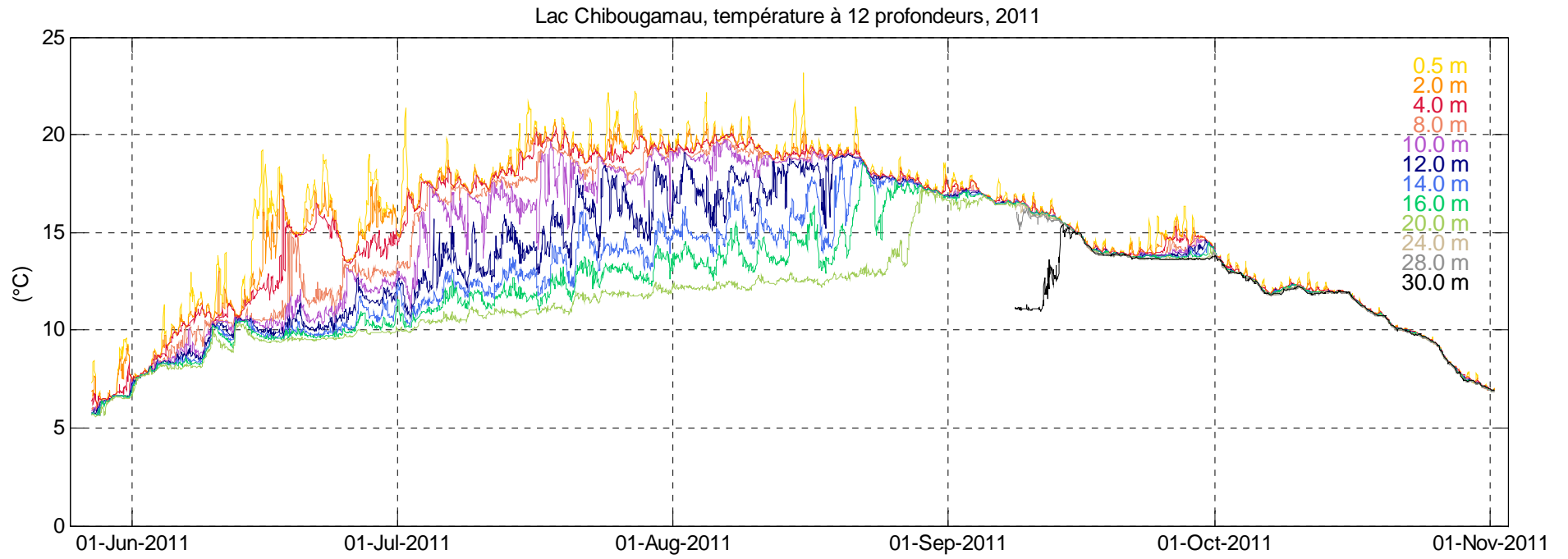
D Acronymes

MCG Modèle de Climat Global	3
MRC Modèle Régional de Climat	3
MRC Modèle Régional Canadien du Climat	3
MCCG Modèle couplé climatique global du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique	3
GIEC Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	9
CGCM3 Modèle couplé climatique global du Canada	8
CCSM3 Community Climate System Model	3
CNRM CM3 Modèle global couplé du Centre National de Recherches Météorologiques	3
ECHAM5 Modèle global couplé du Max-Planck-Institut	3
CCSM3 Community Climate System Model version 3	3
HadCM3 Hadley Centre Coupled Model version 3	3
GFDL CM2 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model version 2	3
WRF Weather Research & Forecasting Model	3
HadRM3P Hadley Regional Model version 3	3
RegCM3 Regional Climate Model version 3	3
NARR North American Regional Reanalysis	8

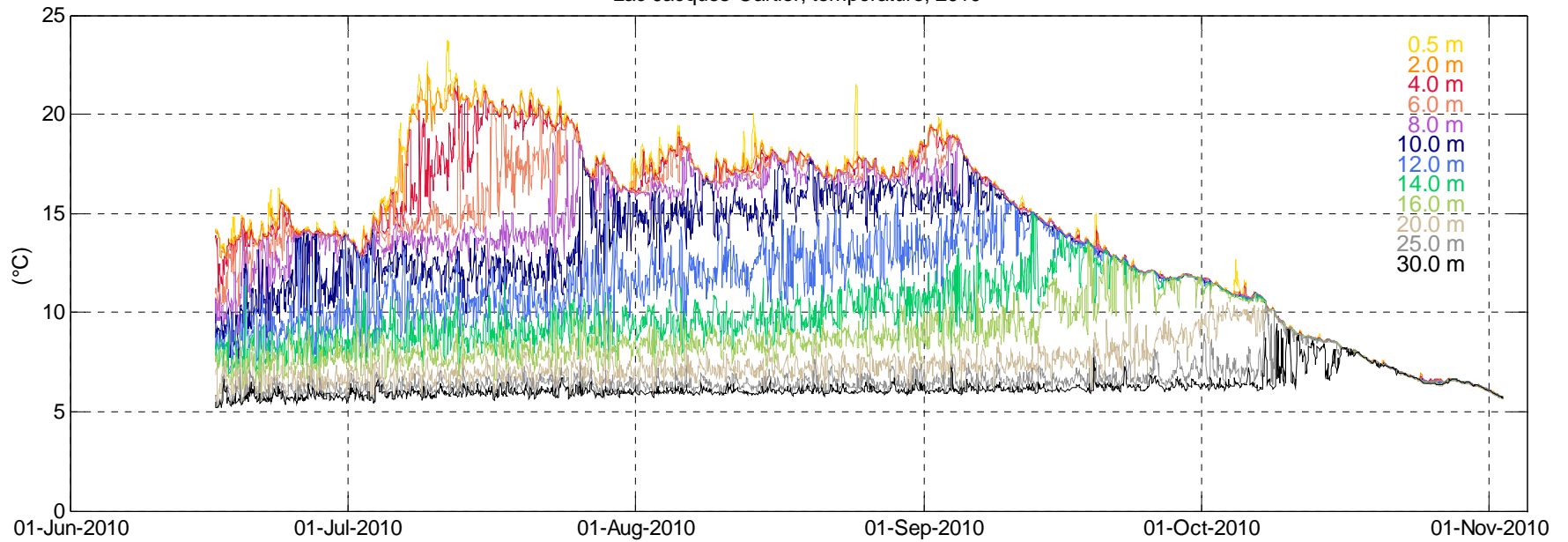
Annexe 3

Annexe 3 Températures observées aux lacs réels : 1) Lac Stewart, 2004-2005, 2) Lac Stewart, 2009-2010, 3) Lac Chibougamau, 2011, 4) Lac Jacques-Cartier, 2010, 5) Lac Jacques-Cartier, 2011, 6) Lac Bédard, 2006-2007, et 7) Lac Bédard, 2007-2008.

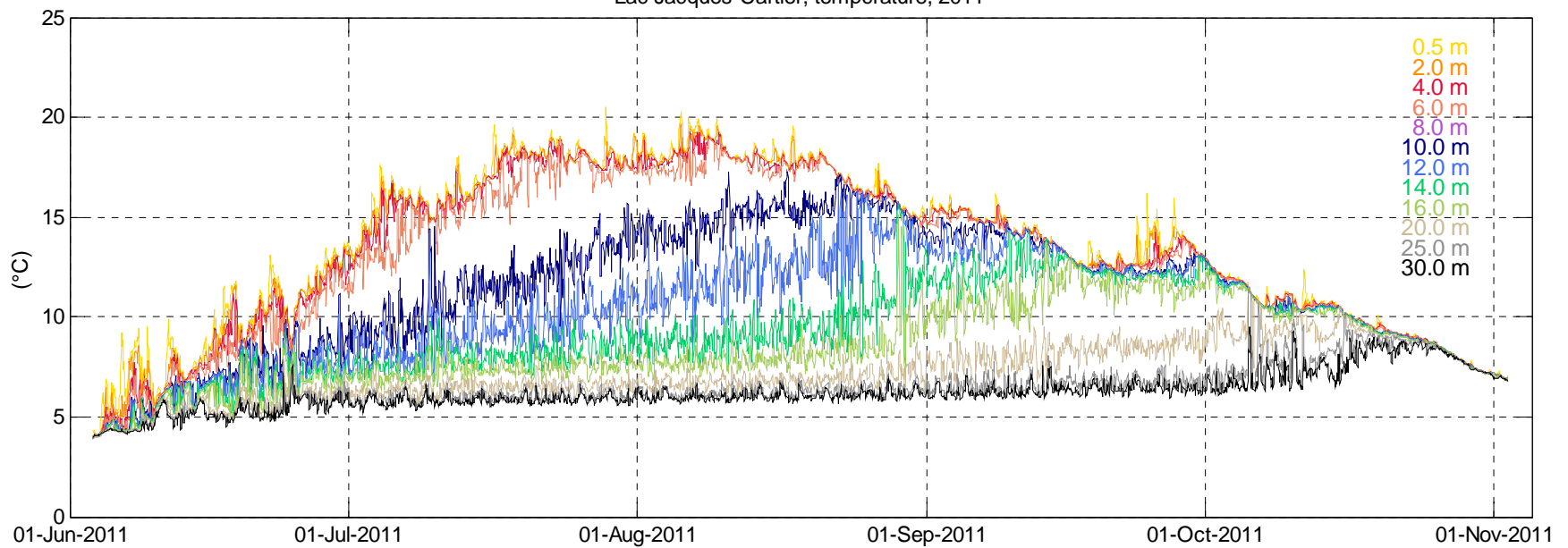




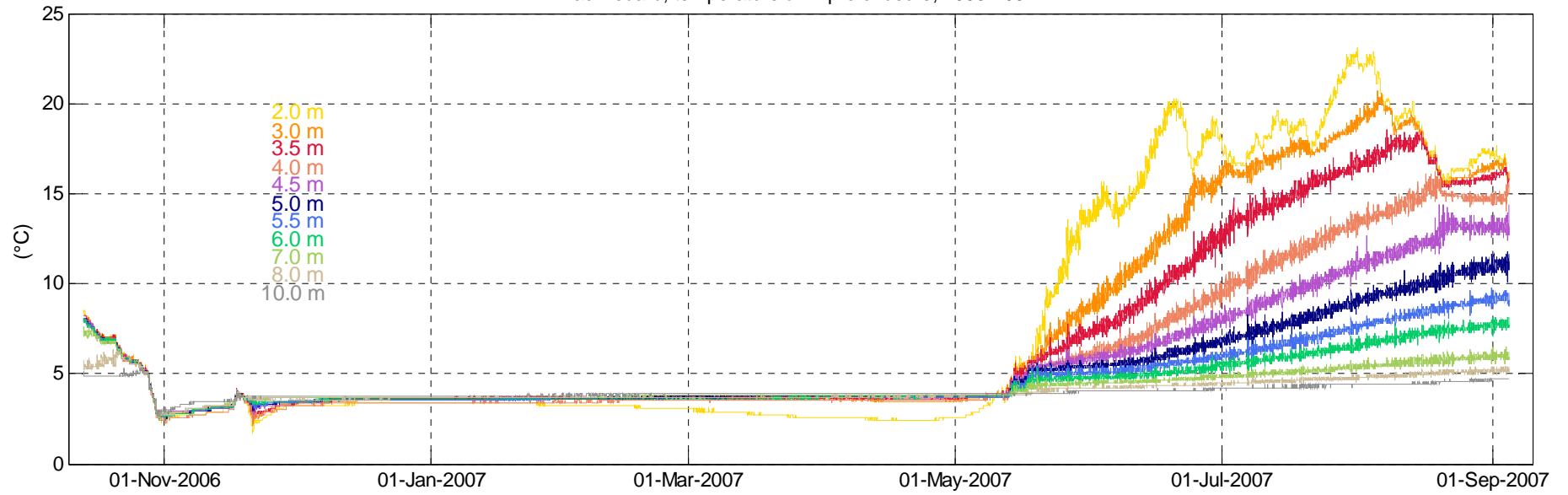
Lac Jacques-Cartier, température, 2010



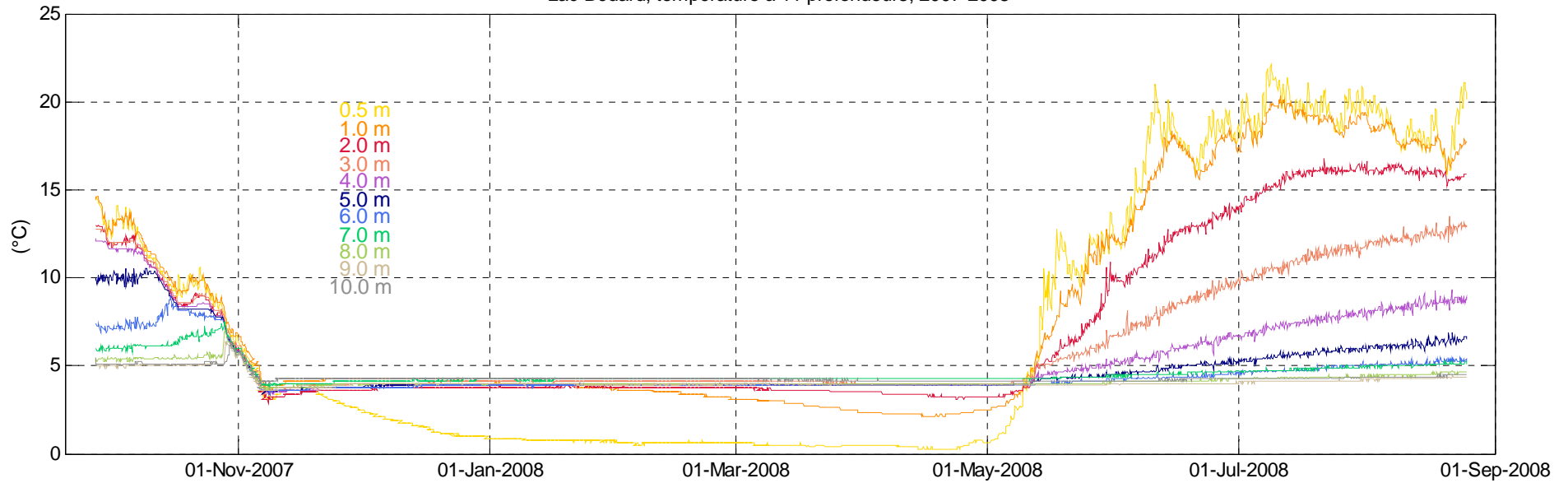
Lac Jacques-Cartier, température, 2011



Lac Bédard, température à 11 profondeurs, 2006-2007

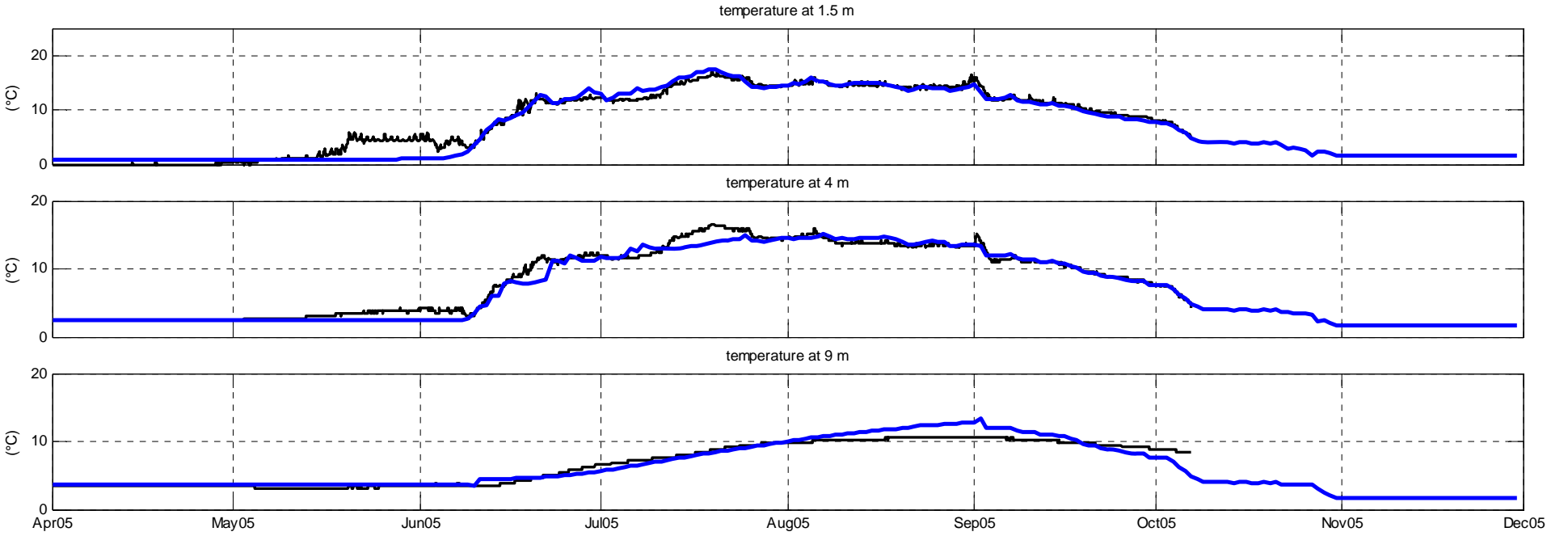


Lac Bédard, température à 11 profondeurs, 2007-2008

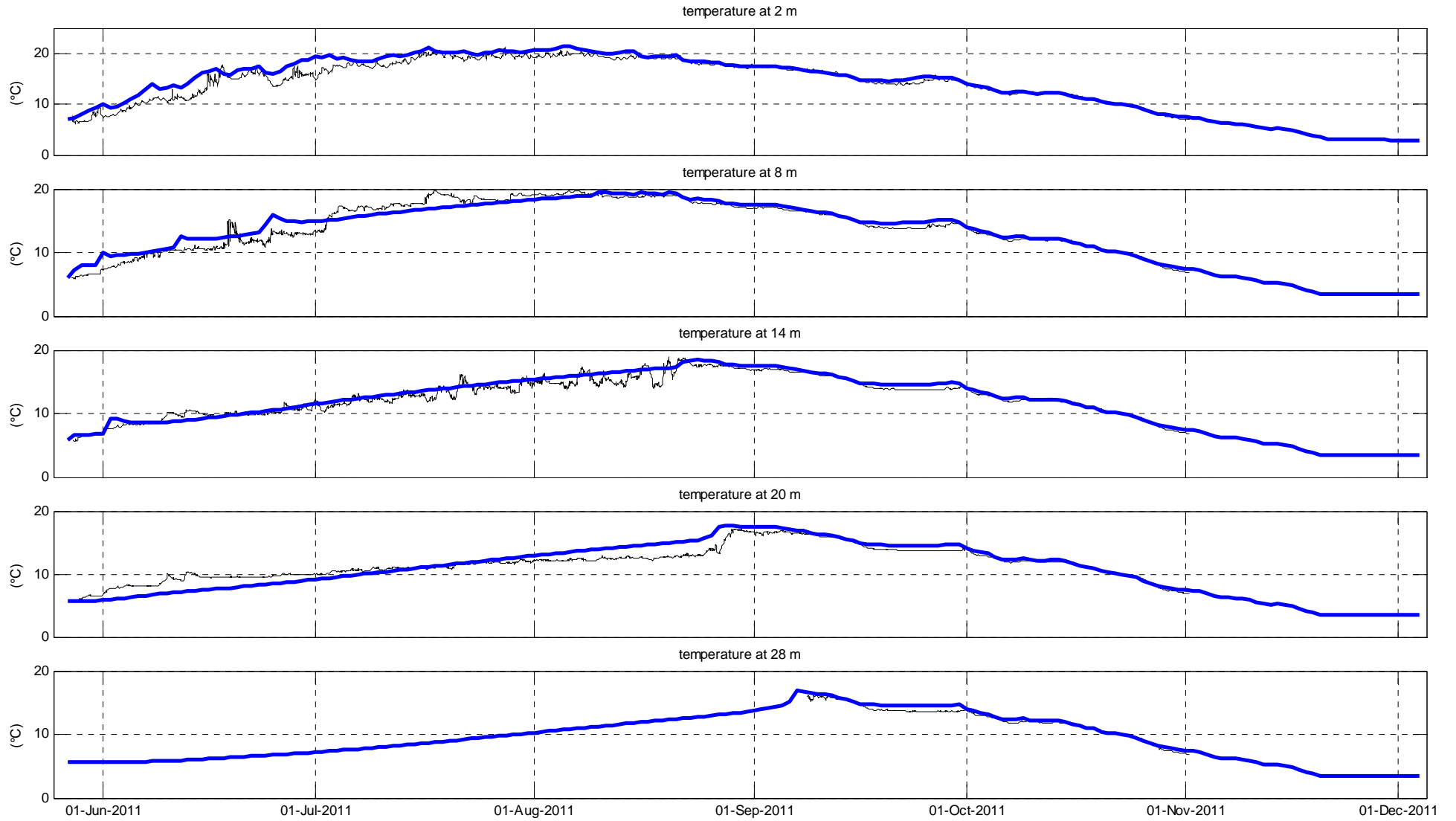


Annexe 4

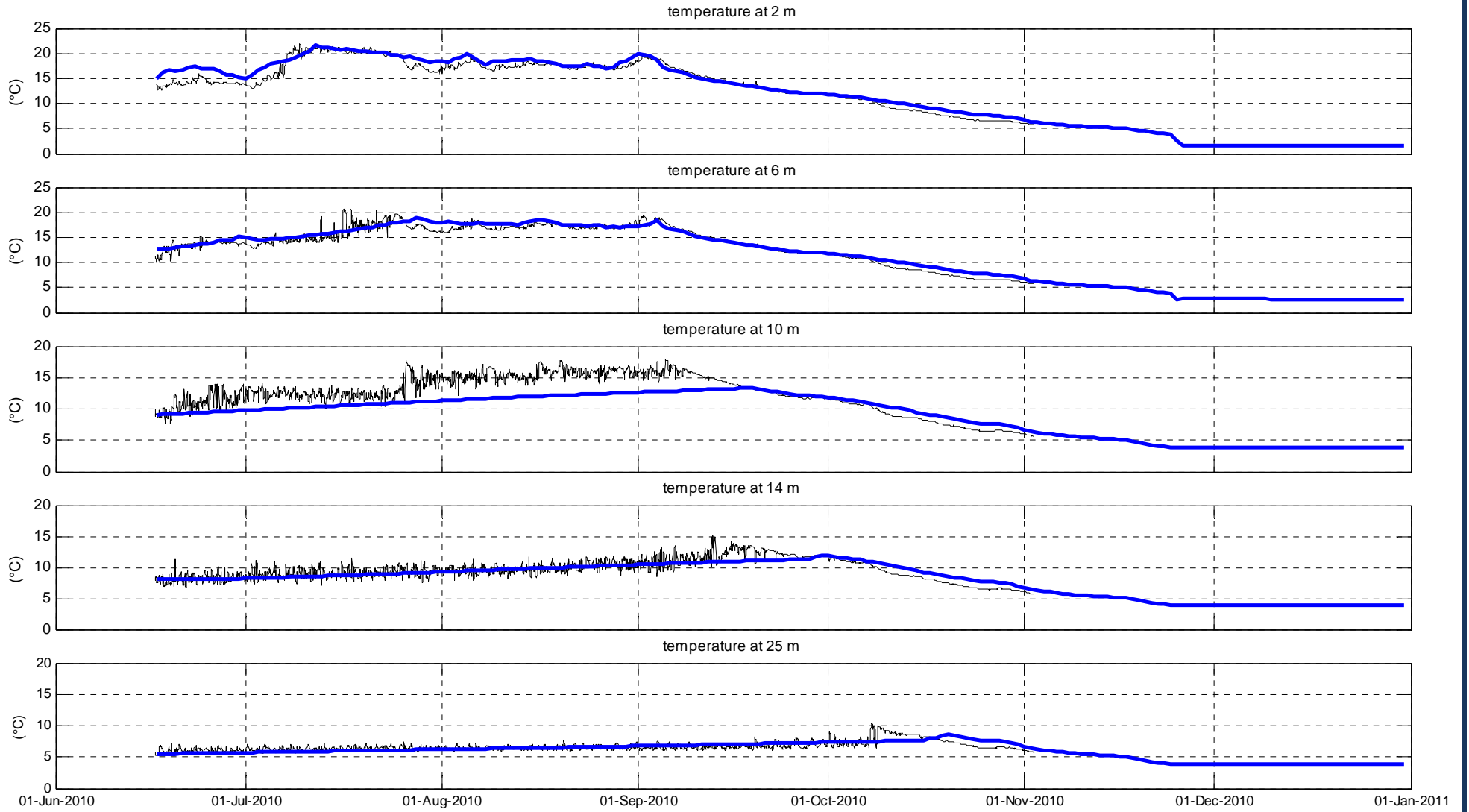
Annexe 4 Comparaisons entre températures observées (lignes noires) et températures modélisées (lignes bleues) à quelques profondeurs choisies pour quatre lacs: Stewart (STW), Chibougamau (CHI), Jacques-Cartier (JAC) et Bédard (BED).



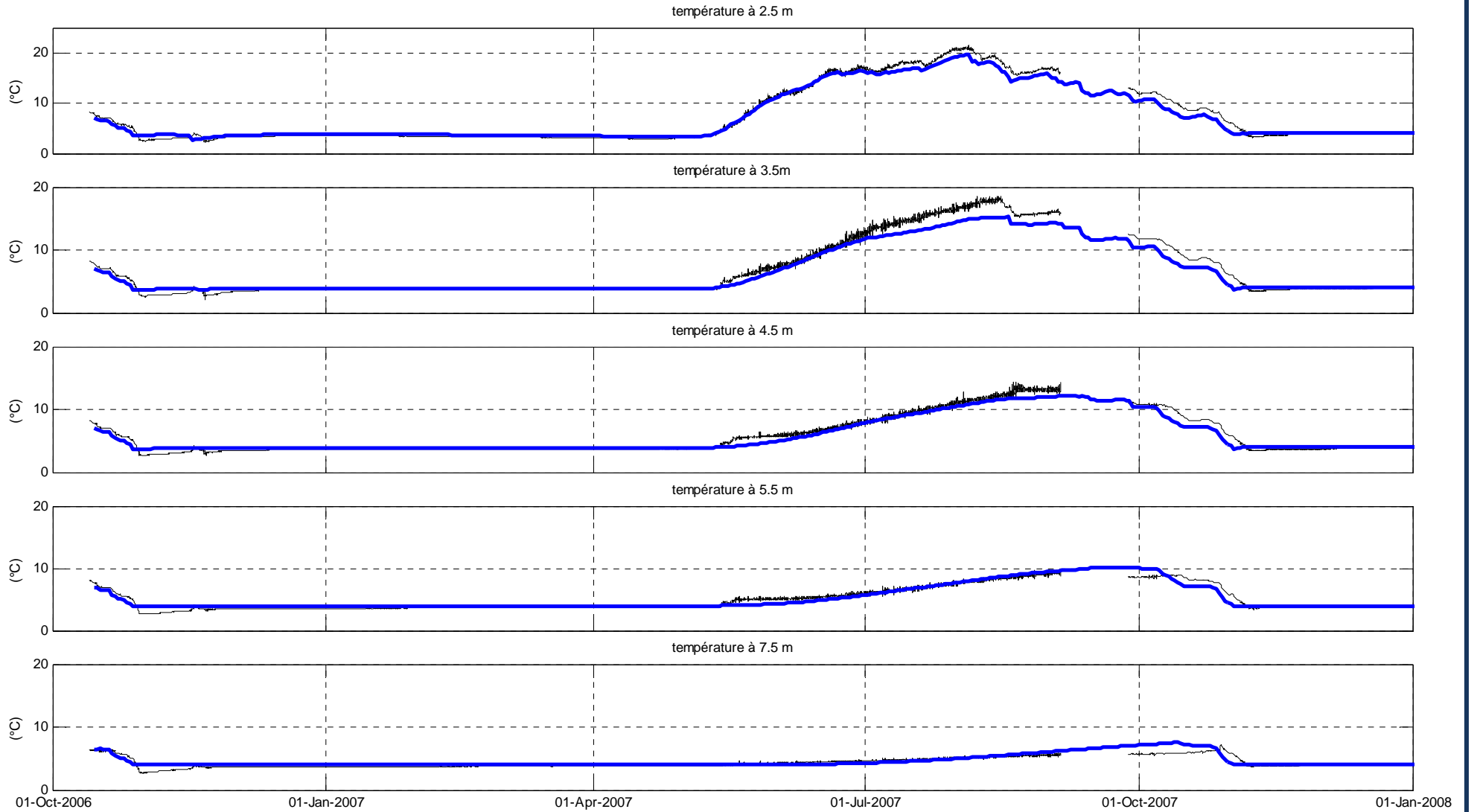
Lac Stewart



Lac Chibougamau



Lac Jacques-Cartier

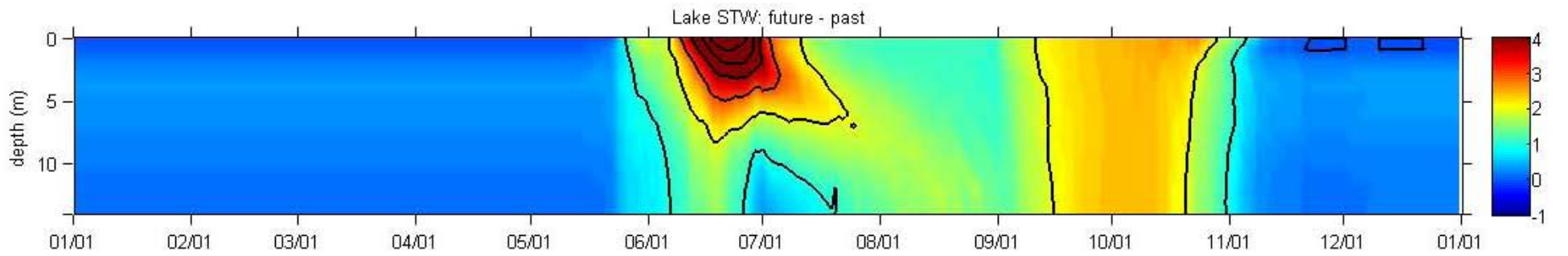
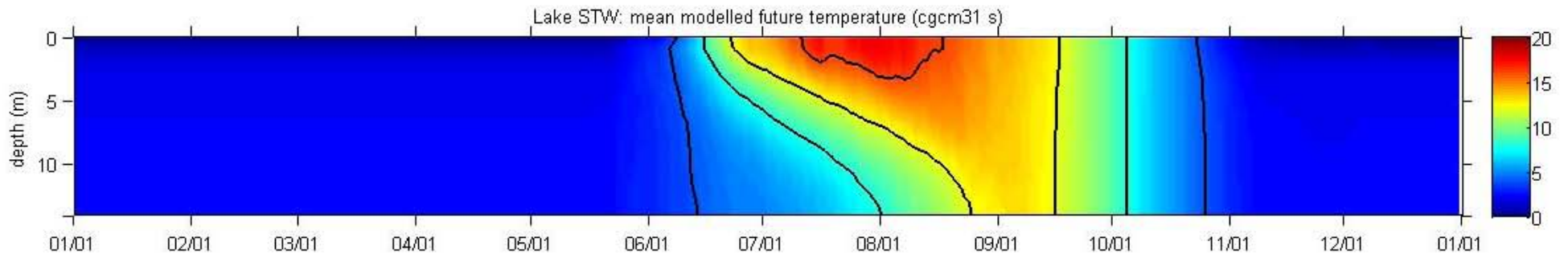
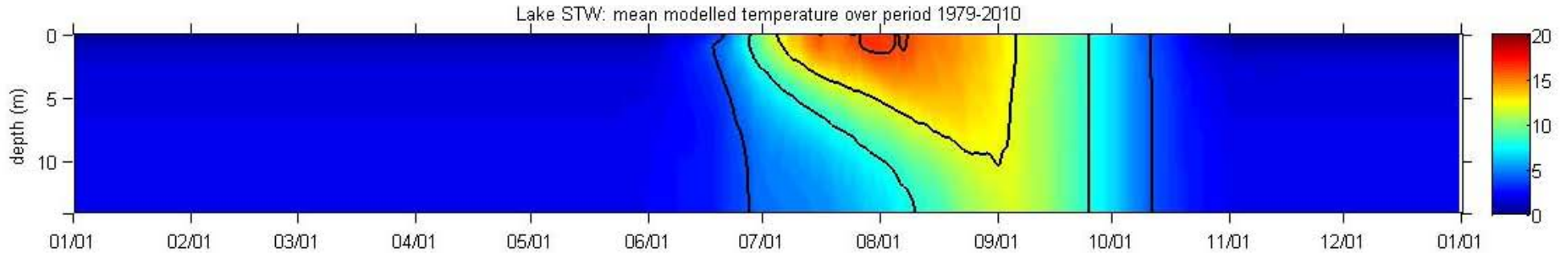


Lac Bédard

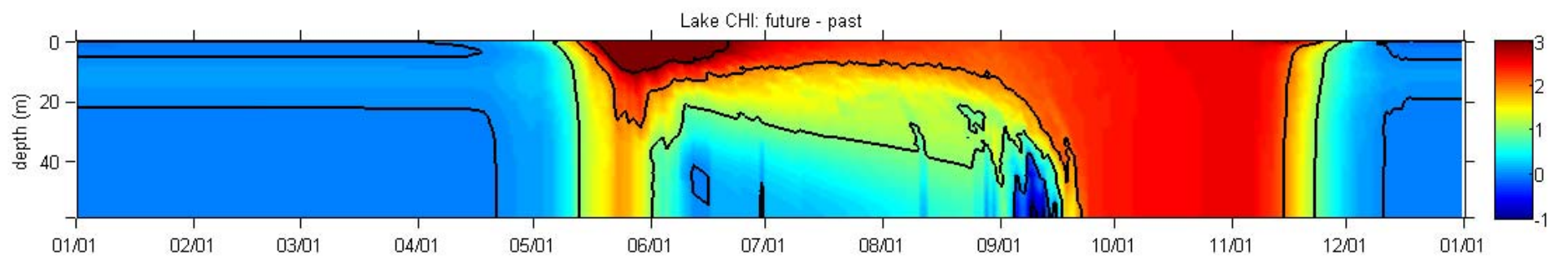
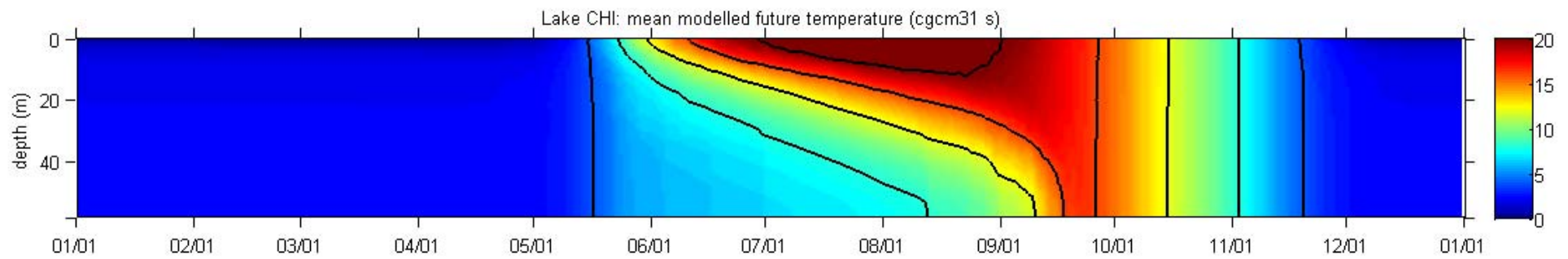
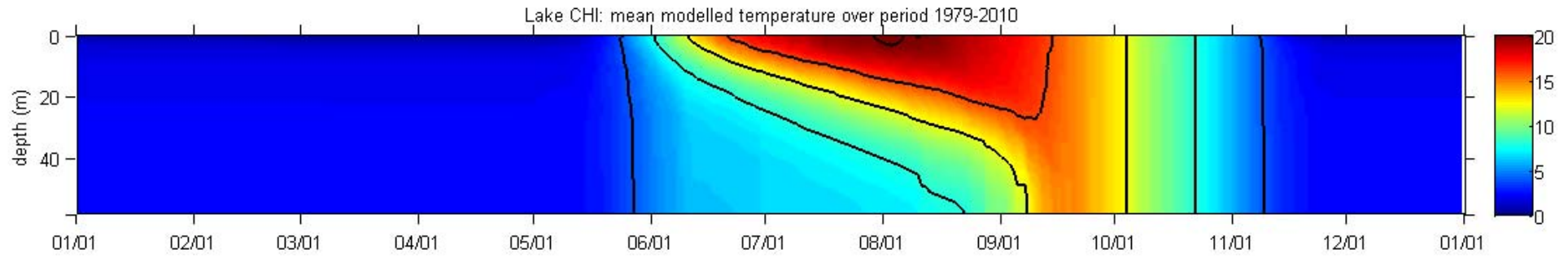
Annexe 5

Annexe 5 Cycles annuels passé (1979-2010) et futur (2041-2070) de profils de température journaliers moyens, et différences « futur-passé ». Les températures futures sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour quatre lacs : Stewart (STW), Chibougamau (CHI), Jacques-Cartier (JAC), et Bédard (BED).

Pour la température, les isolignes de 4, 8, 12, 16 et 20 °C ont été superposées. Pour la différence « futur-passé », les isolignes de -1, 0, 1, 2 et 3 °C ont été superposées.

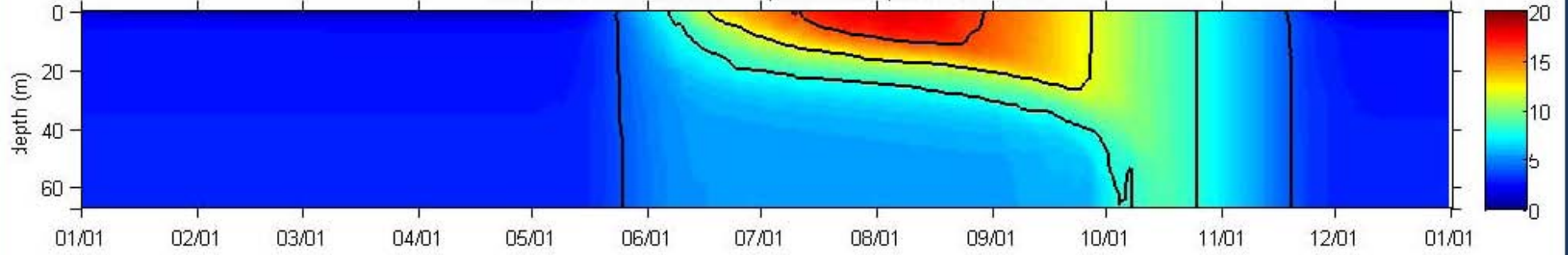


Lac Stewart

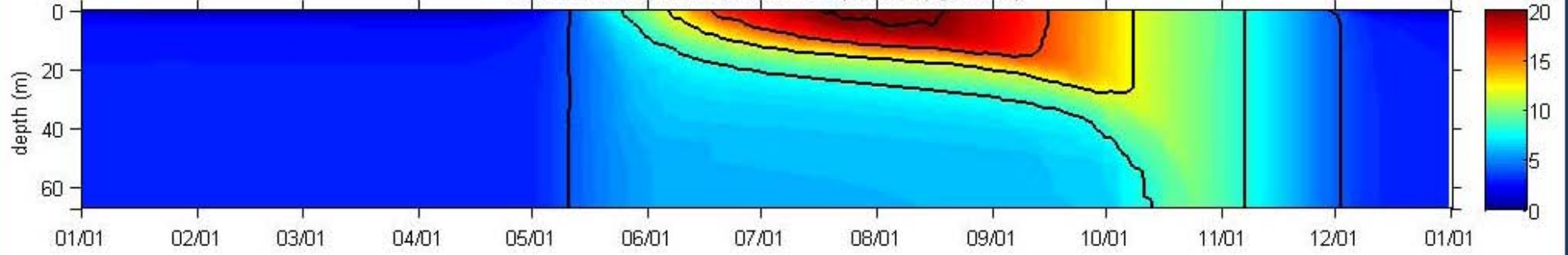


Lac Chibougamau

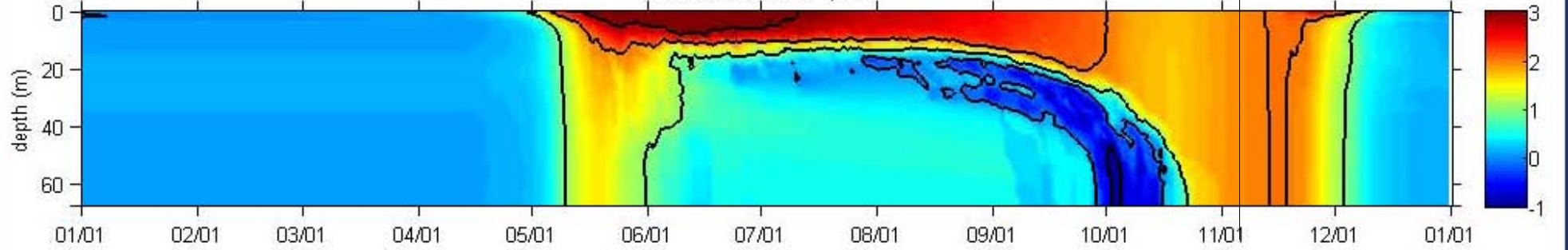
Lake JAC: mean modelled temperature over period 1979-2010



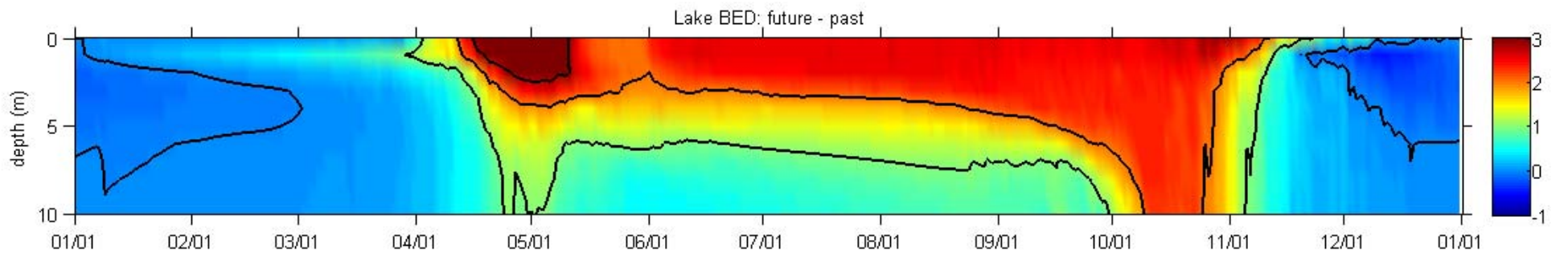
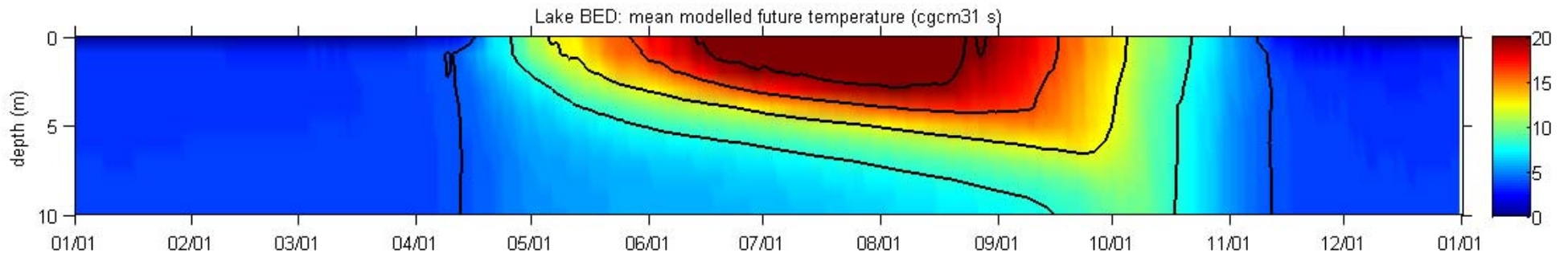
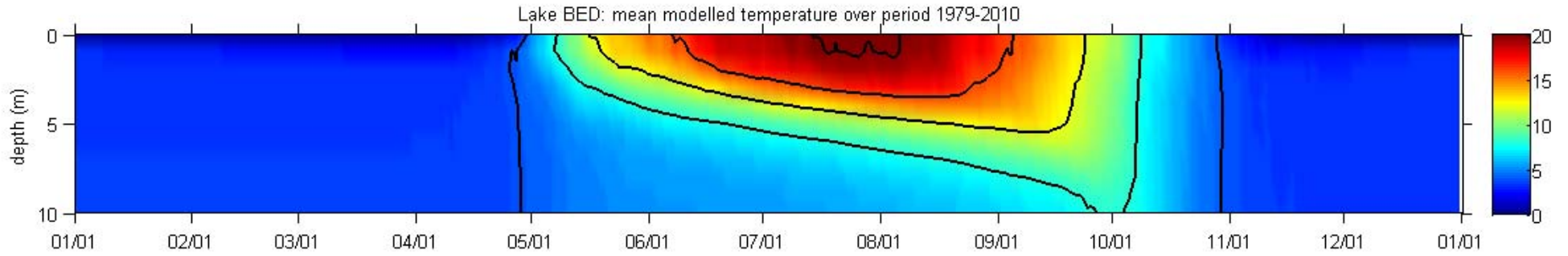
Lake JAC: mean modelled future temperature (cgcm31 s)



Lake JAC: future - past



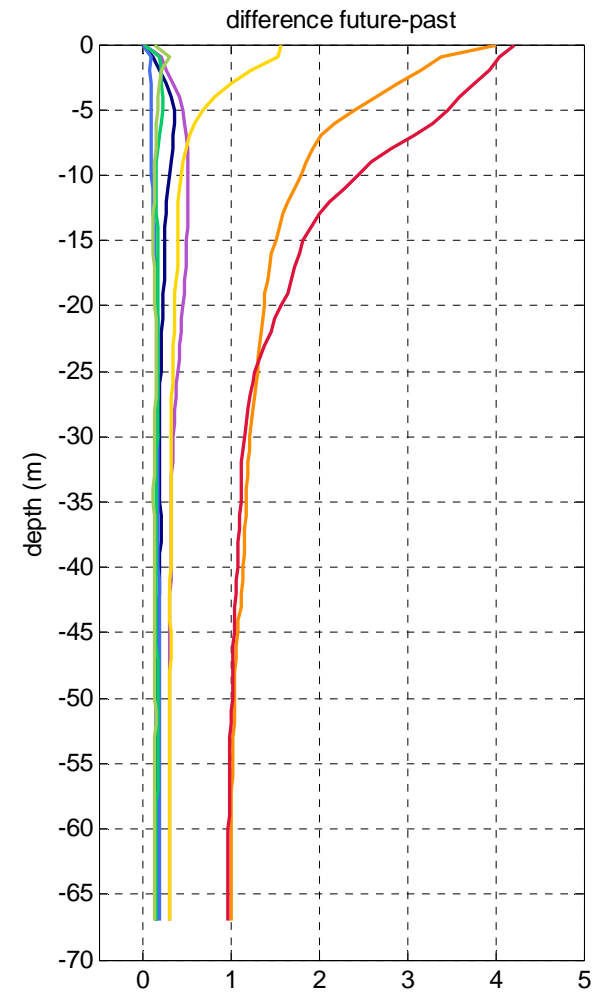
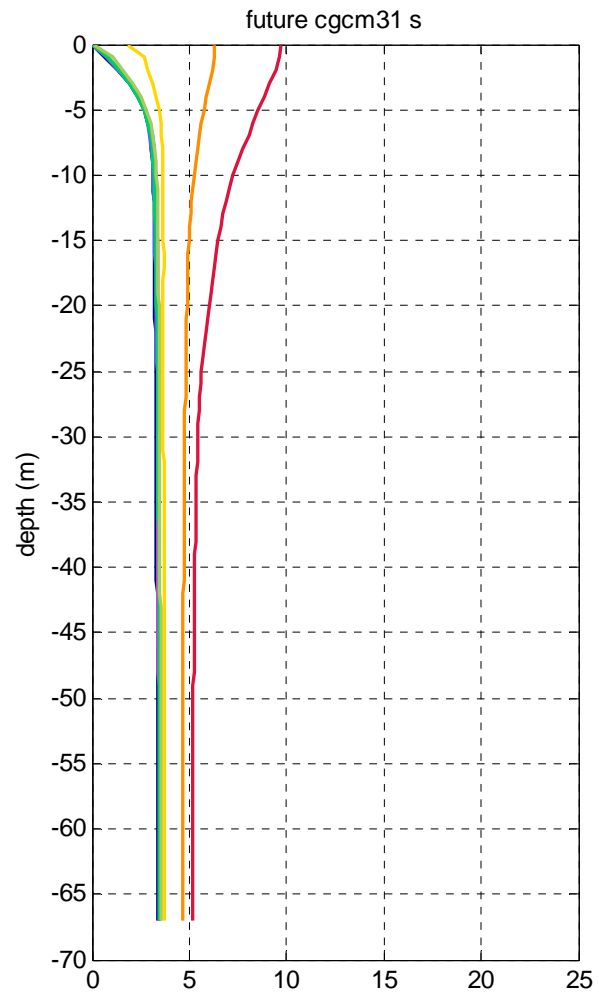
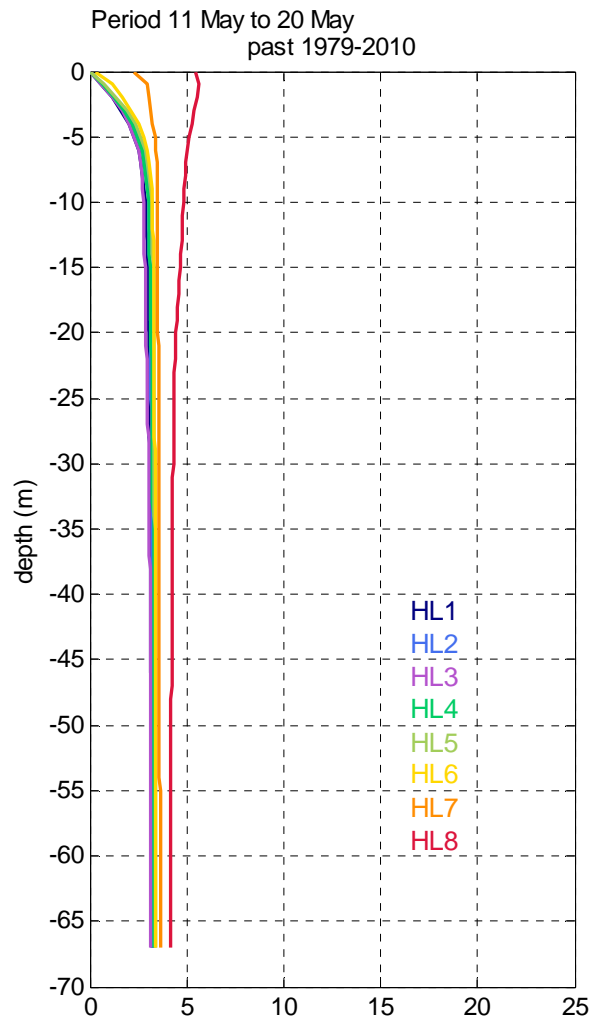
Lac Jacques-Cartier

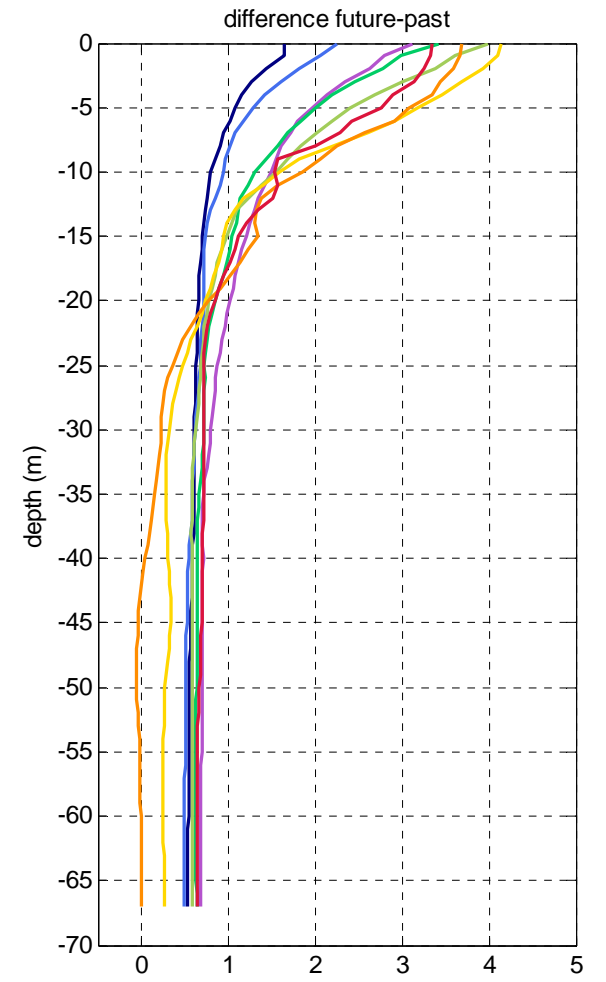
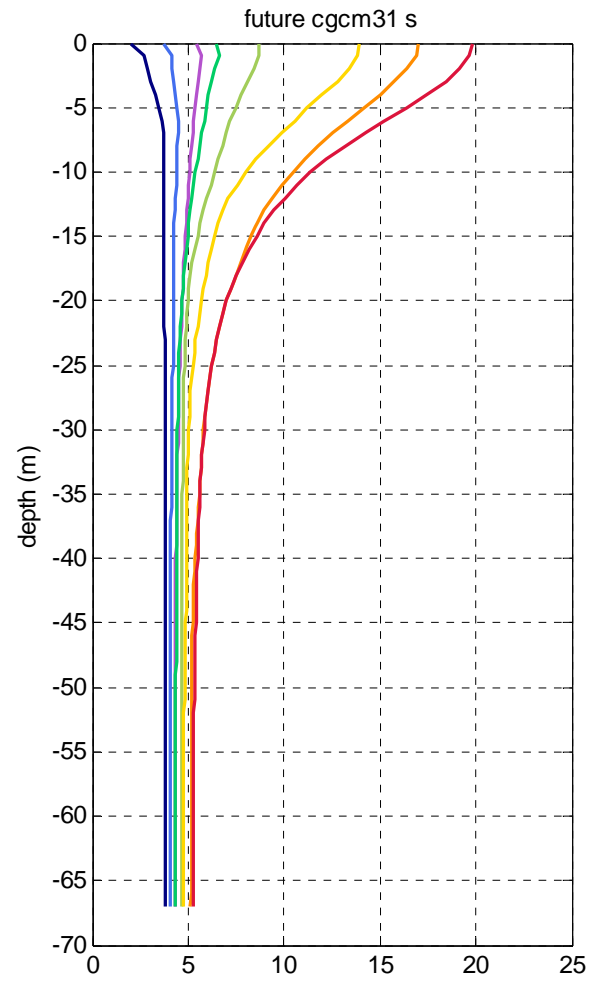
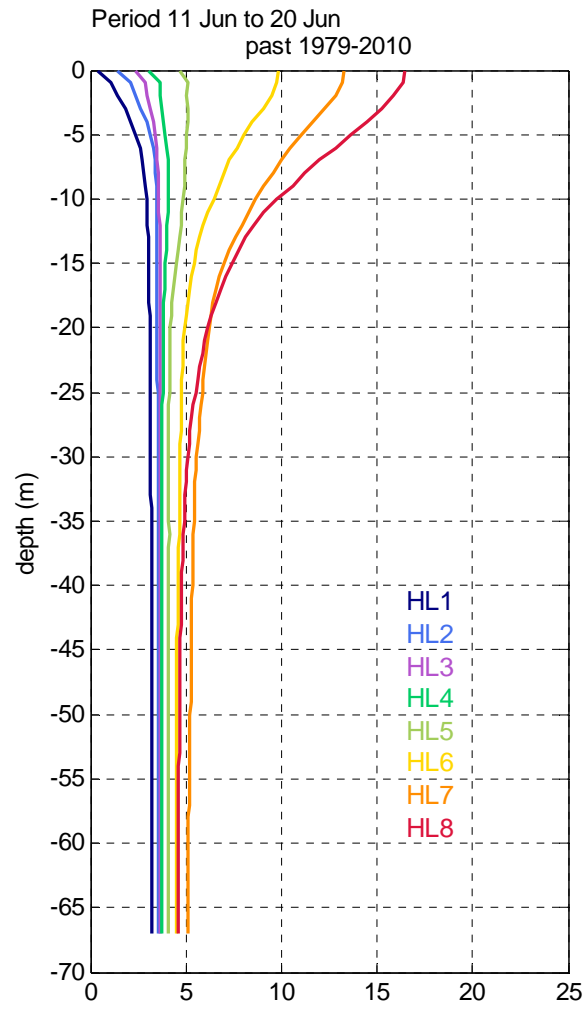


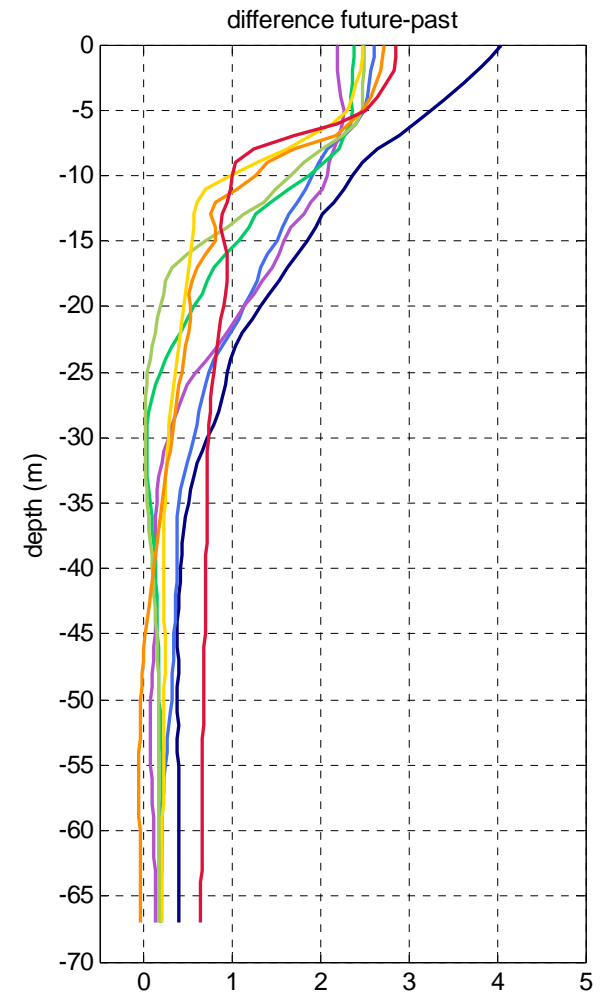
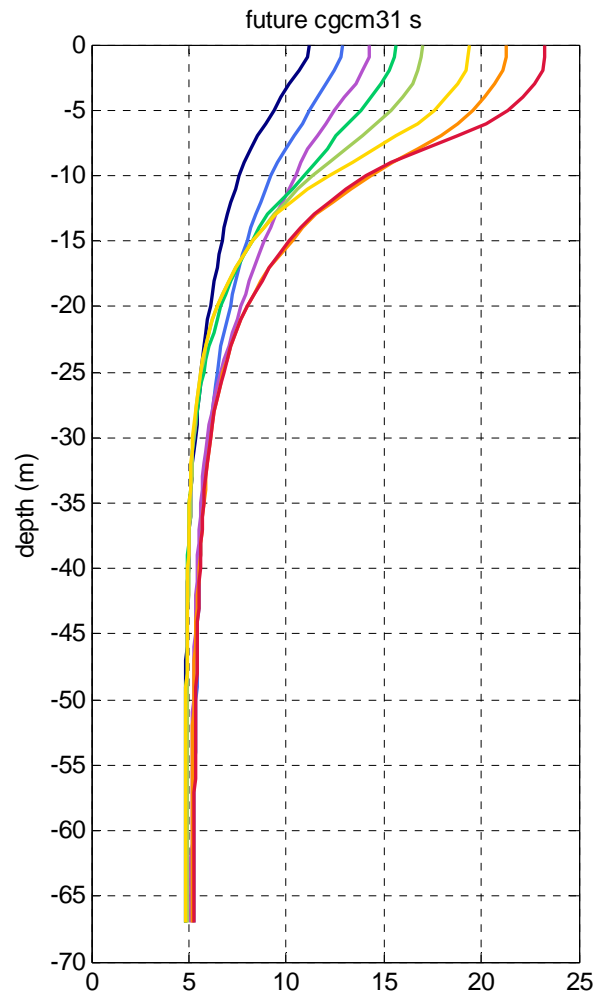
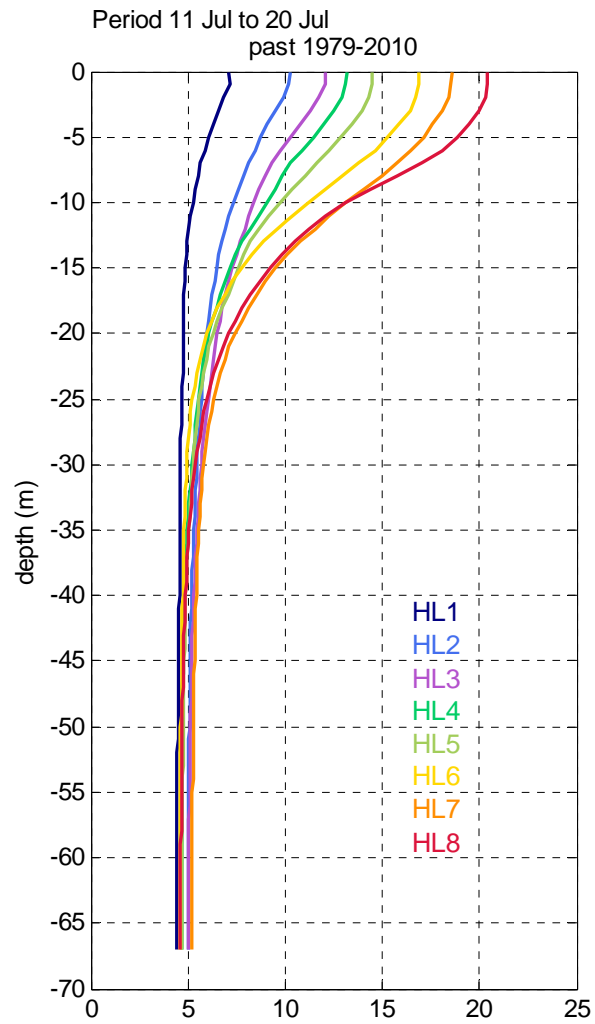
Lac Bédard

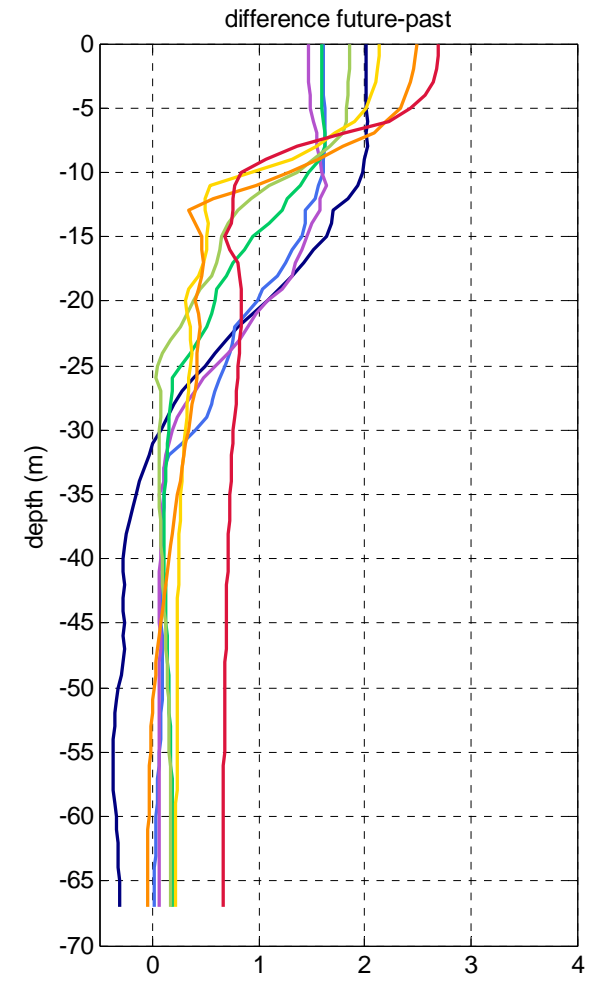
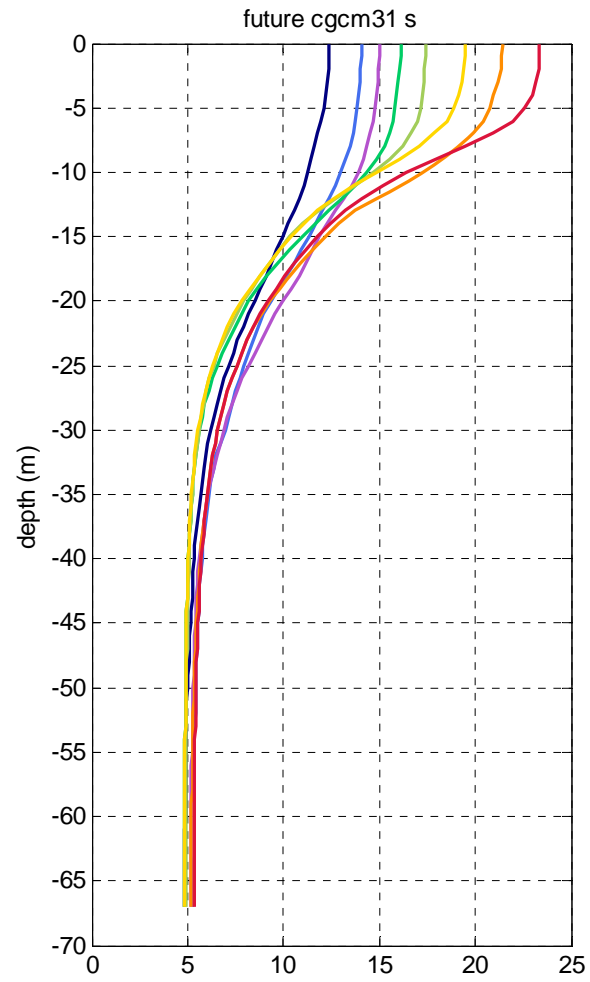
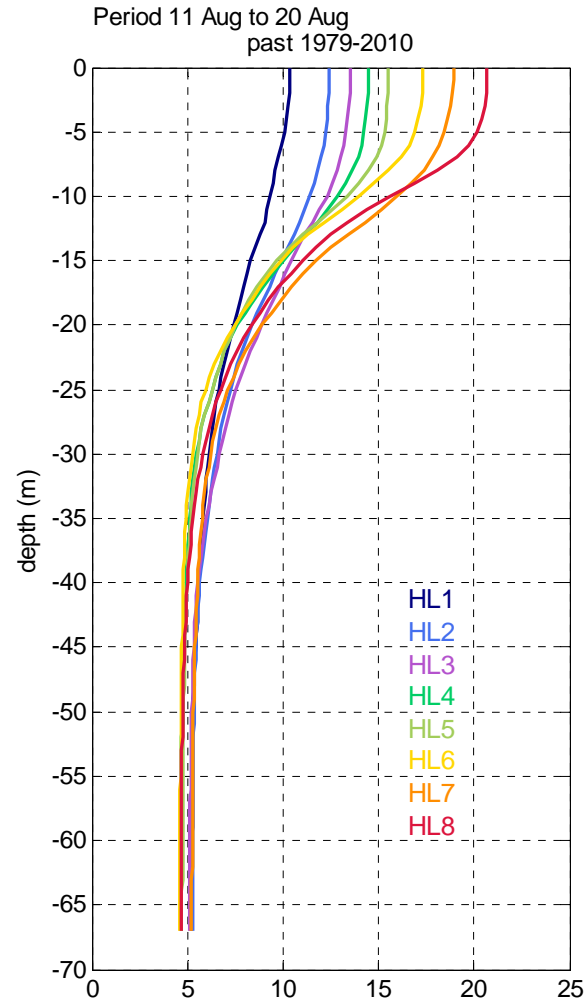
Annexe 6

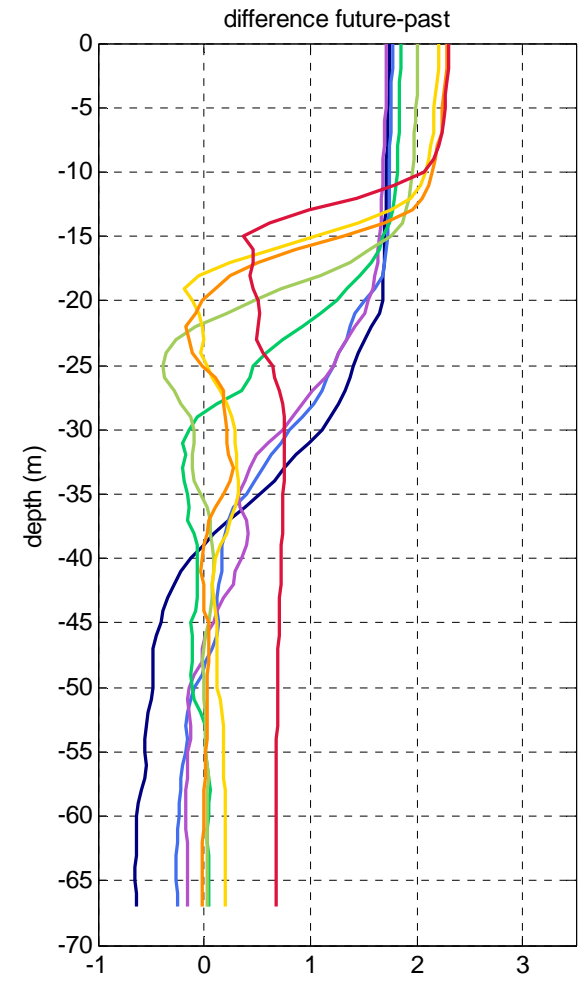
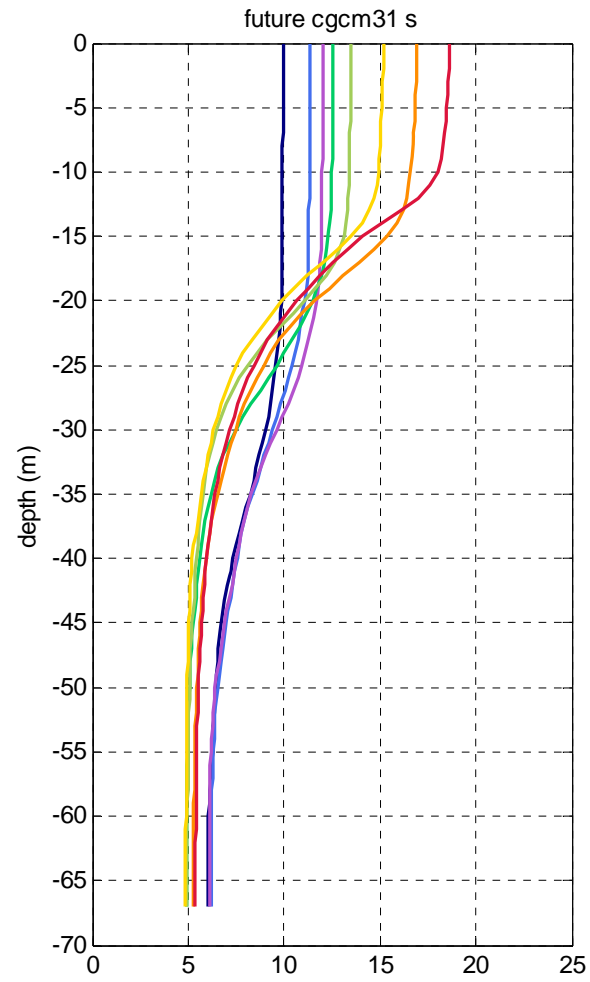
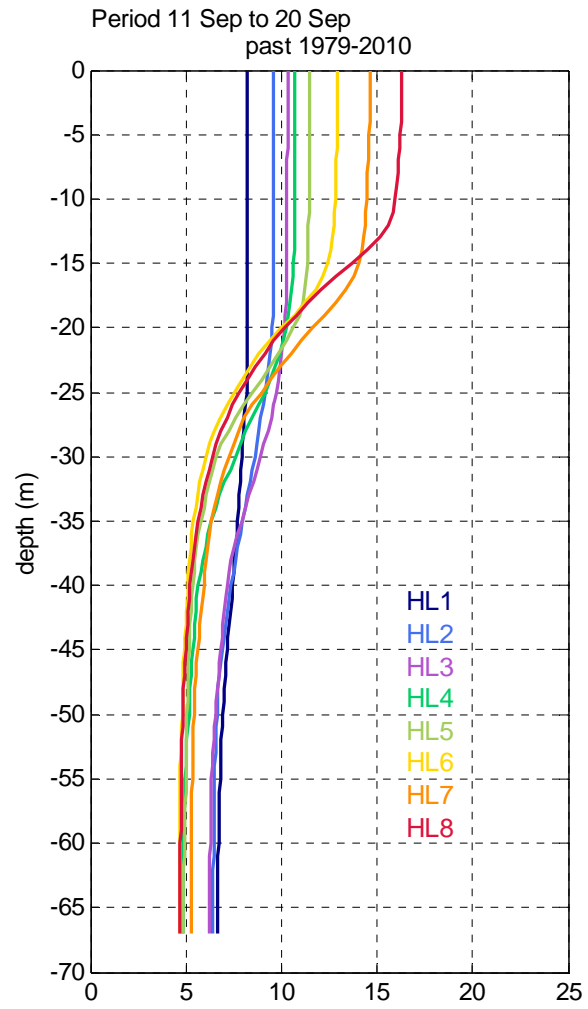
Annexe 6 Profils de température passée et future pour sept décades (mi-mai à mi-novembre) pour le lac Jacques-Cartier (JAC) lorsque placé à huit latitudes, et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1.

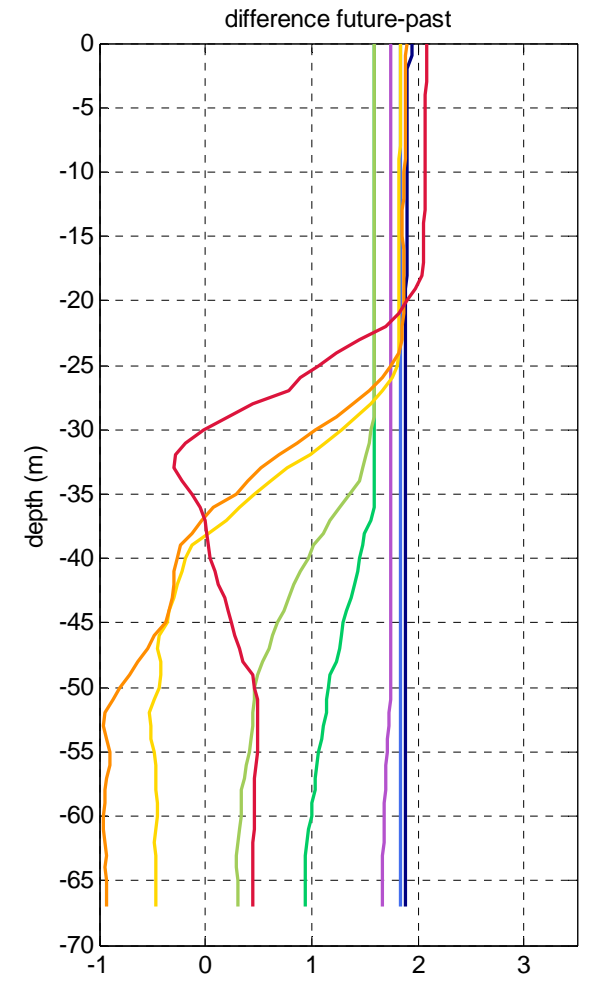
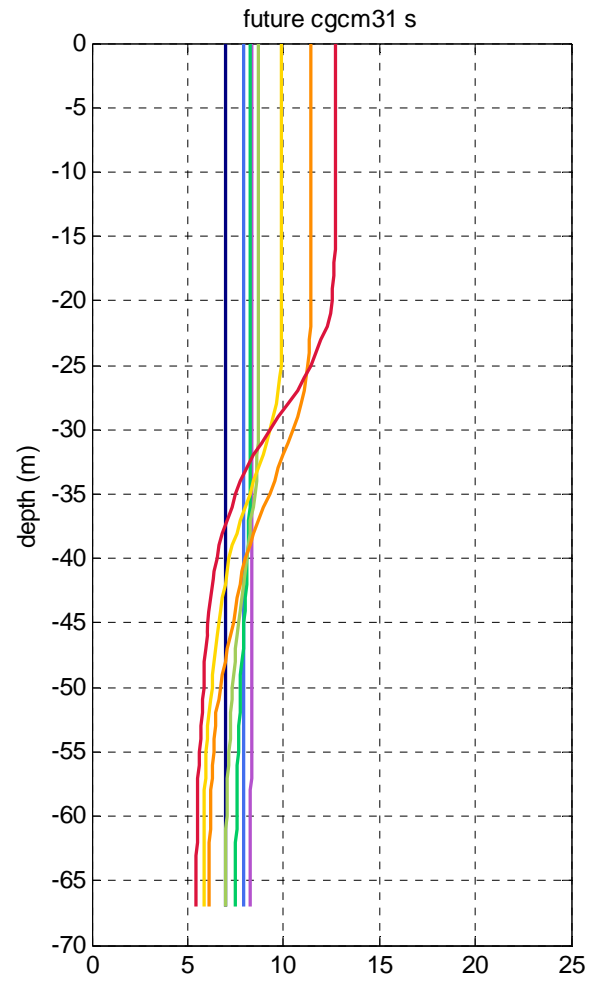
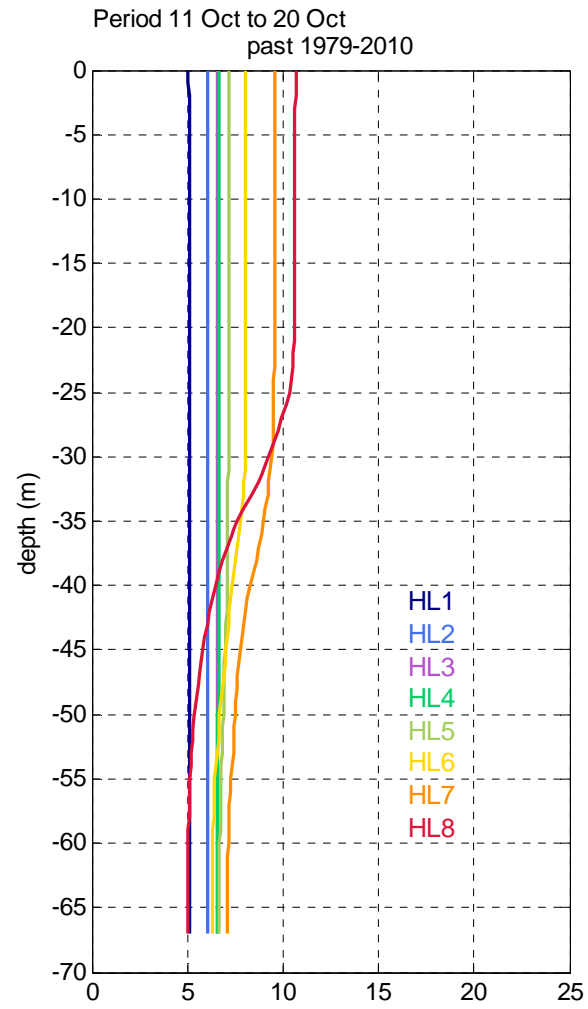


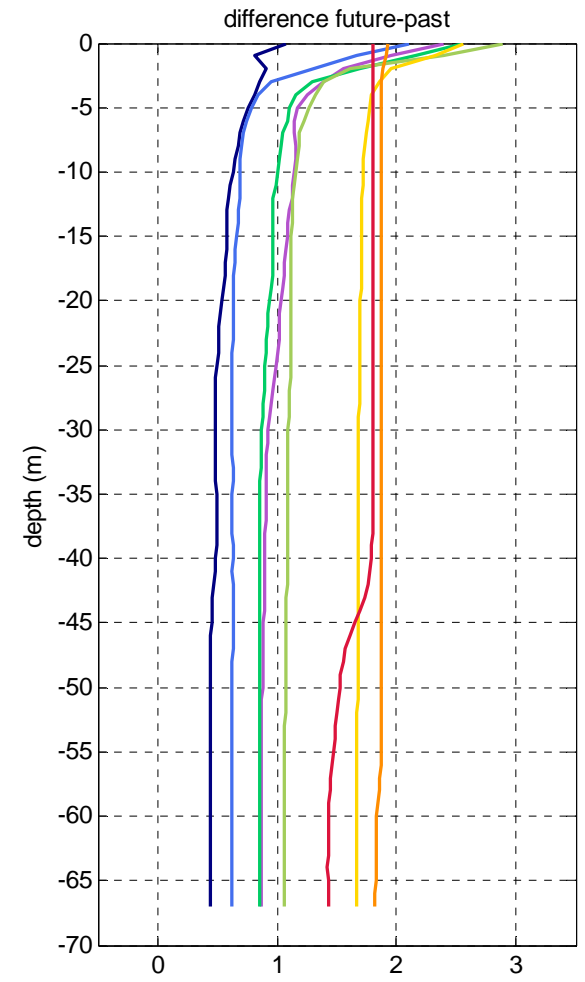
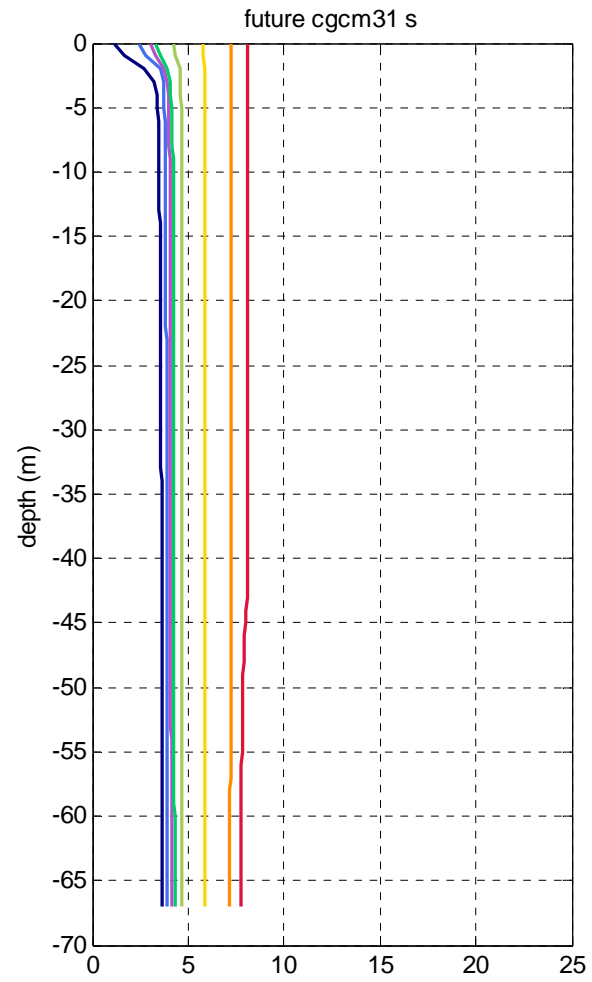
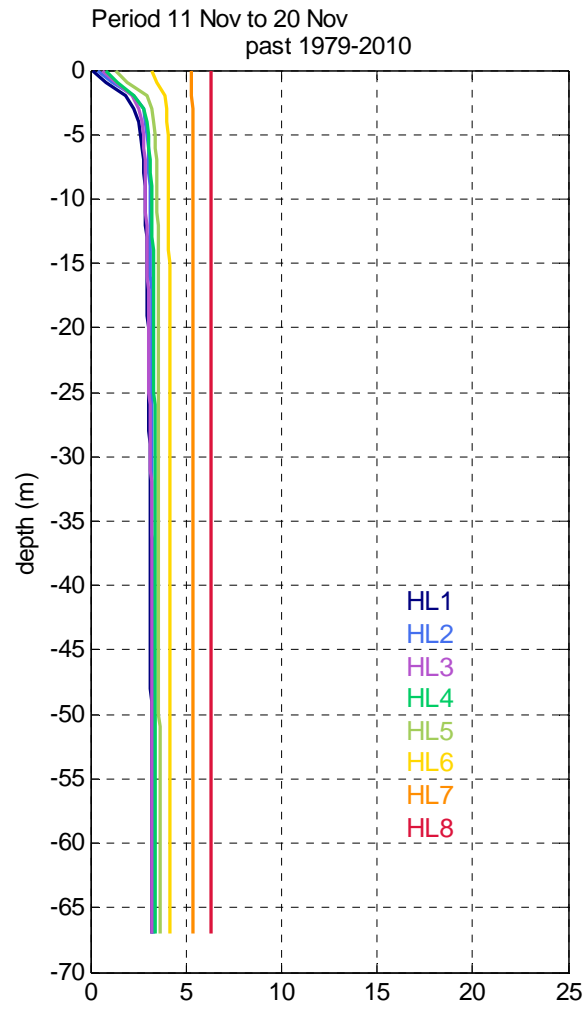






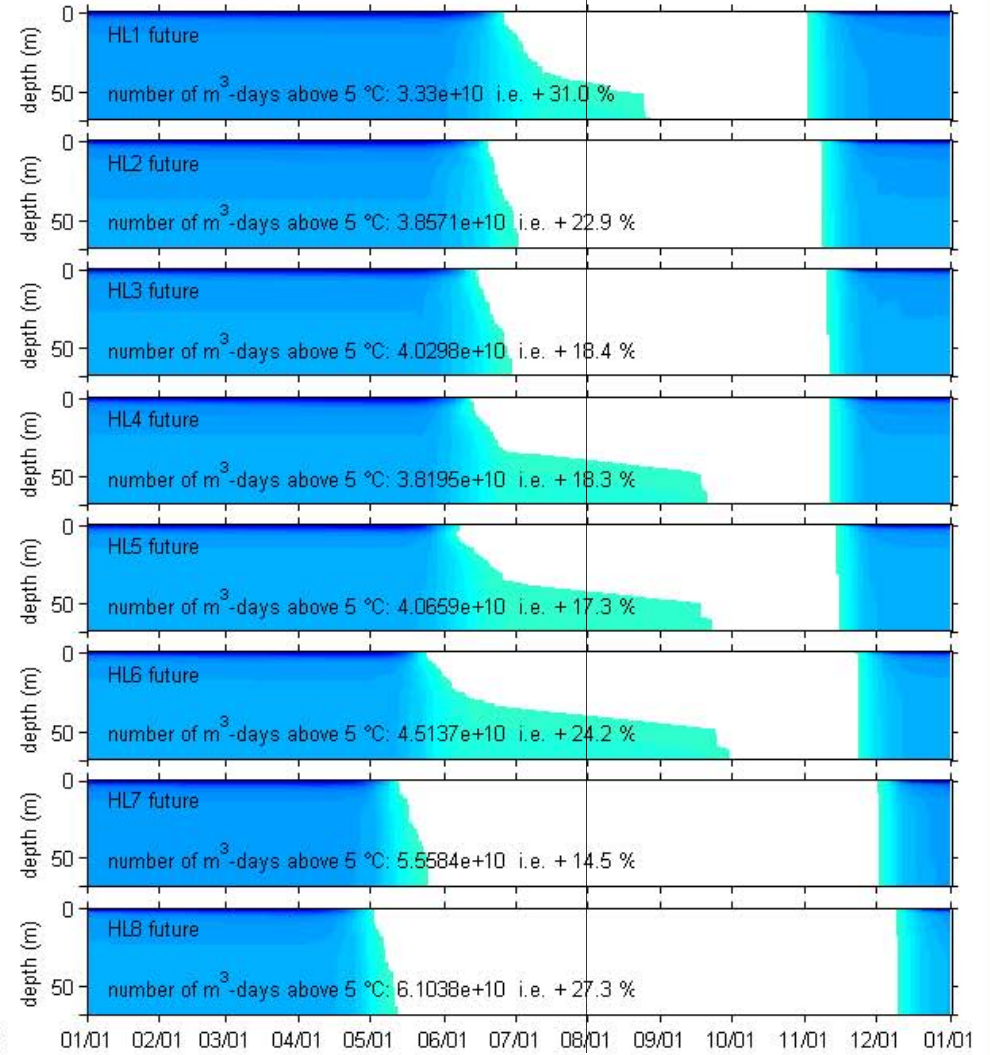
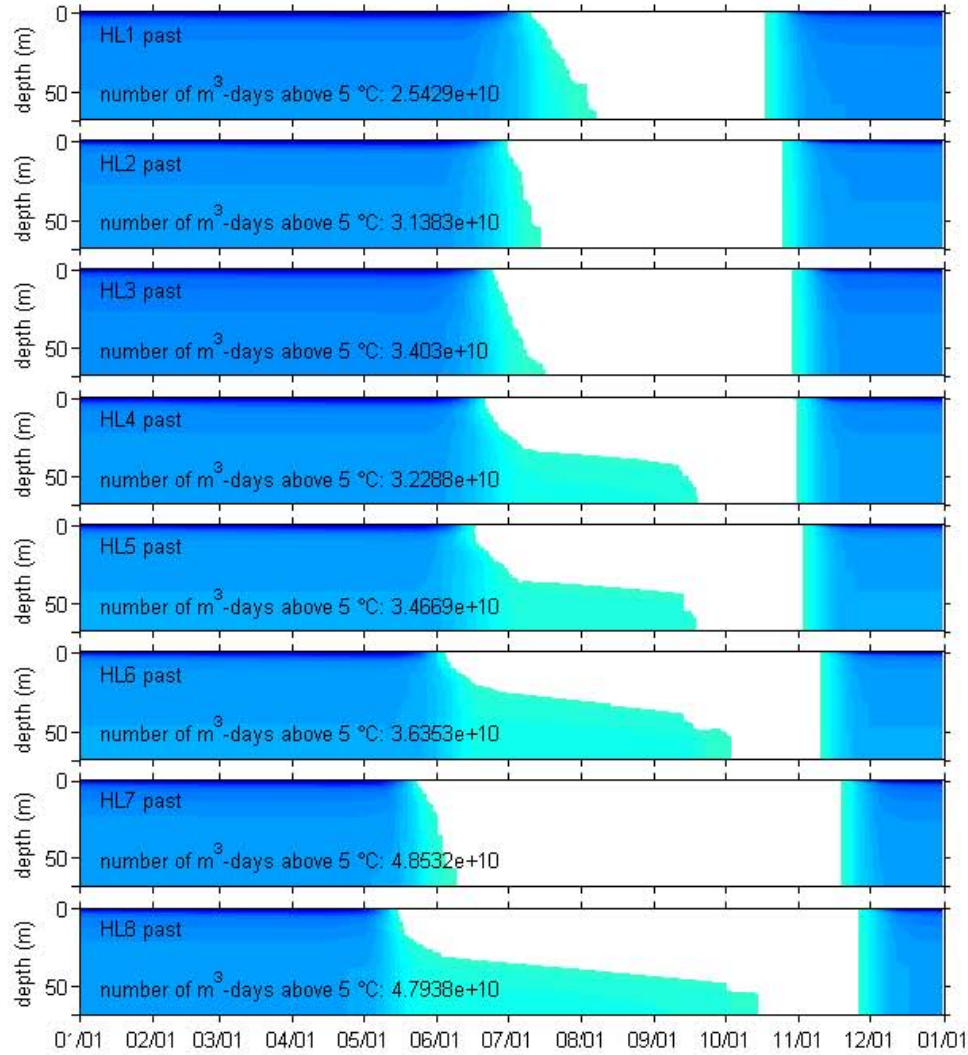


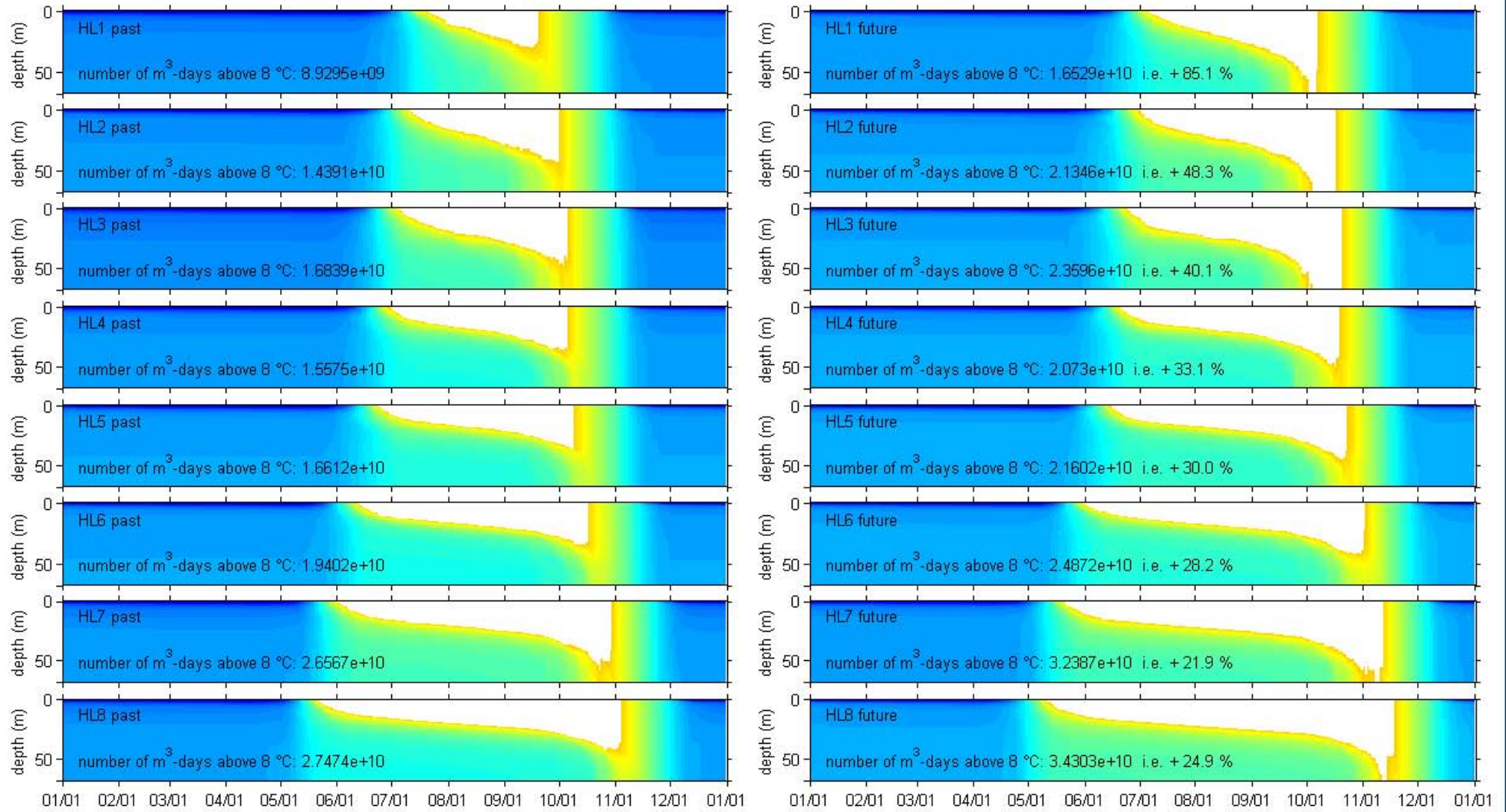


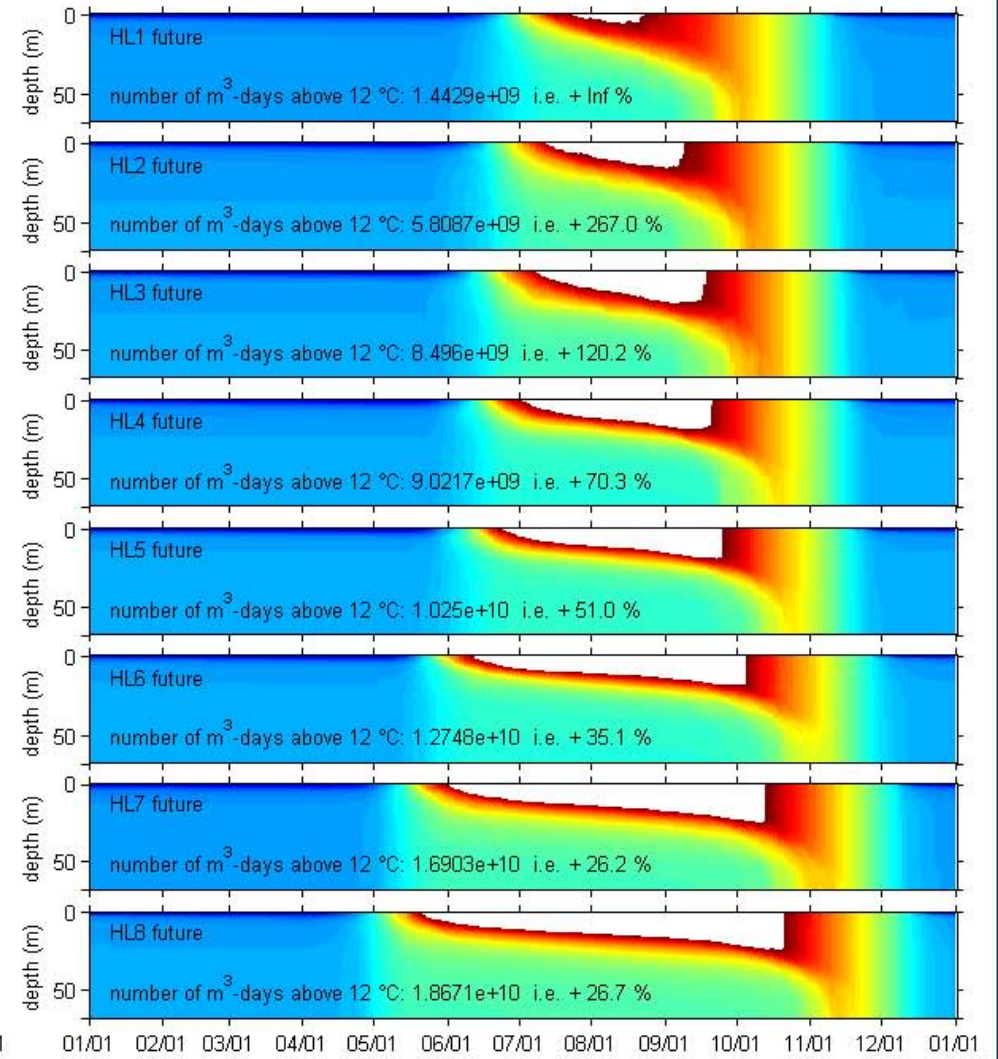
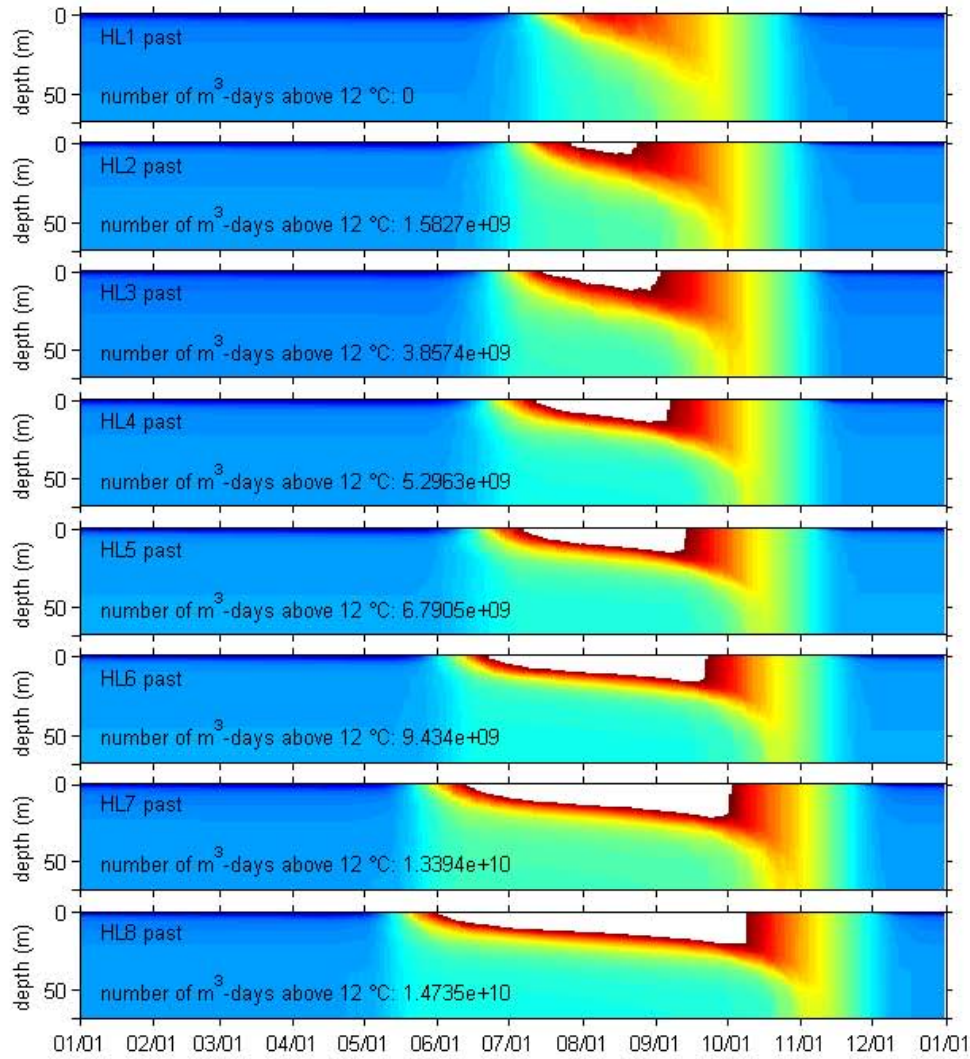


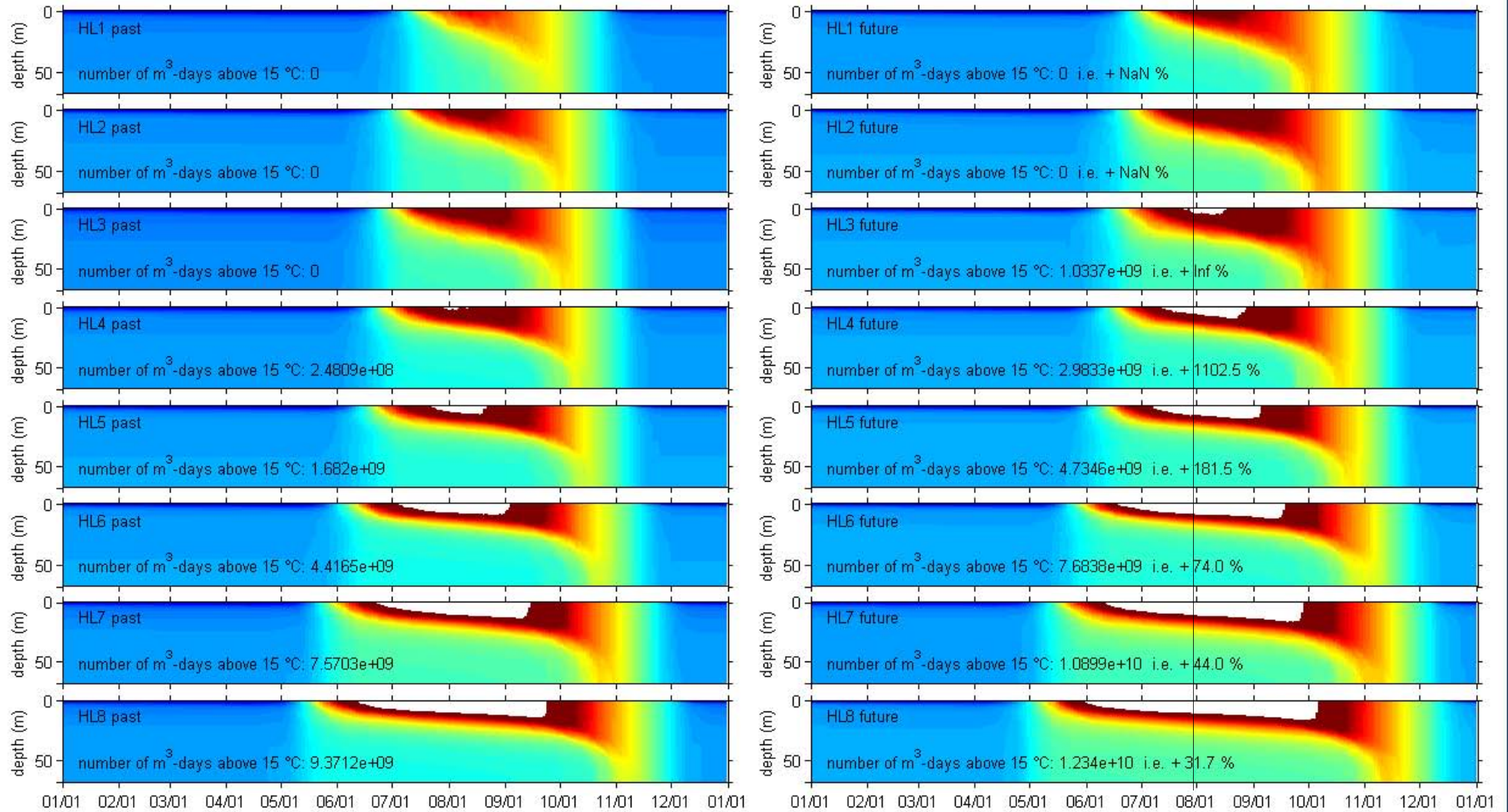
Annexe 7

Annexe 7 Cycle annuel des températures passées (à gauche) et futures (à droite) pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes avec blanchiment des températures supérieures à une température seuil et nombre de m³-jours avec température au-dessus de cette température seuil. Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour quatre températures seuil correspondant aux limites des gammes étroite et large présentées par Plumb et Blanchfield (2009) : 5°C, 8 °C, 12 °C et 15 °C.



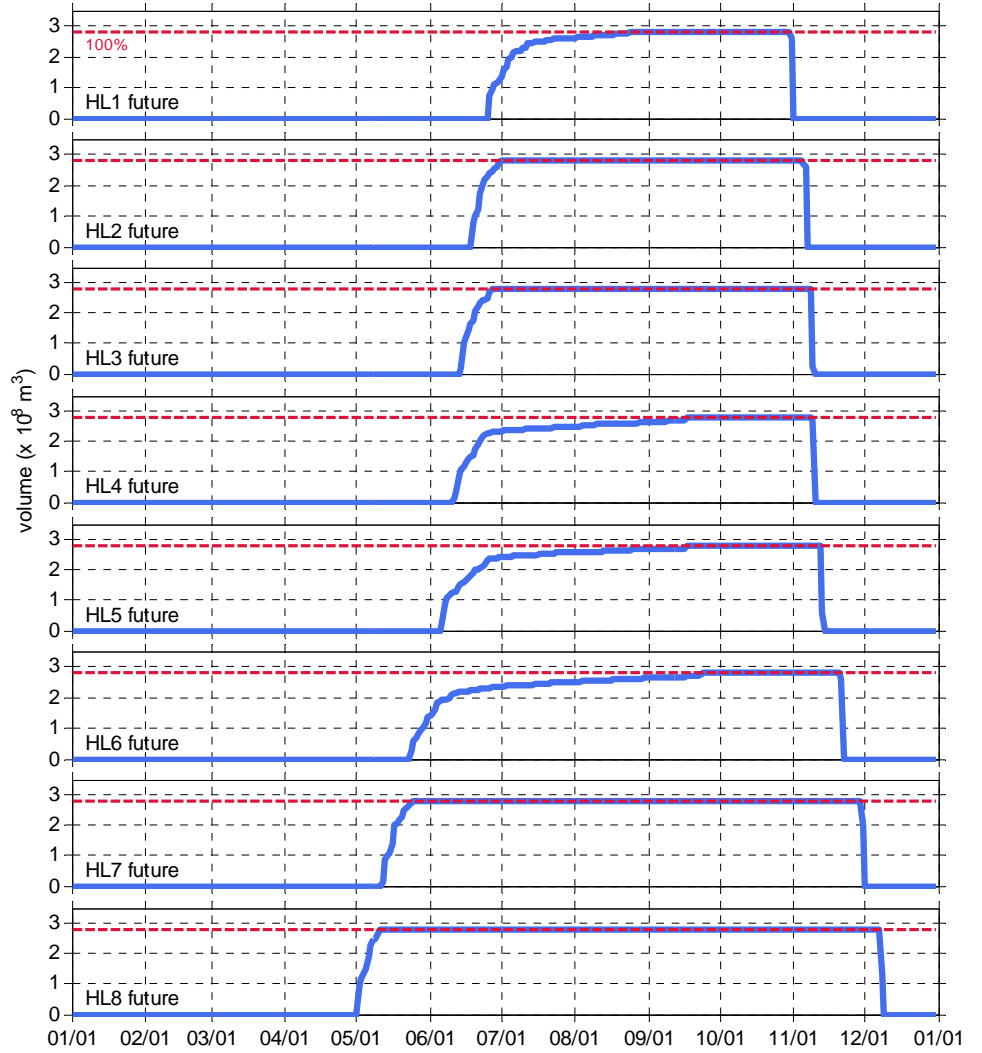
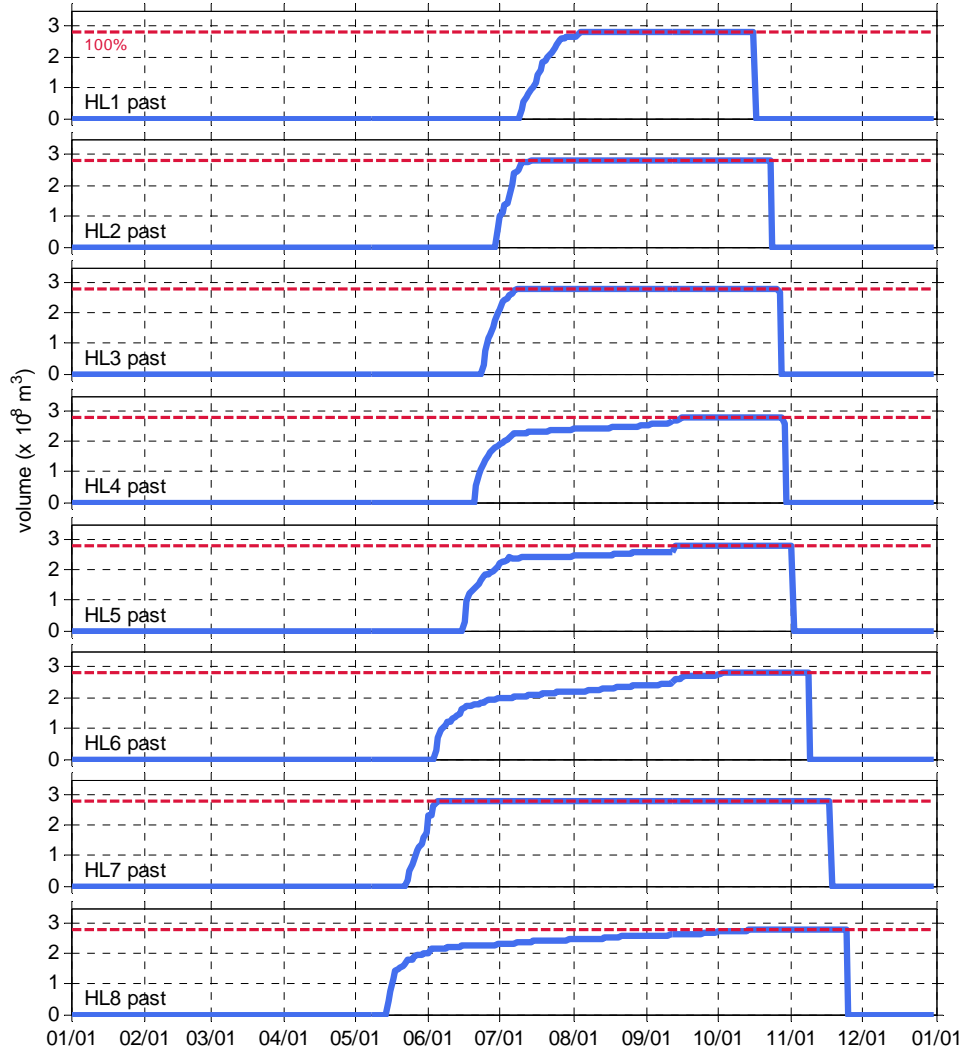


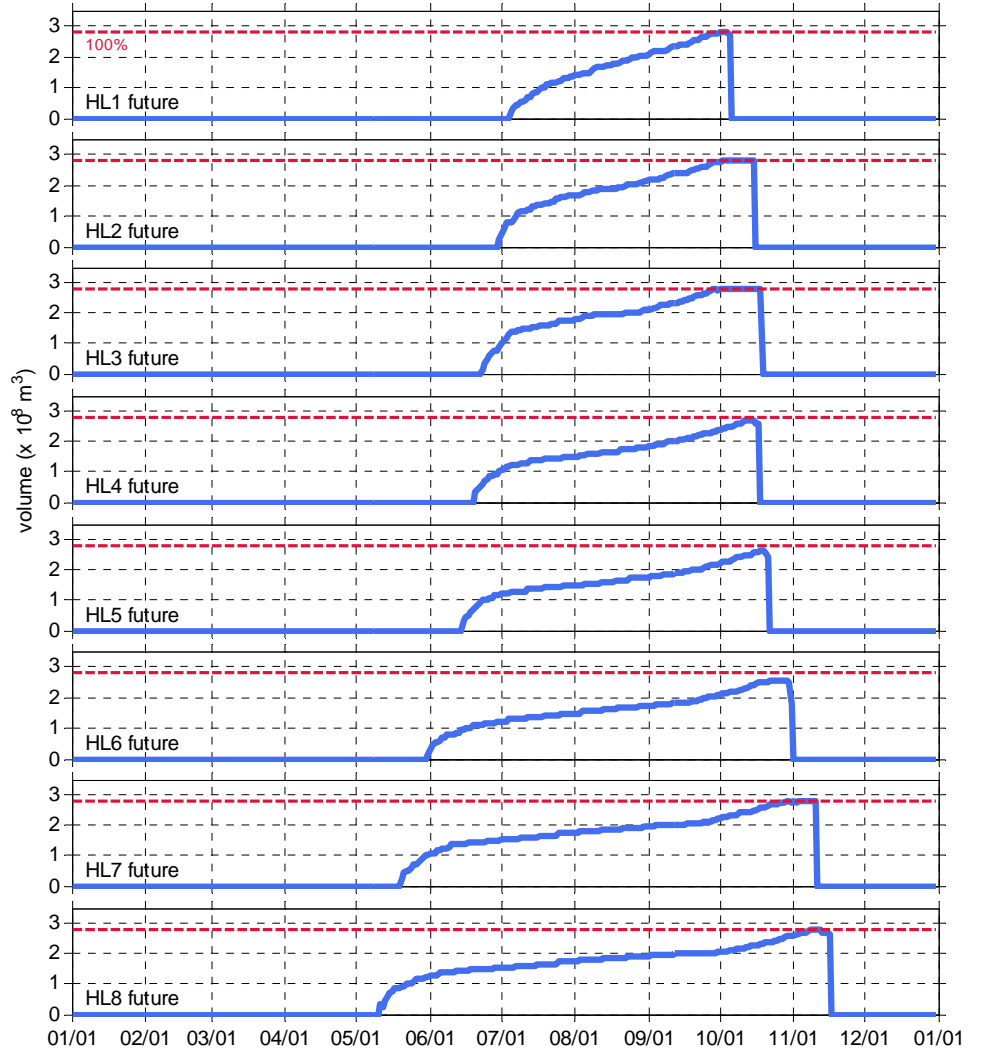
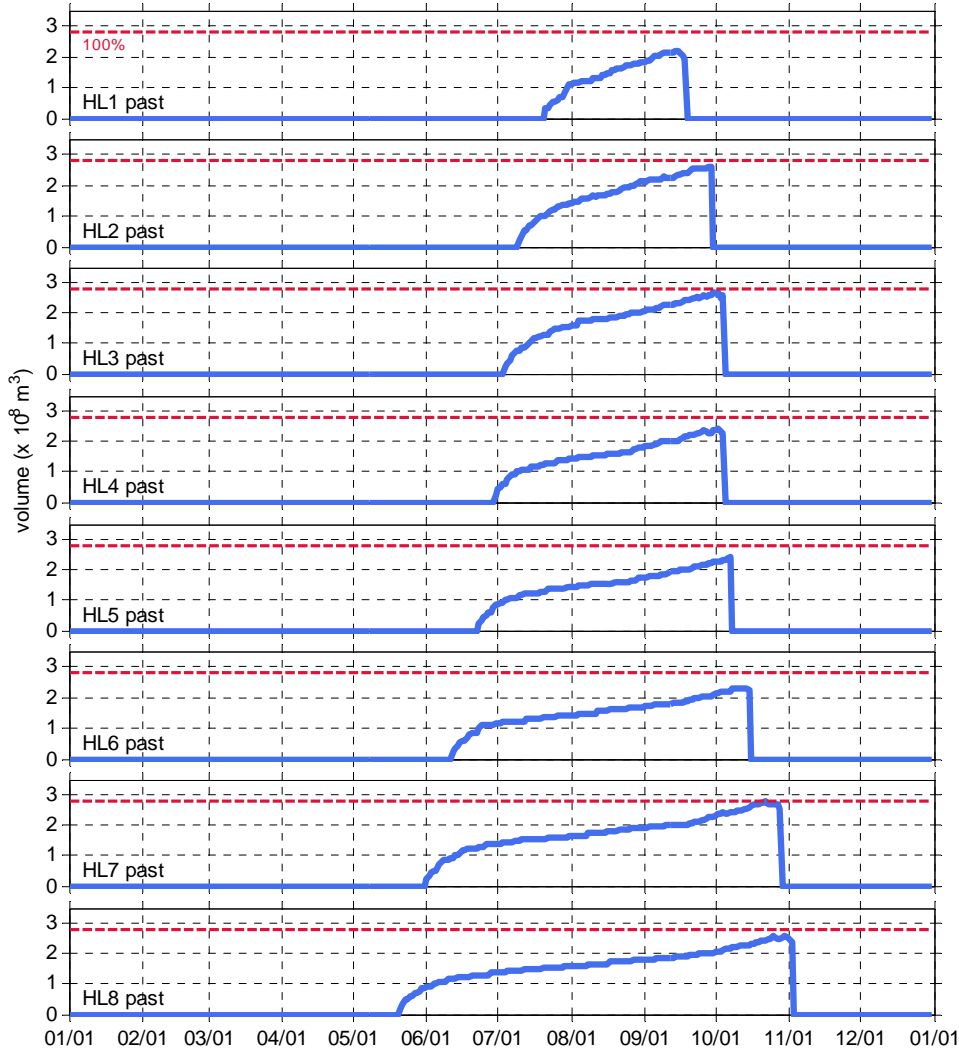


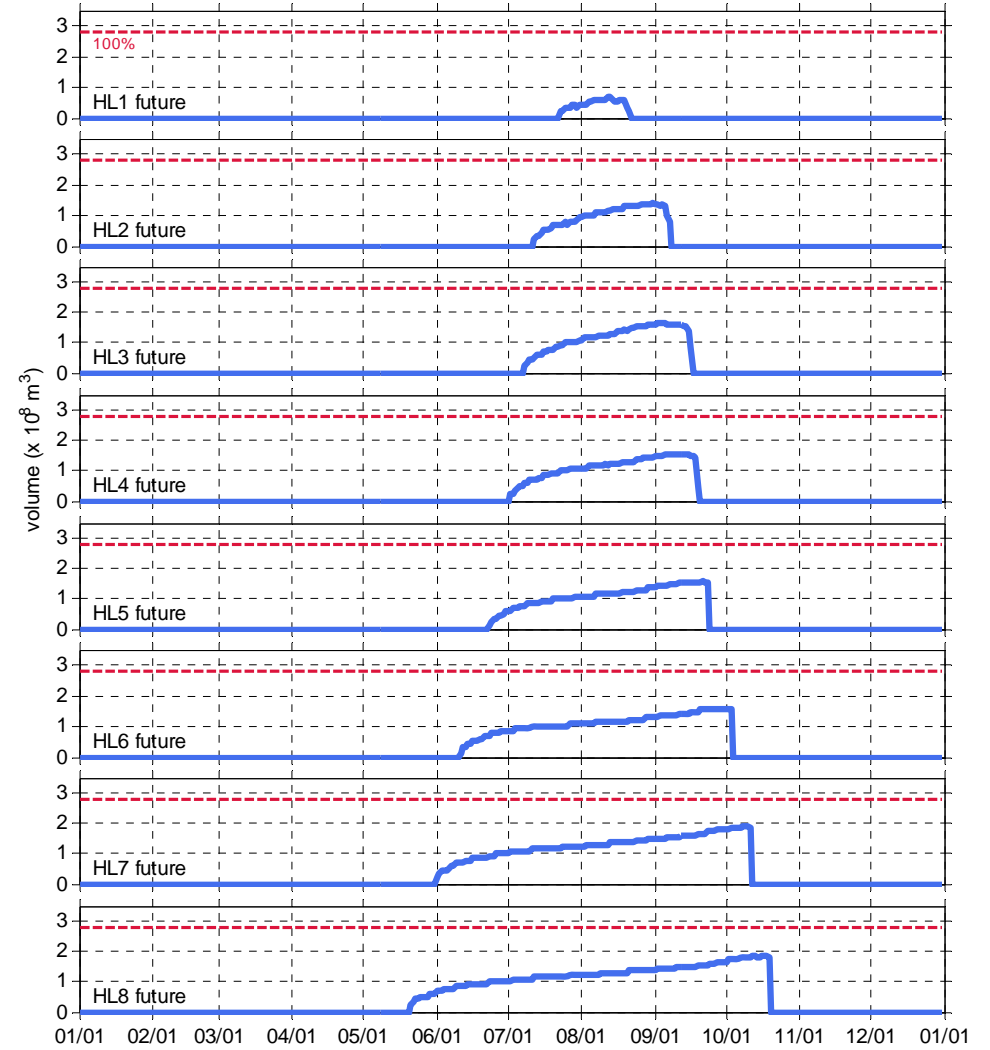
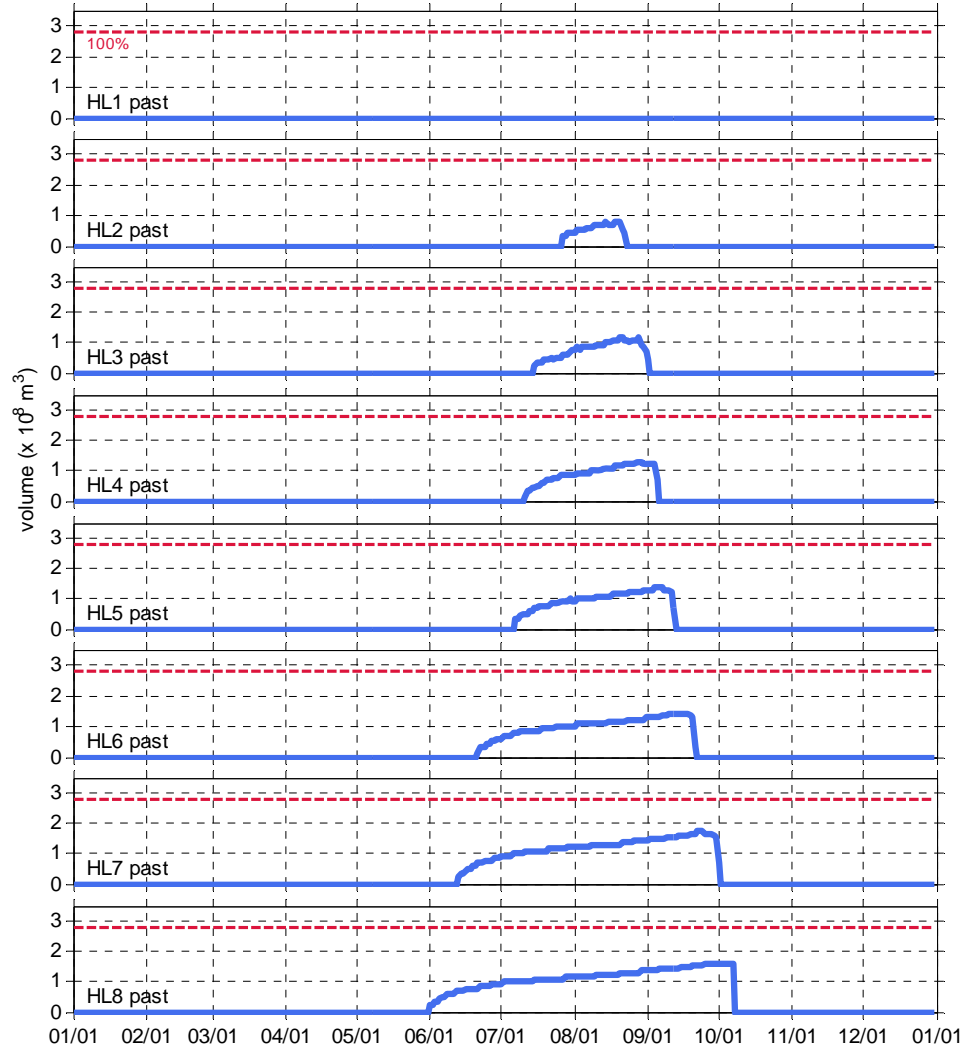


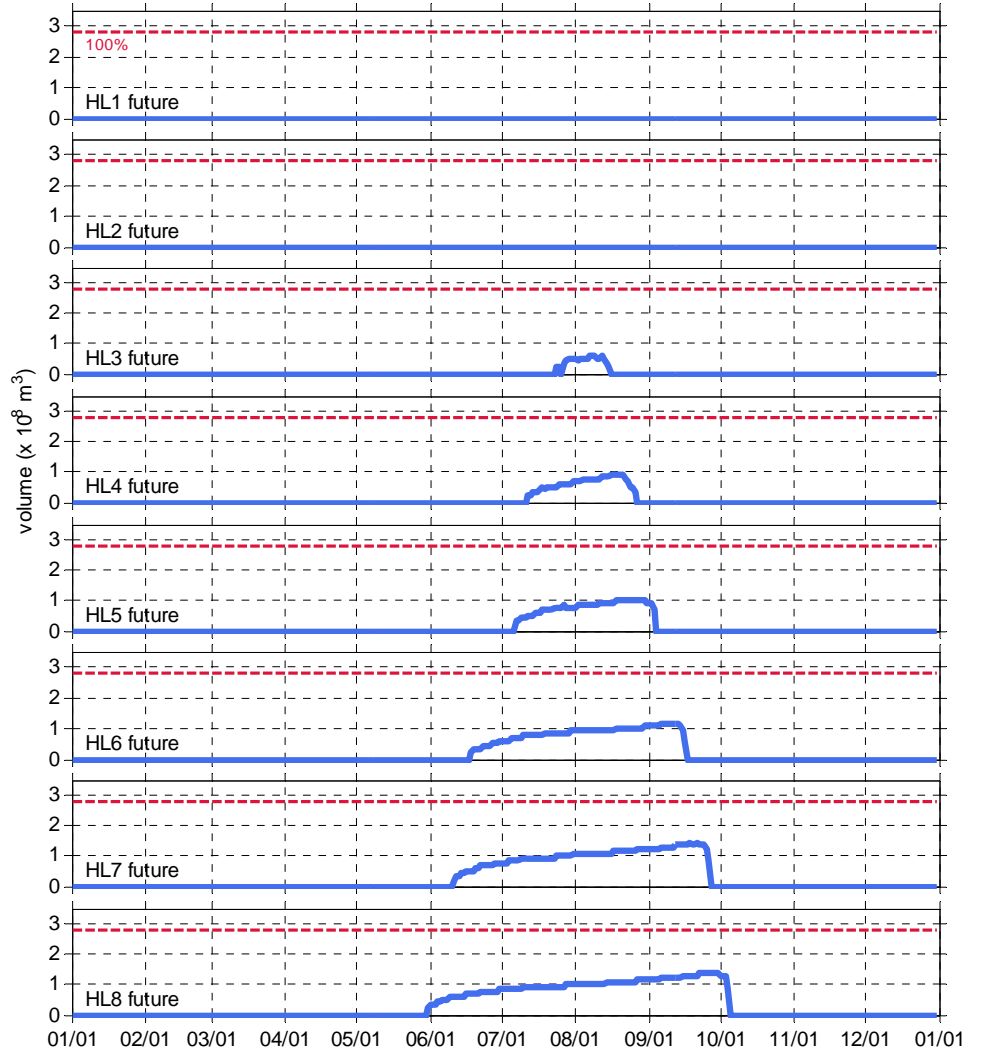
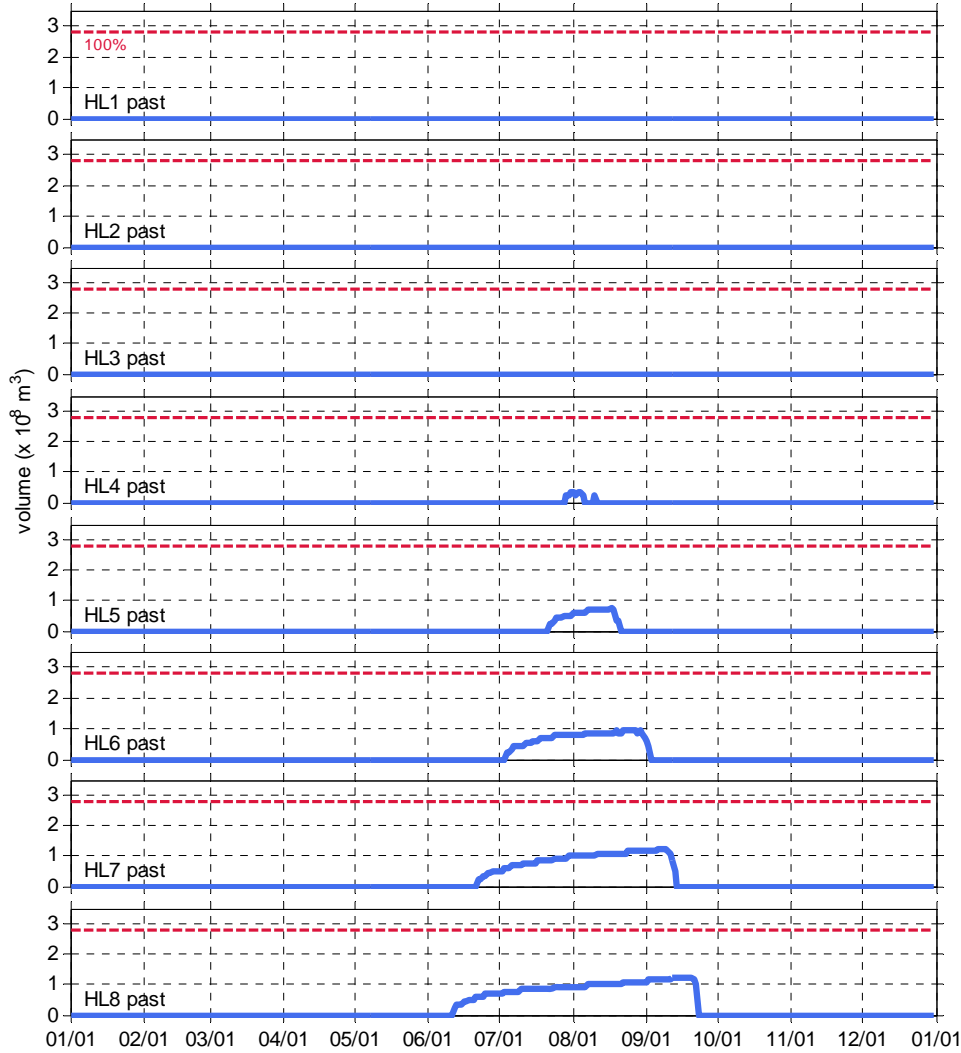
Annexe 8

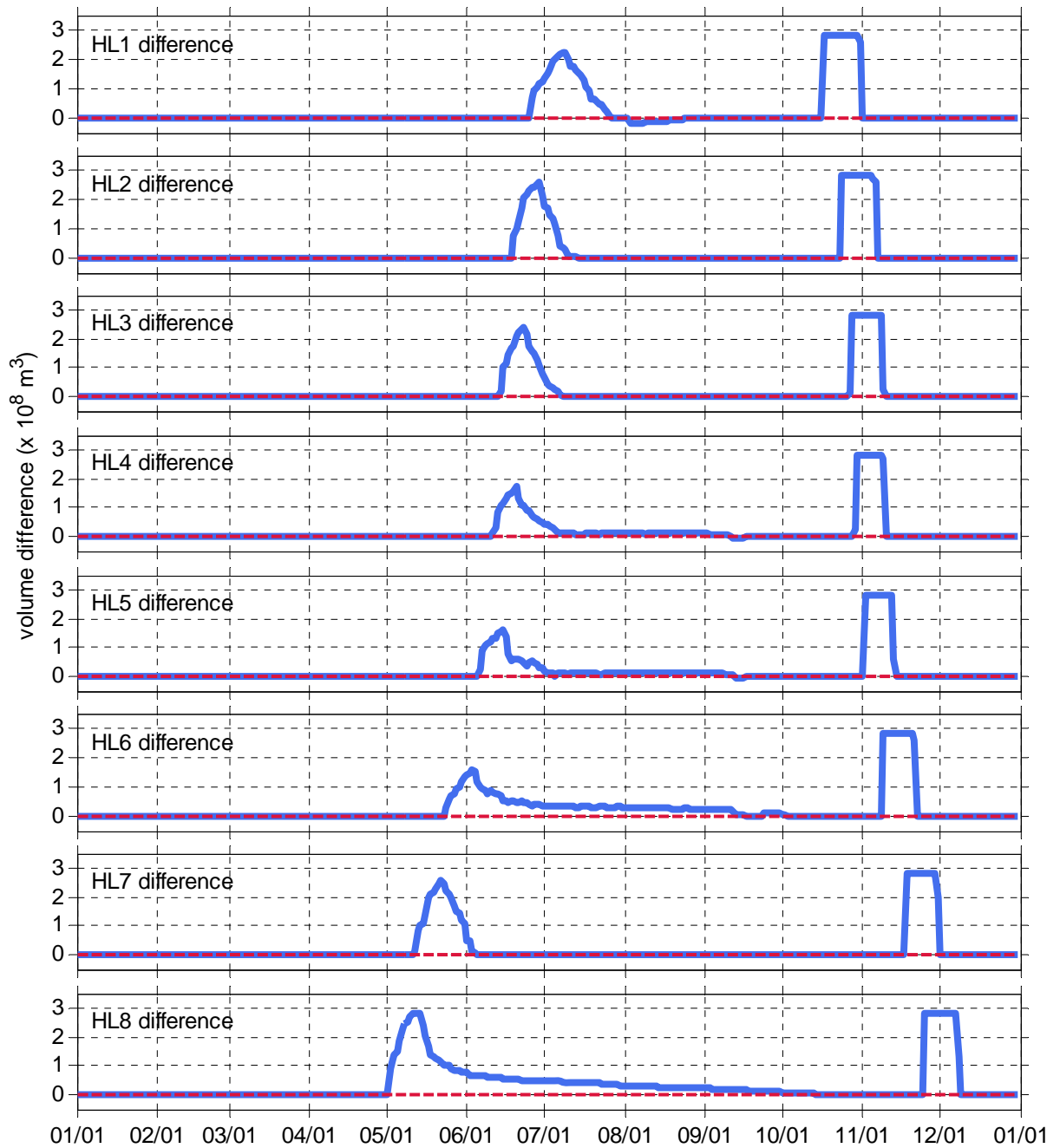
Annexe 8 Cycle annuel passé (à gauche) et futur (à droite) de volume avec températures supérieures à une température seuil pour un lac typique (Jacques-Cartier) lorsque placé à huit latitudes, et différence « futur-passé » sur une figure différente. Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour quatre températures seuil correspondant aux limites des gammes étroite et large présentées par Plumb et Blanchfield (2009) : 5°C, 8 °C, 12 °C et 15 °C.

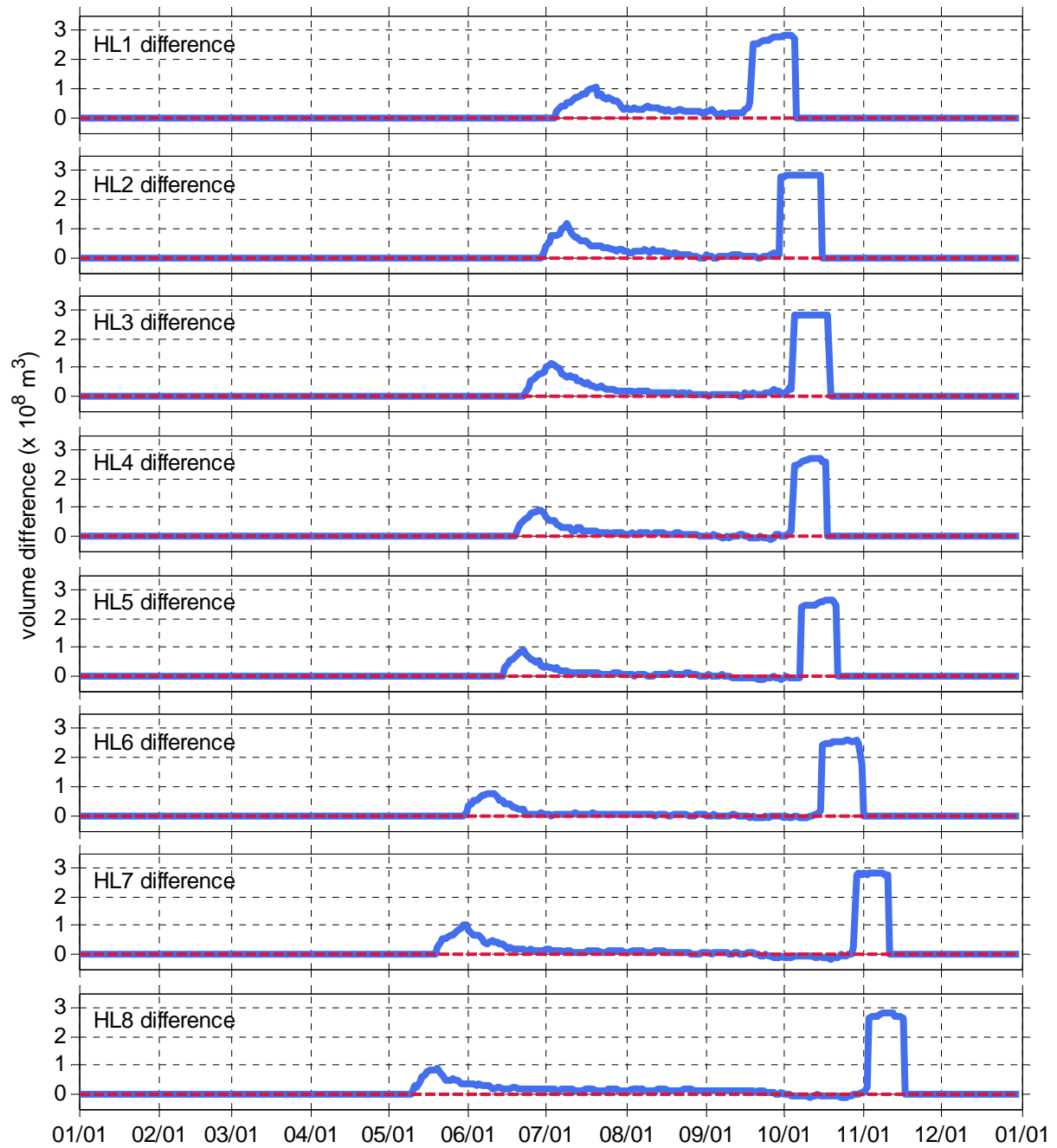


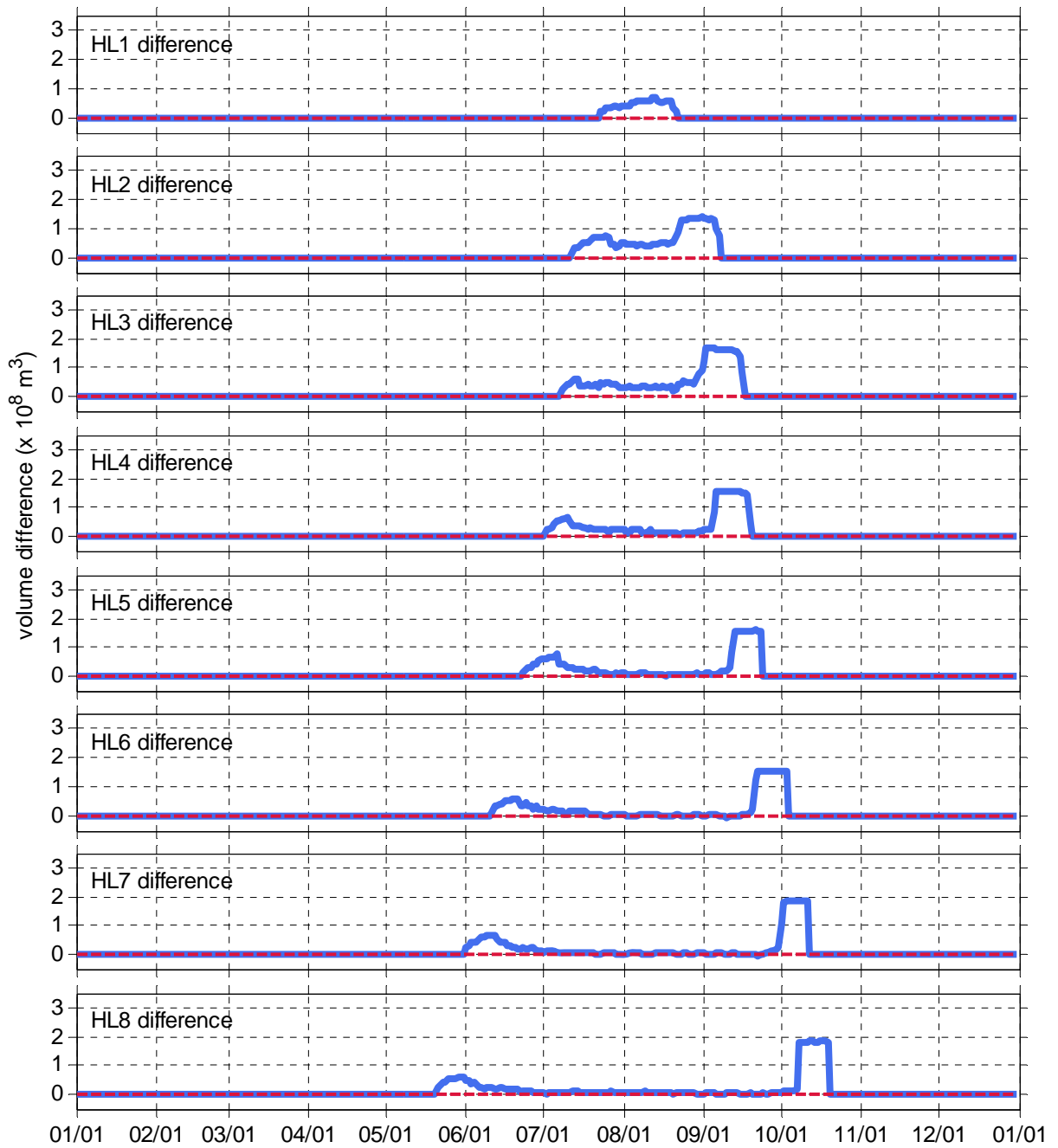


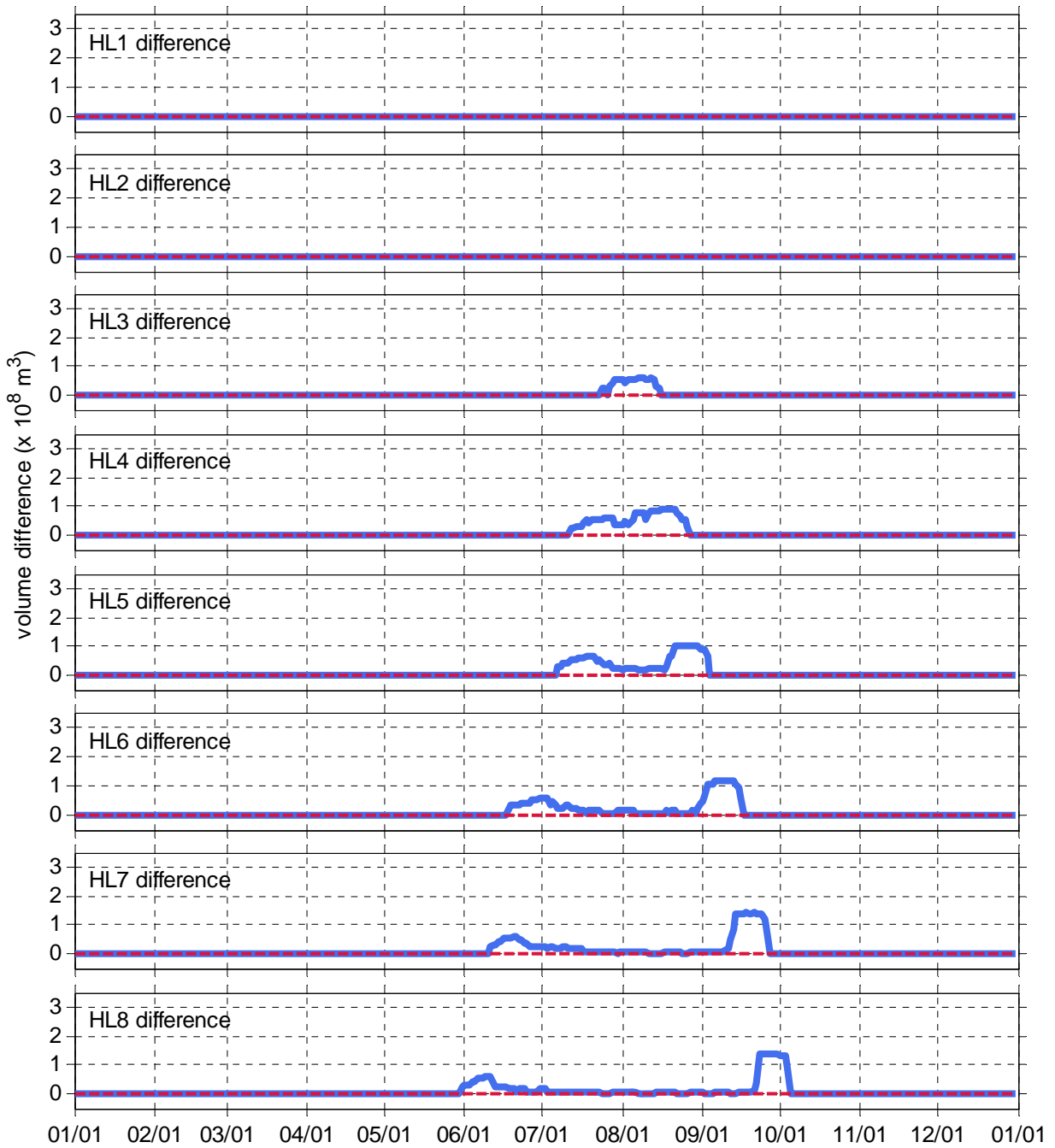






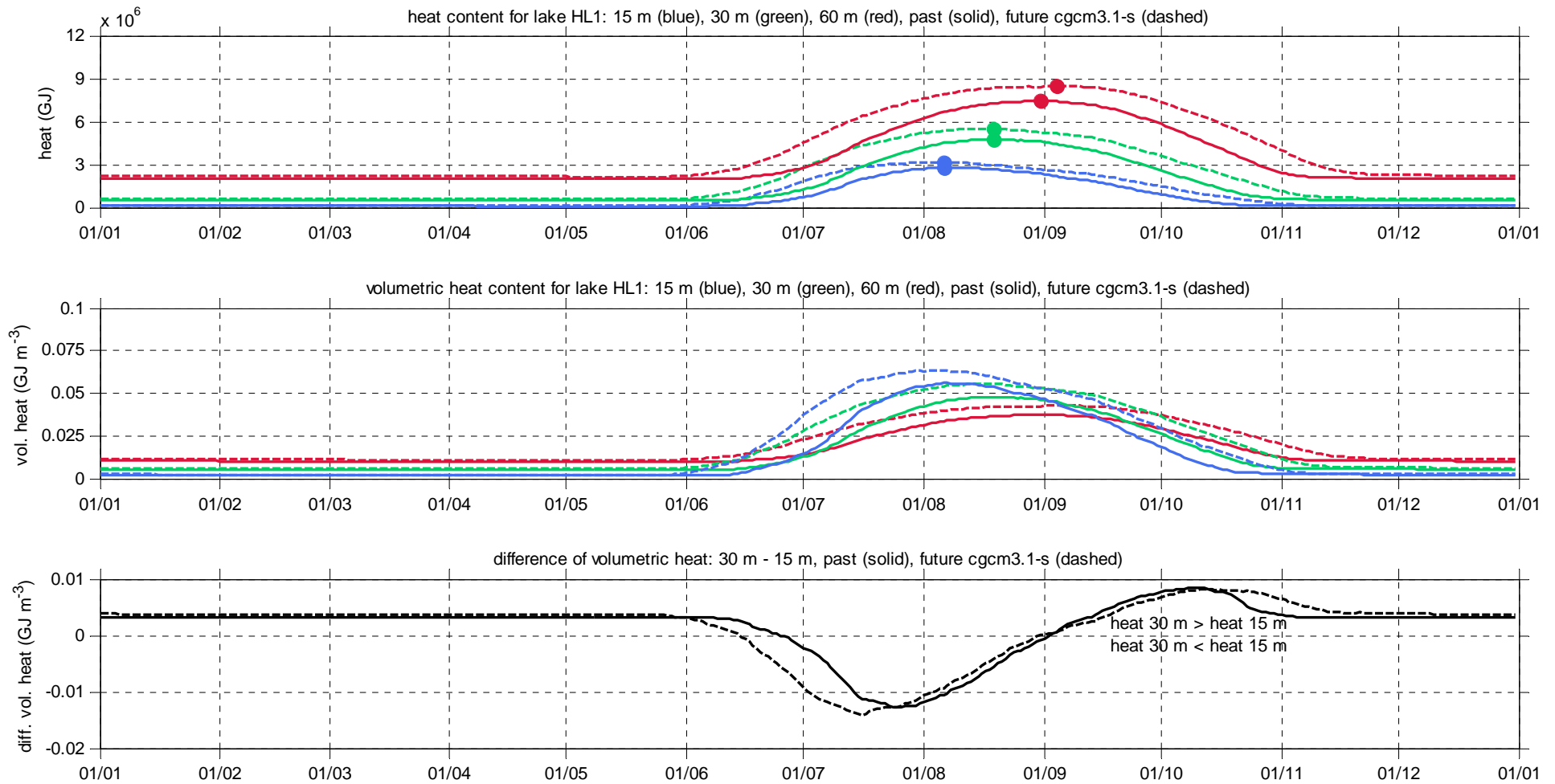


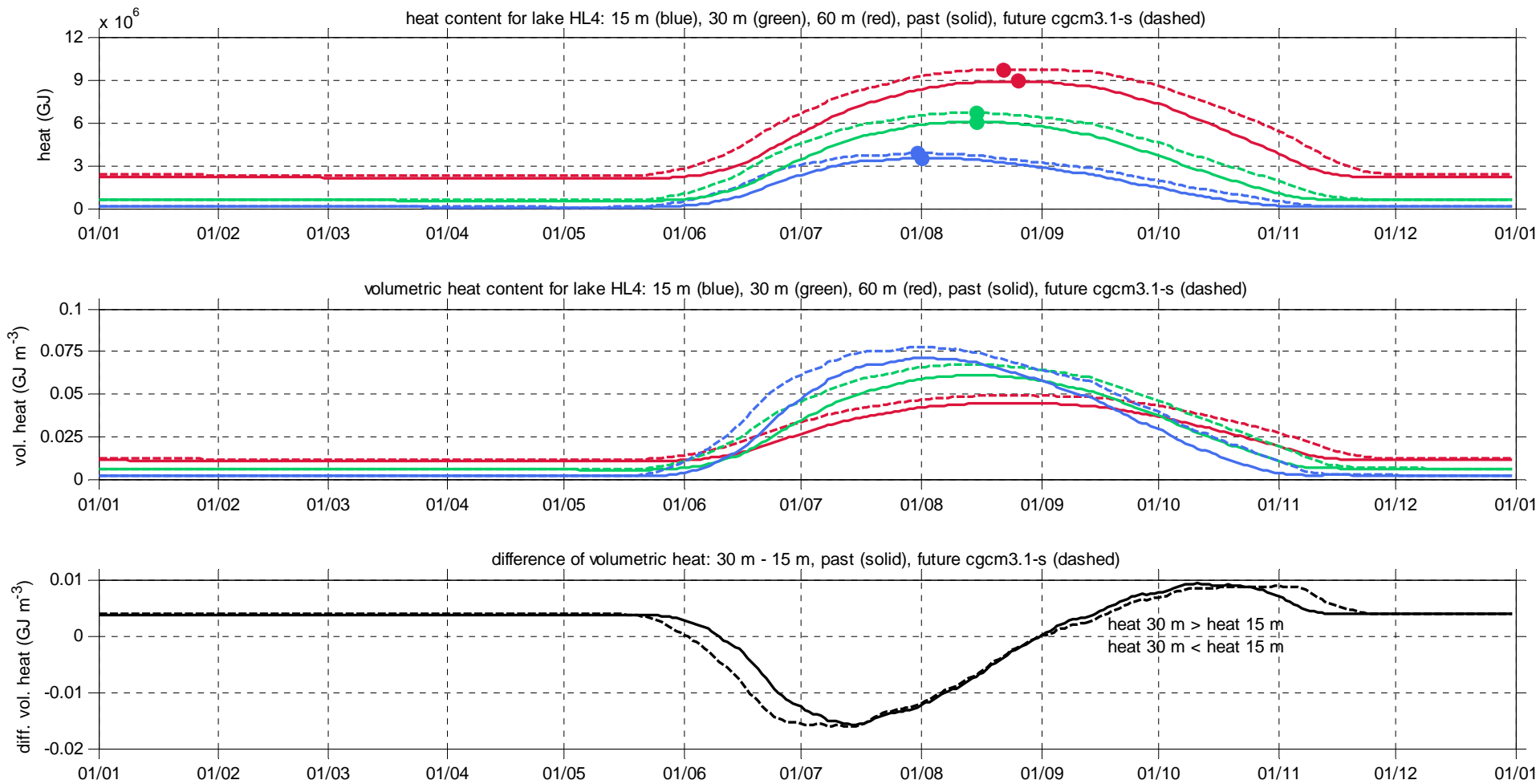


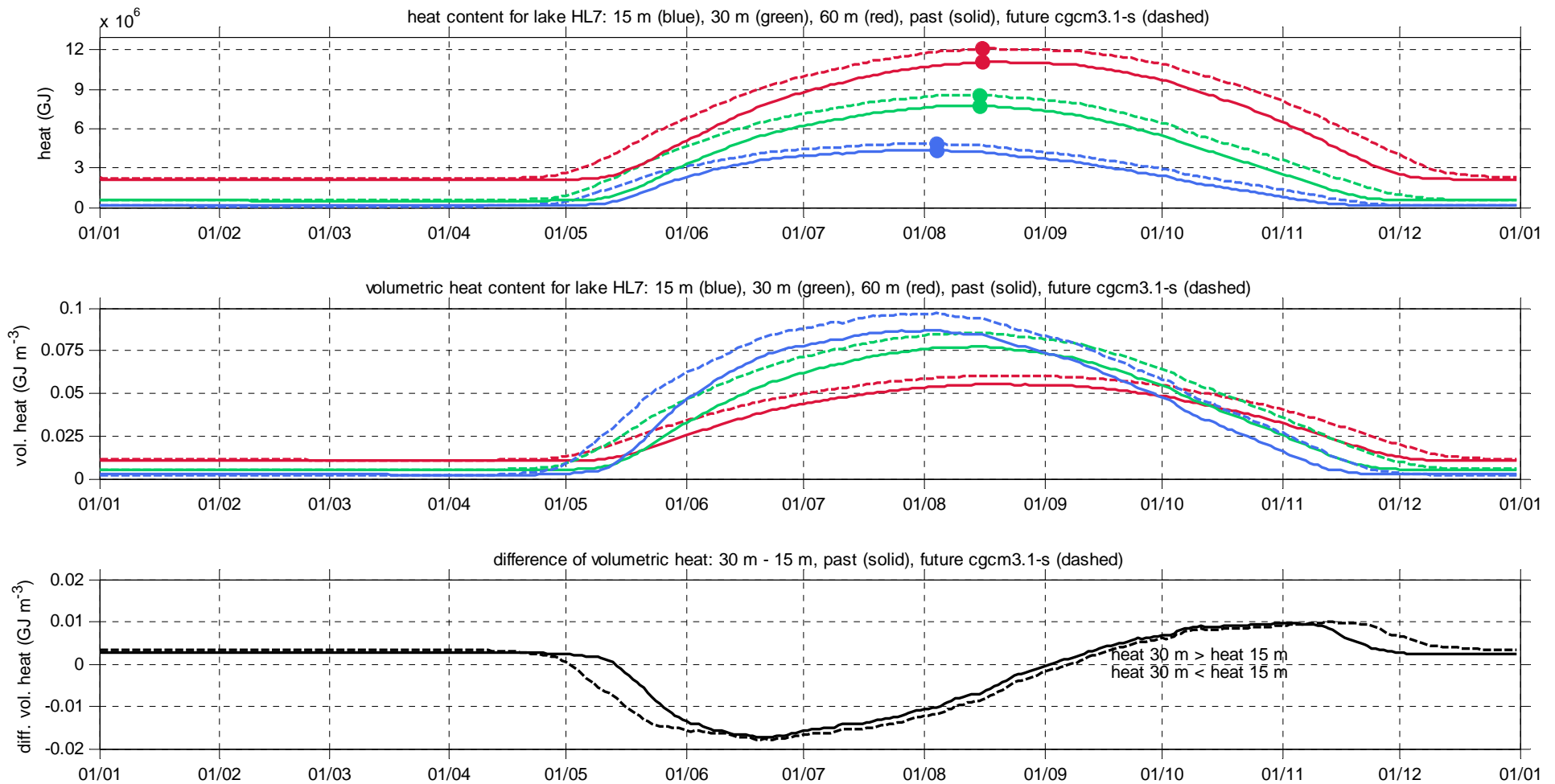


Annexe 9

Annexe 9 En haut : cycle annuel de contenu en chaleur passé (lignes continues) et futur (lignes pointillées) pour trois lacs hypothétiques de différentes profondeurs (15 m, bleu; 30 m, vert; 60 m, rouge). Au milieu : idem pour contenu en chaleur volumique. En bas : différence de contenu en chaleur volumique « lac 30 m-lac 15 m » passée (ligne continue) et future (ligne pointillée). Les contenus en chaleur futurs sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour trois latitudes : HL1, HL4 et HL7.



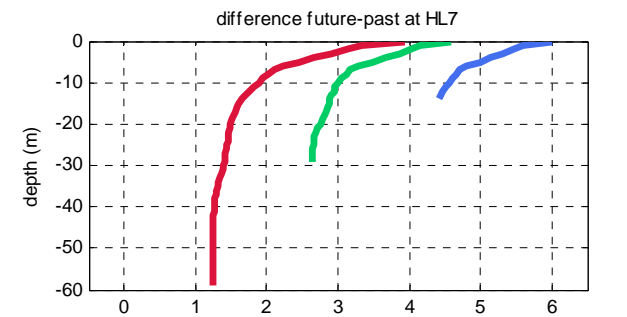
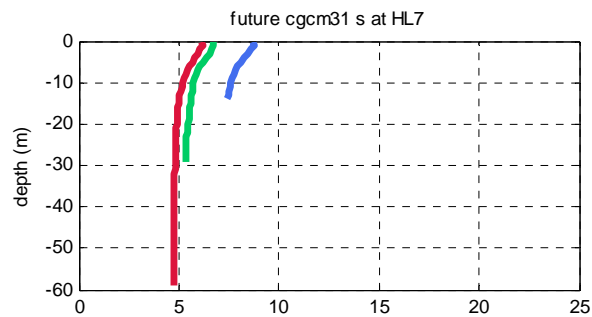
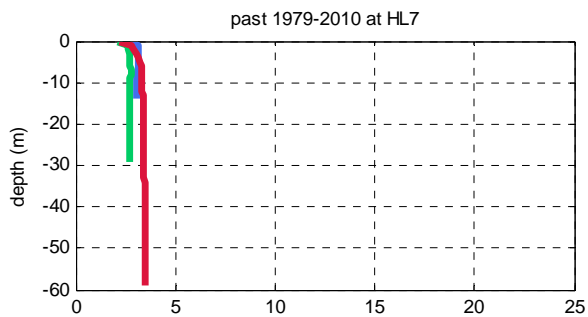
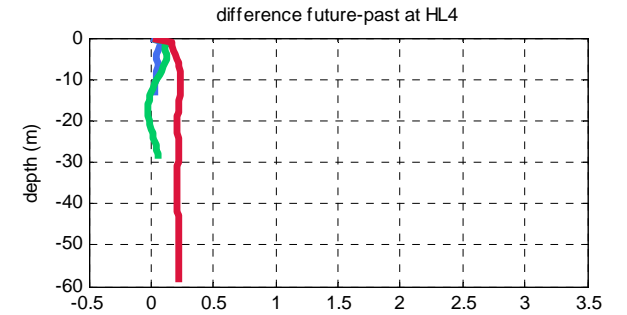
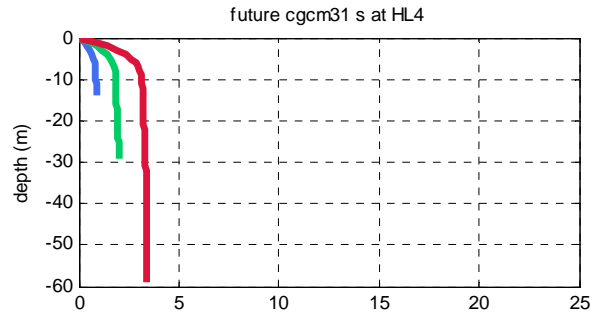
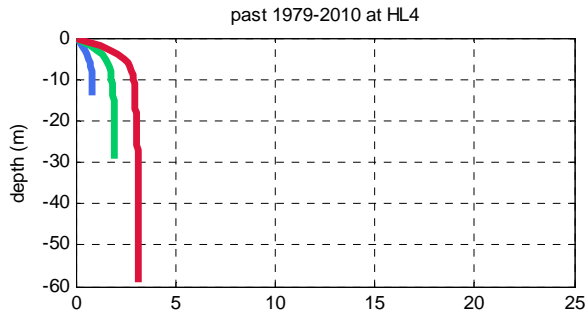
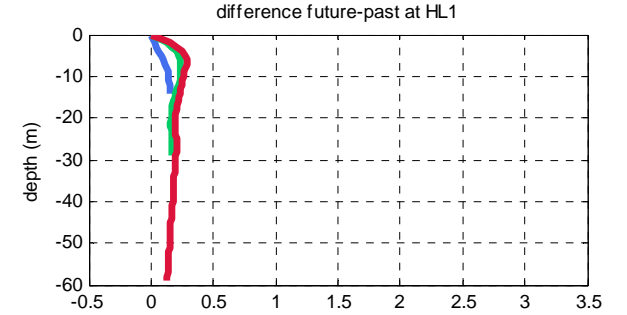
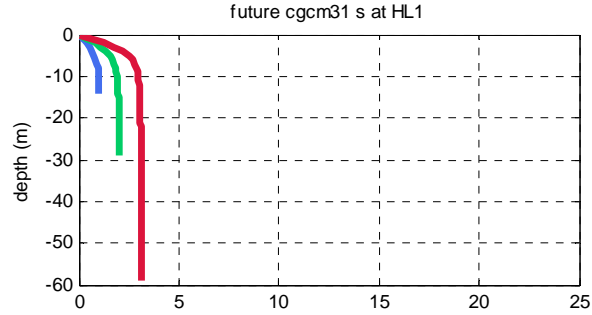
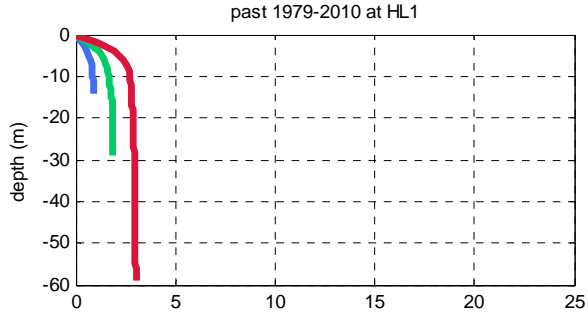




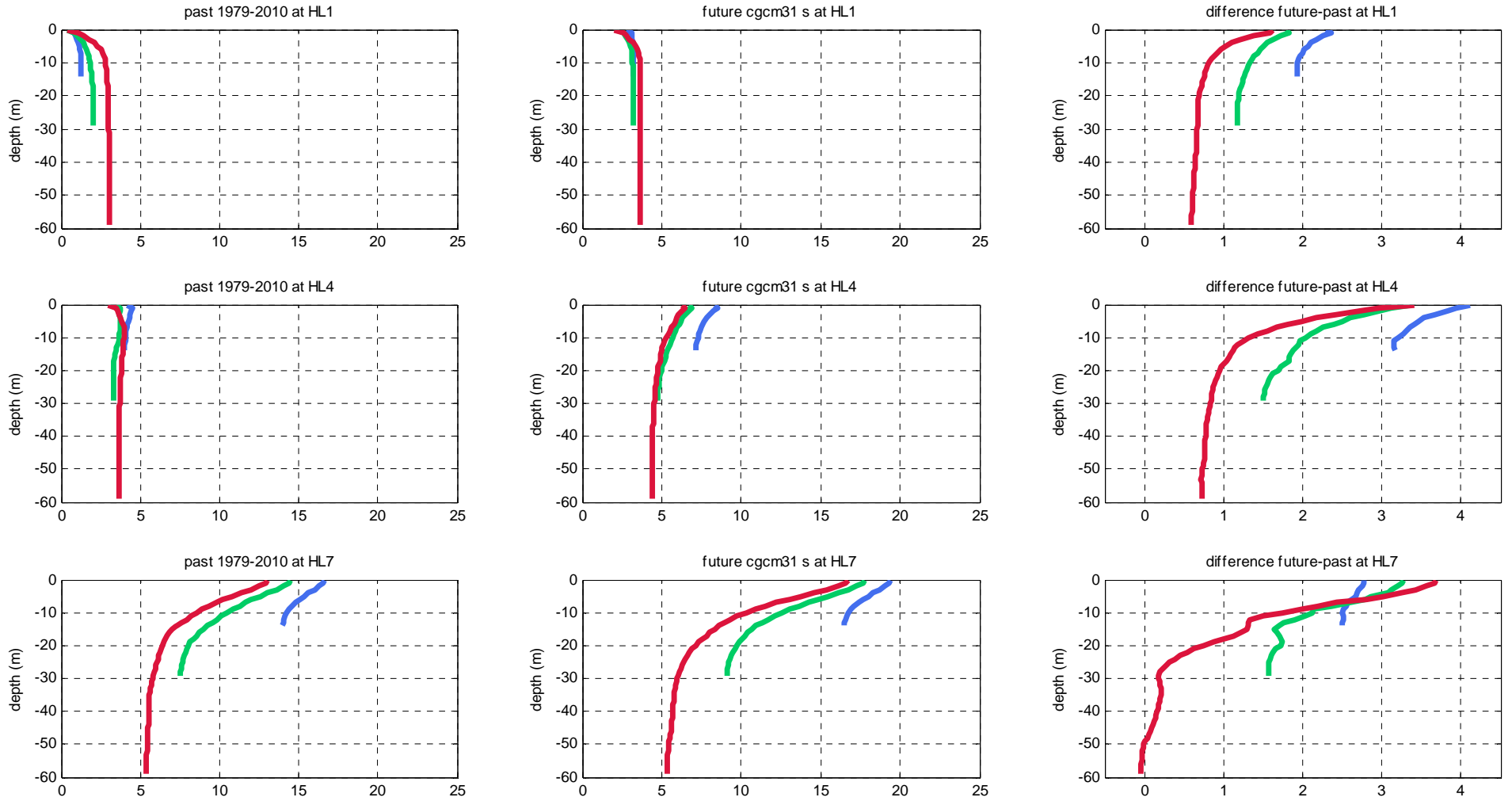
Annexe 10

Annexe 10 Profils de température passée et future pour trois lacs hypothétiques de différentes profondeurs (15 m, bleu; 30 m, vert; 60 m, rouge) lorsque placés aux latitudes HL1, HL4 et HL7, et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour six décades entre mi-mai et mi-octobre.

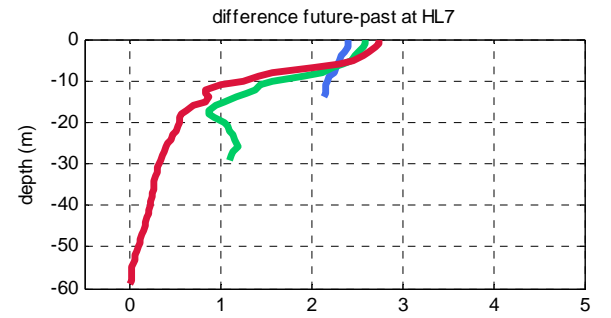
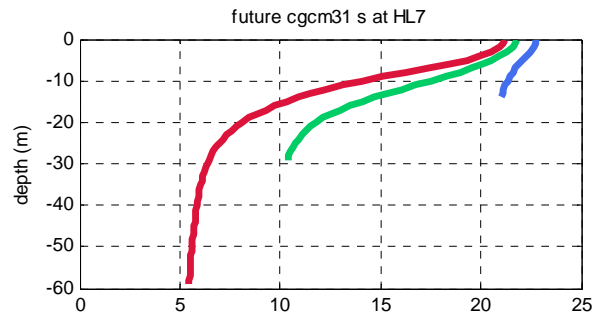
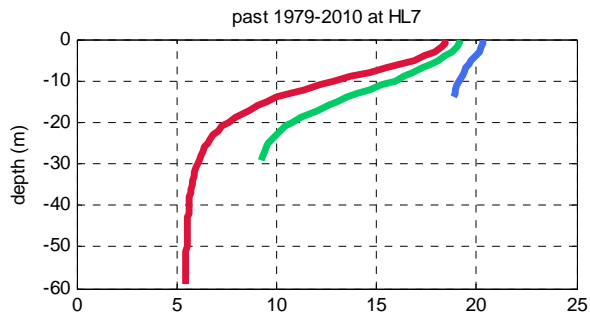
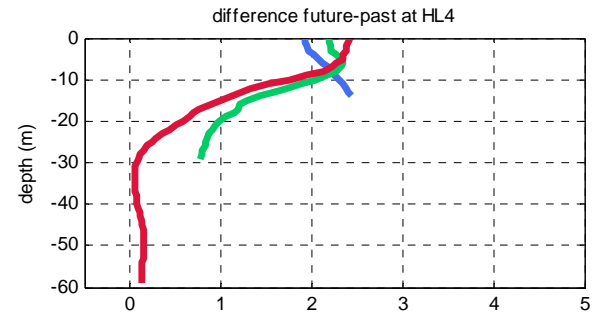
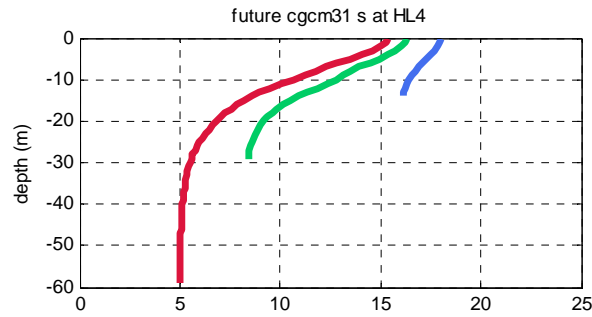
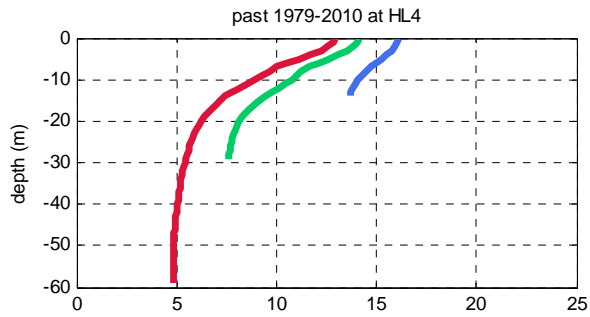
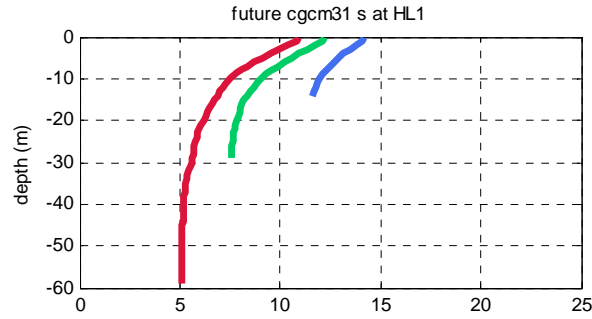
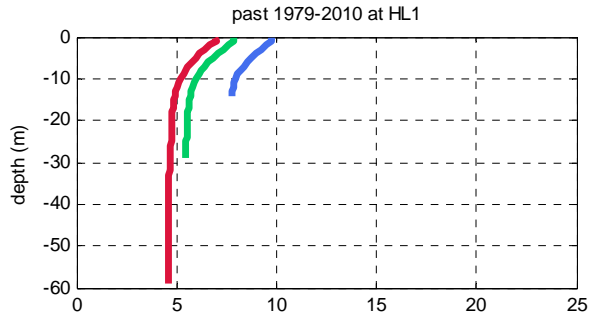
Past and future average temperature profiles for period 11 May to 20 May: 3 depths at lakes HL1, HL4 and HL7



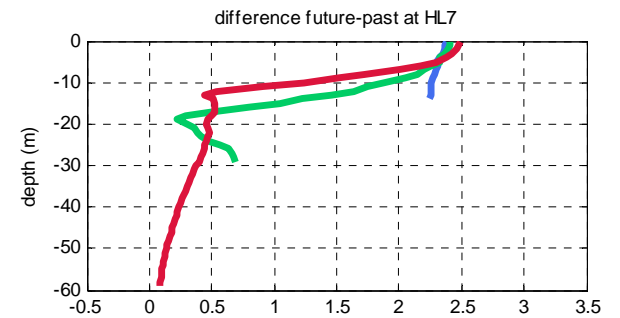
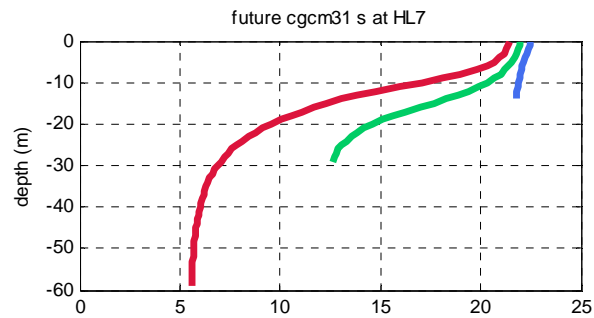
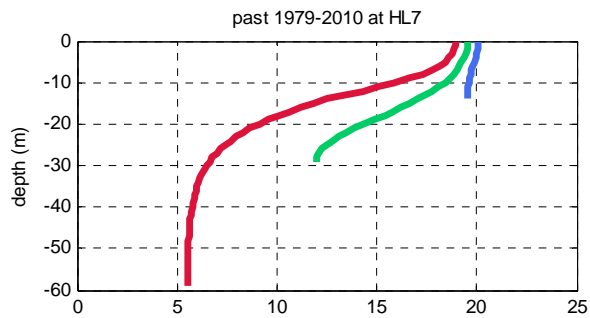
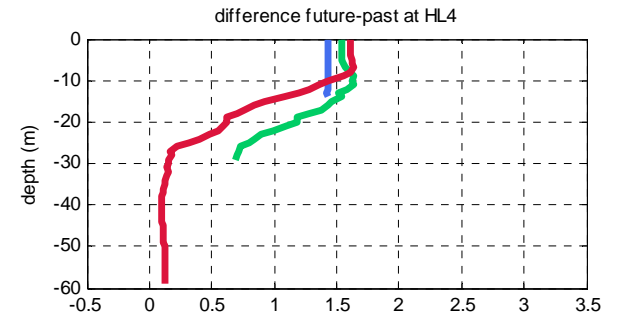
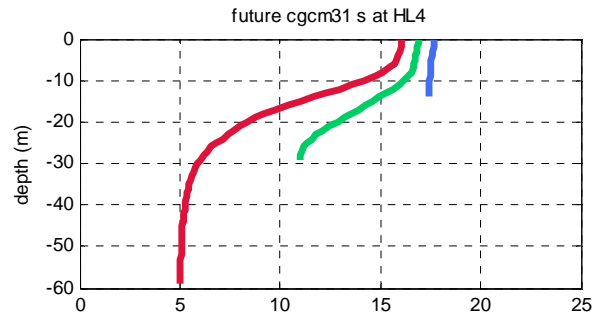
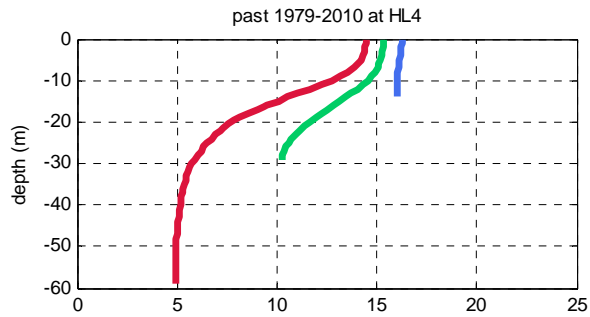
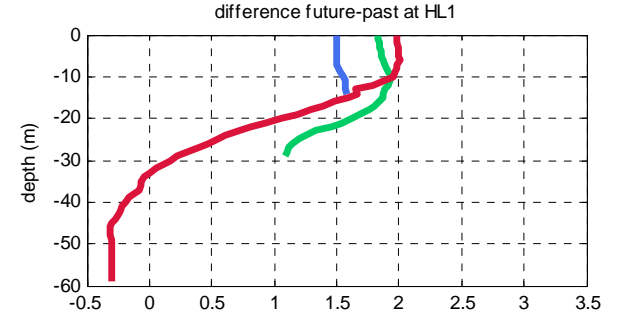
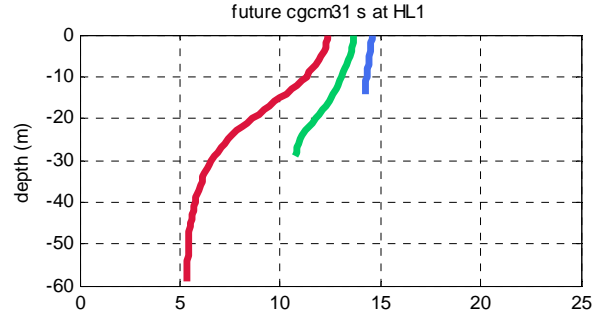
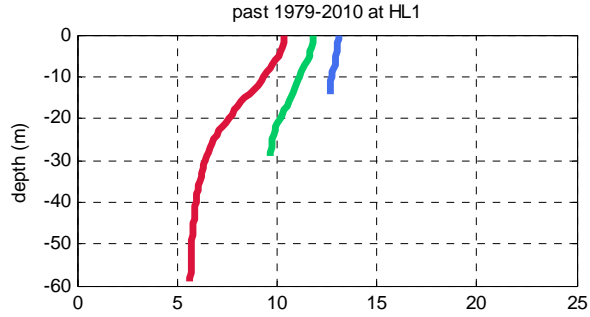
Past and future average temperature profiles for period 11 Jun to 20 Jun: 3 depths at lakes HL1, HL4 and HL7



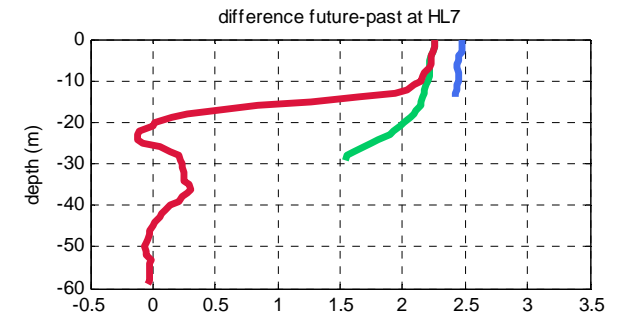
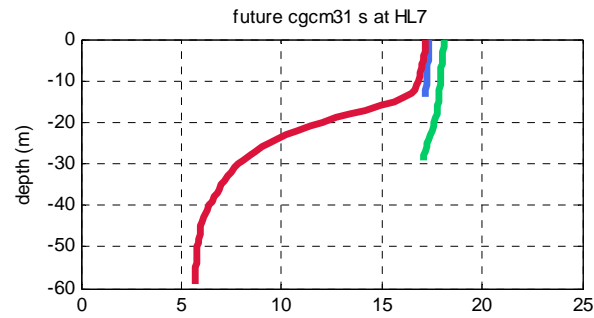
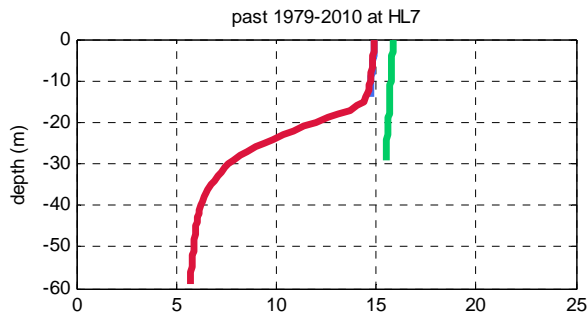
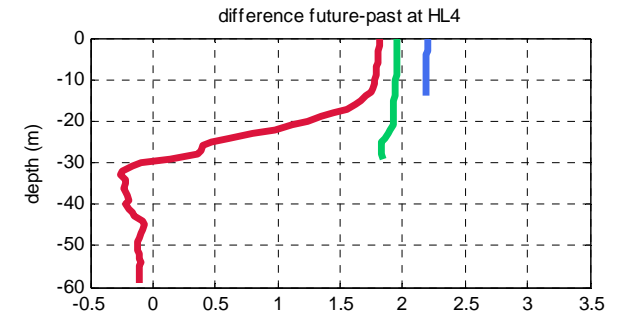
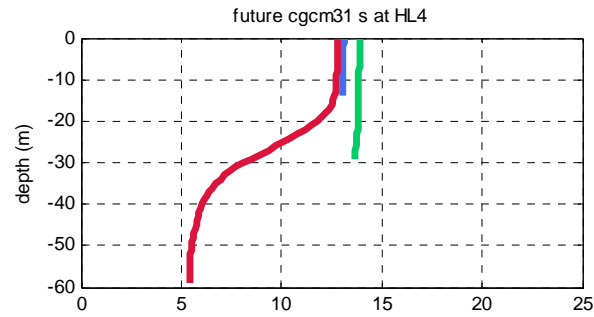
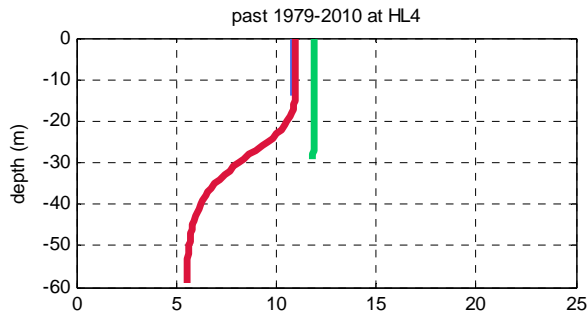
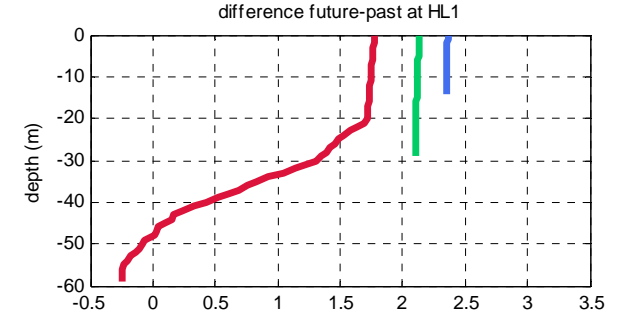
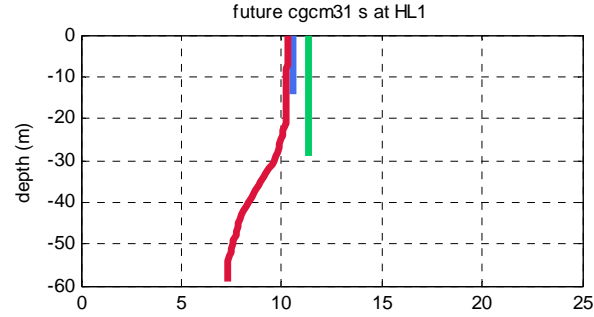
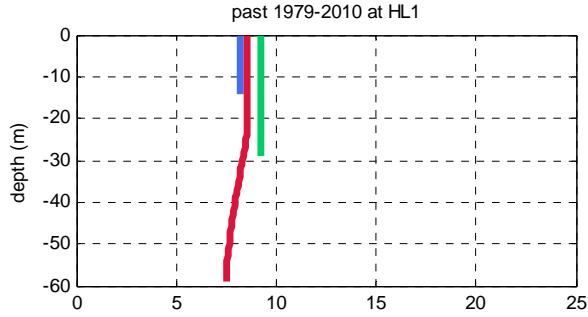
Past and future average temperature profiles for period 11 Jul to 20 Jul: 3 depths at lakes HL1, HL4 and HL7



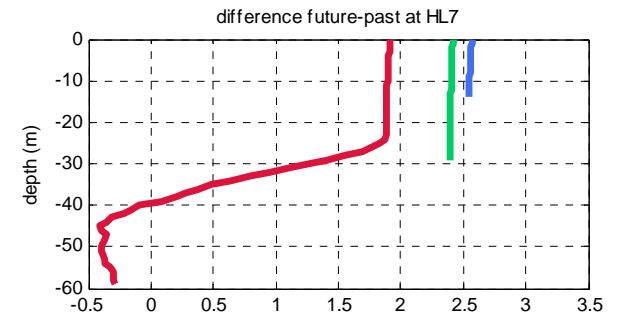
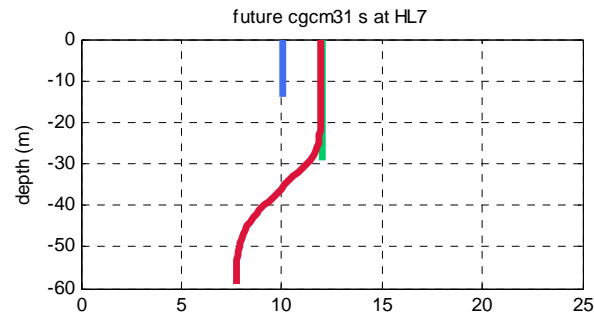
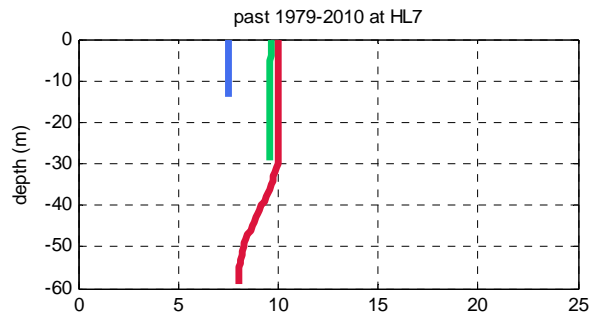
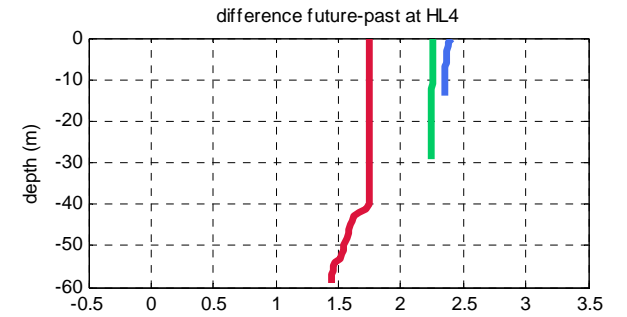
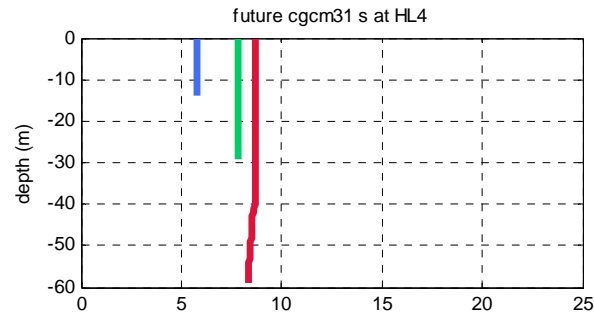
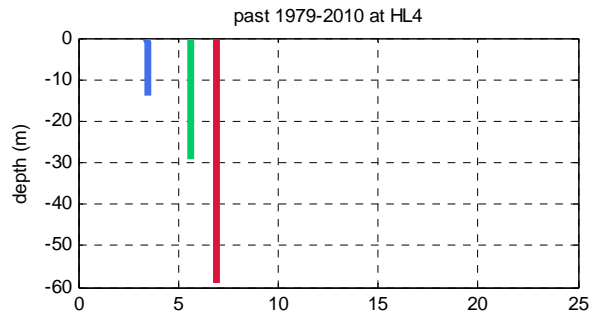
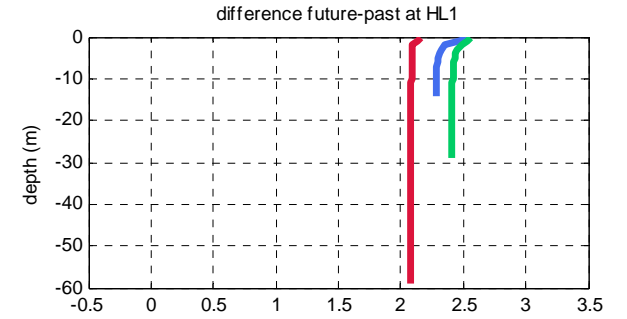
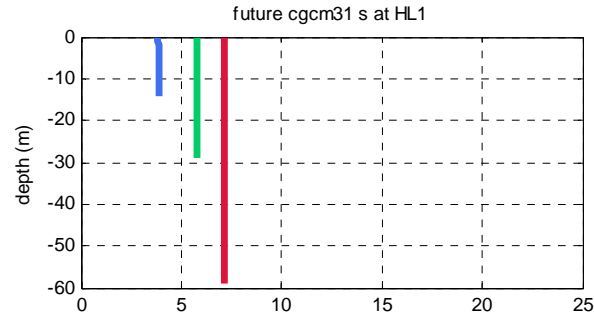
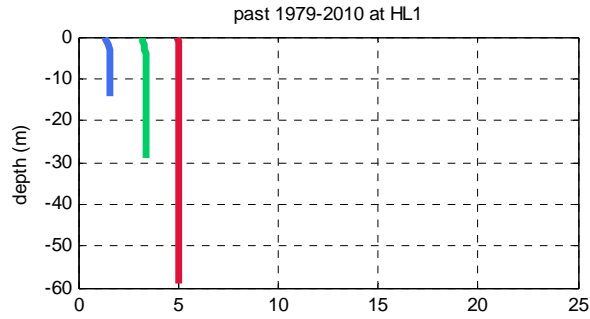
Past and future average temperature profiles for period 11 Aug to 20 Aug: 3 depths at lakes HL1, HL4 and HL7



Past and future average temperature profiles for period 11 Sep to 20 Sep: 3 depths at lakes HL1, HL4 and HL7

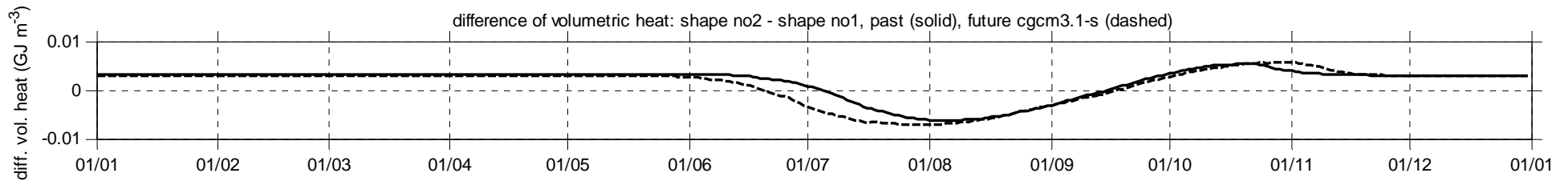
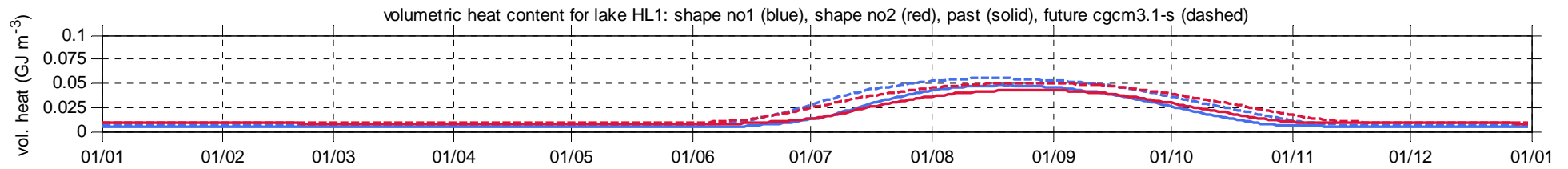
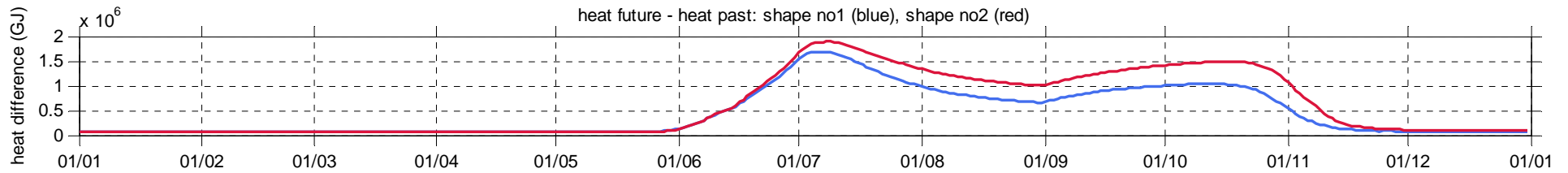
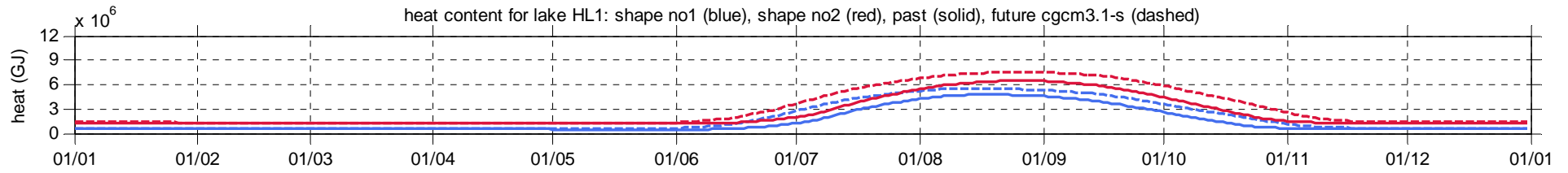


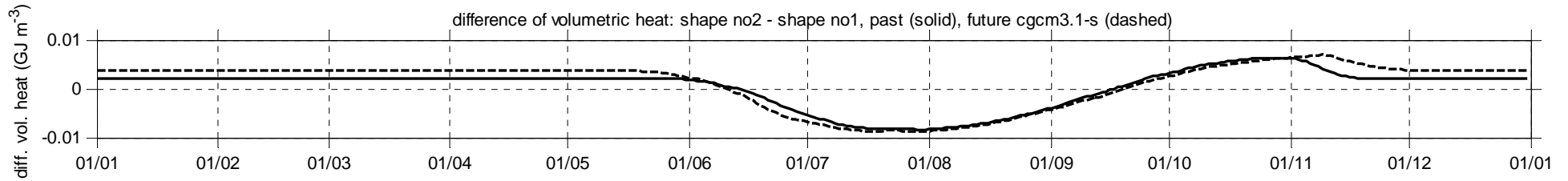
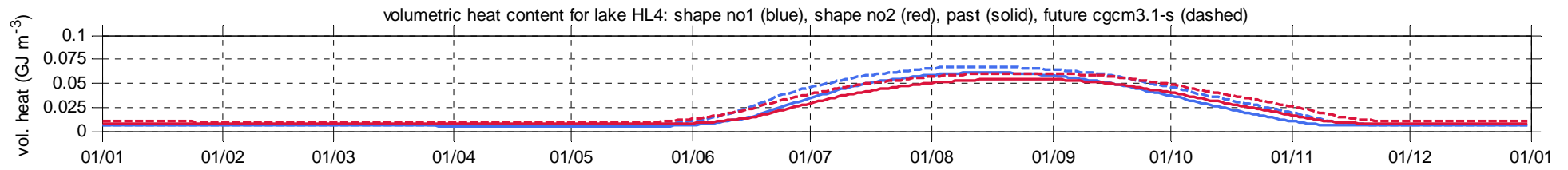
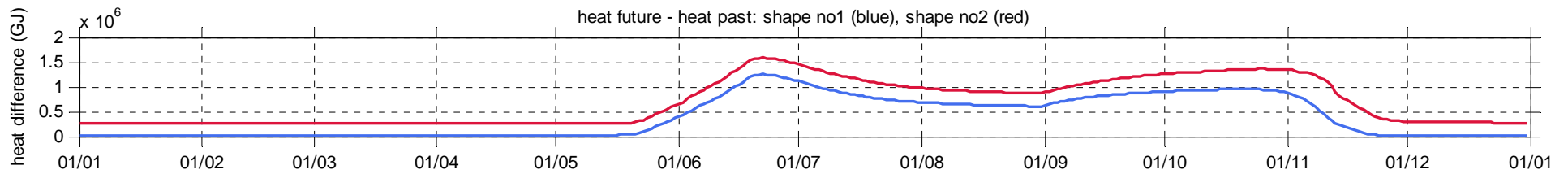
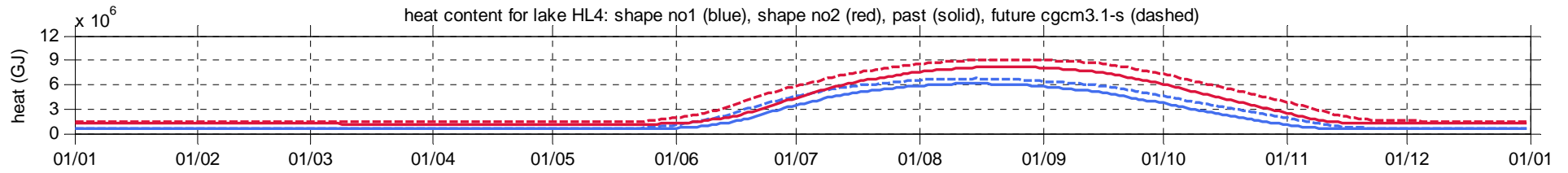
Past and future average temperature profiles for period 11 Oct to 20 Oct: 3 depths at lakes HL1, HL4 and HL7

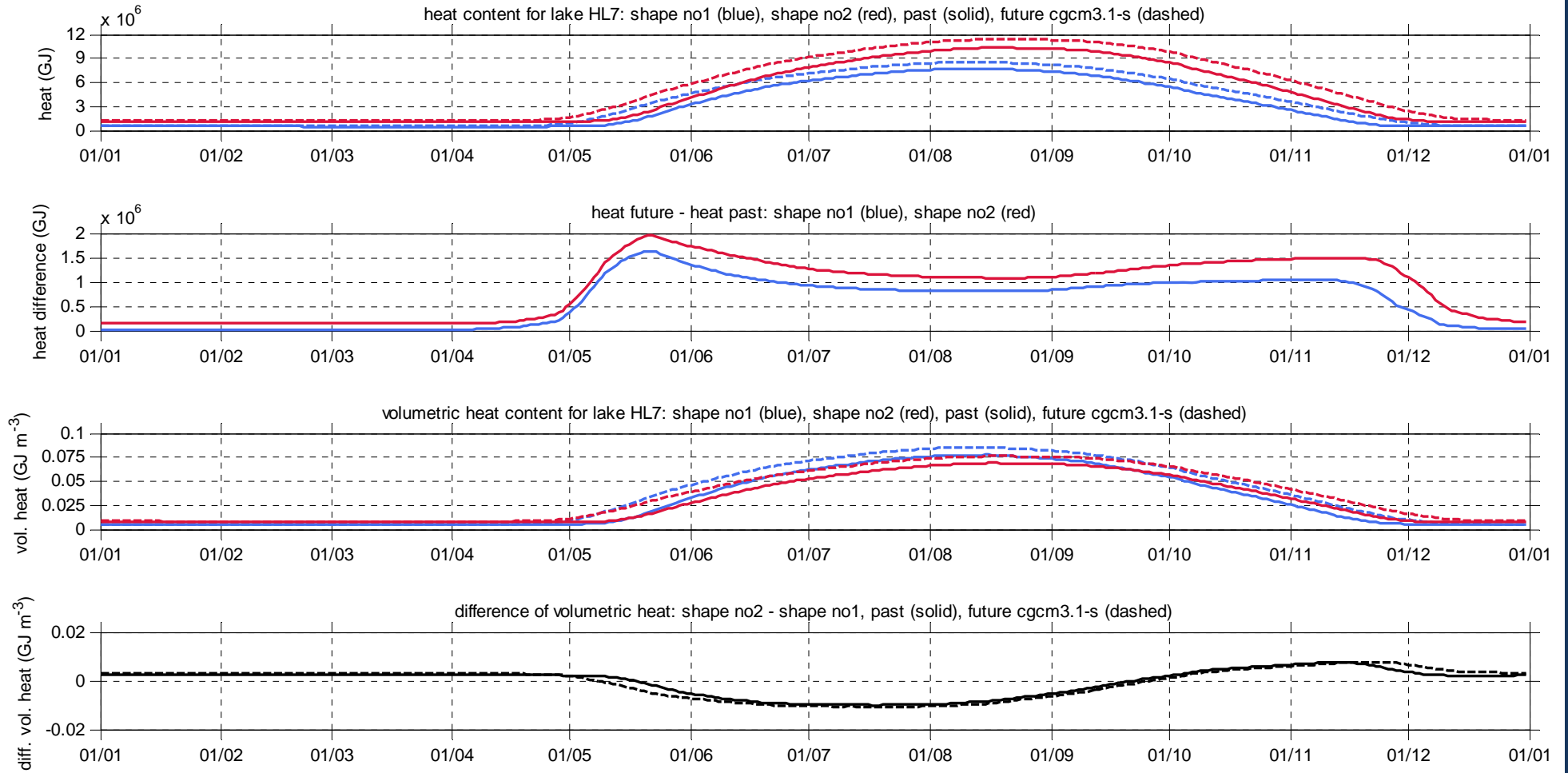


Annexe 11

Annexe 11 En haut : cycle annuel de contenu en chaleur passé (lignes continues) et futur (lignes pointillées) pour deux lacs hypothétiques de volume différent ($0,10 \text{ km}^3$, bleu; $0,15 \text{ km}^3$ rouge). Deuxième panneau : différence « futur-passé » de contenu en chaleur. Troisième panneau : contenu en chaleur volumique. Quatrième panneau : différence de contenu en chaleur volumique « lac $0,15 \text{ km}^3$ - lac $0,10 \text{ km}^3$ » passée (ligne continue) et future (ligne pointillée). Les contenus en chaleur futurs sont obtenus de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour trois latitudes : HL1, HL4 et HL7.



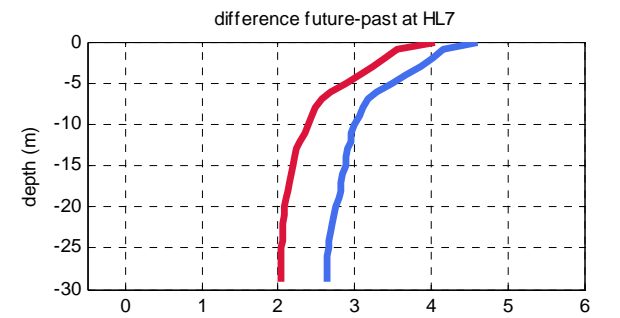
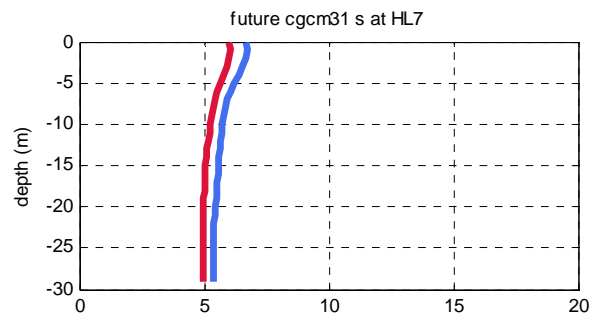
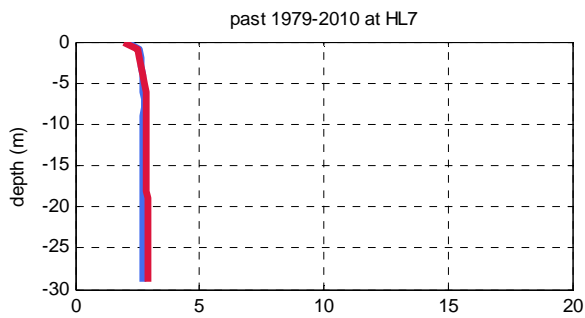
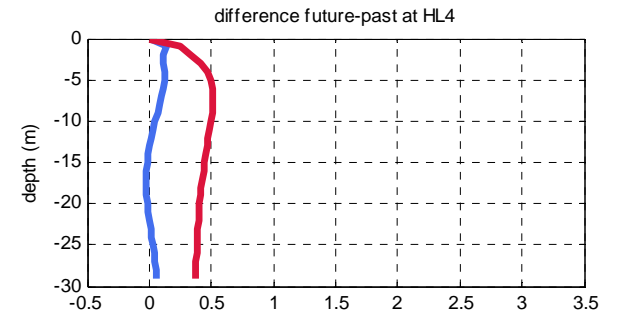
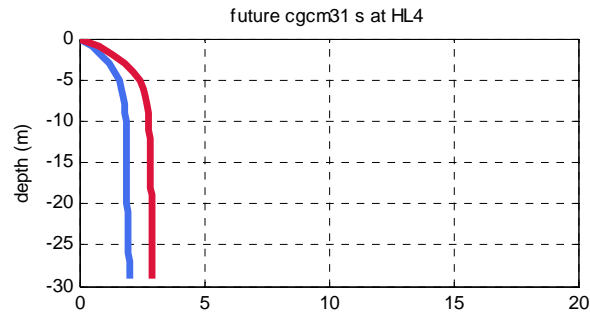
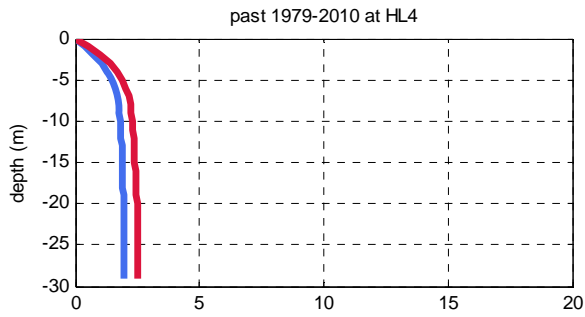
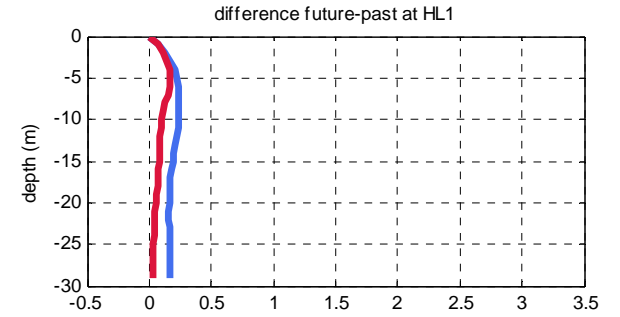
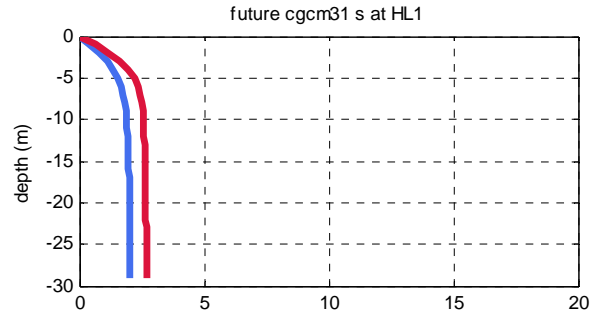
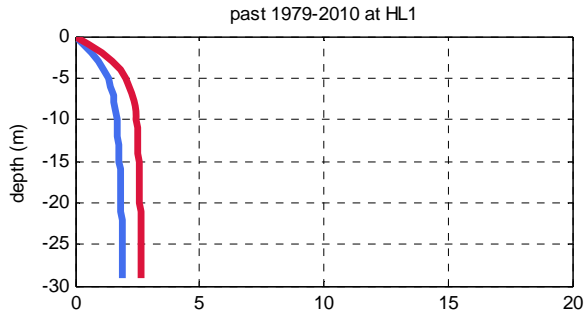




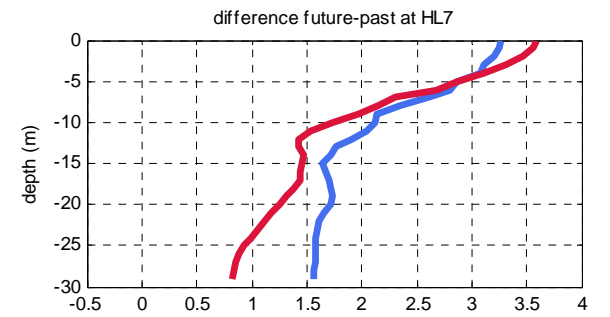
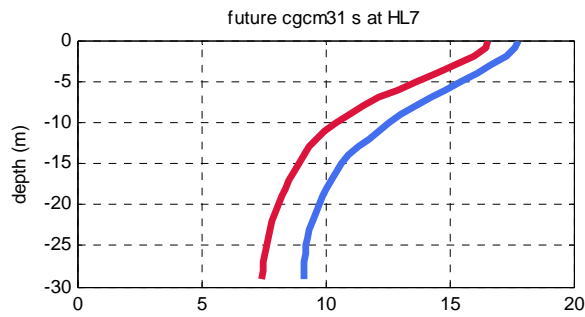
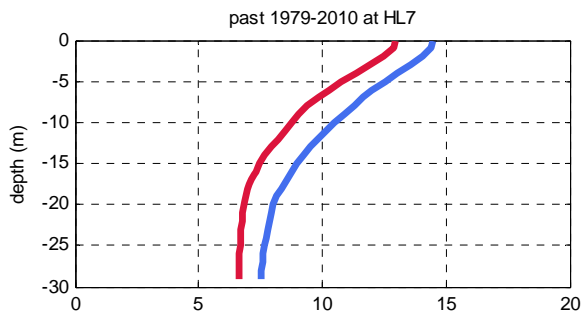
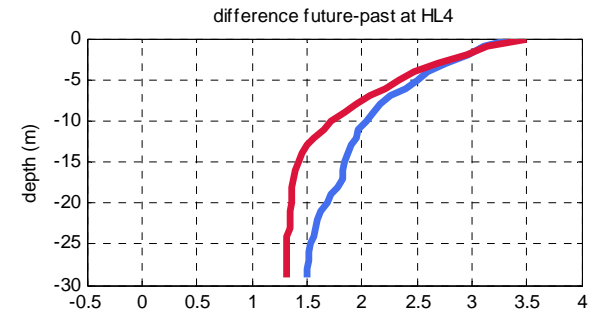
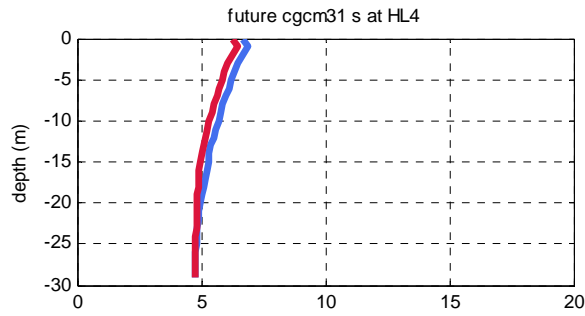
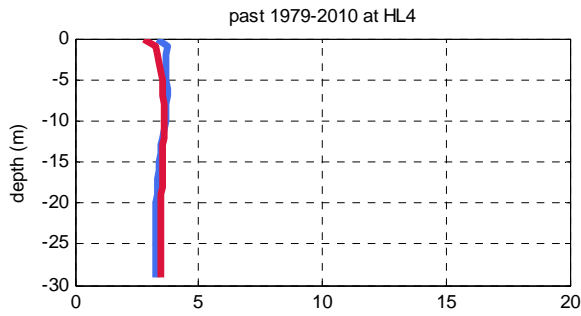
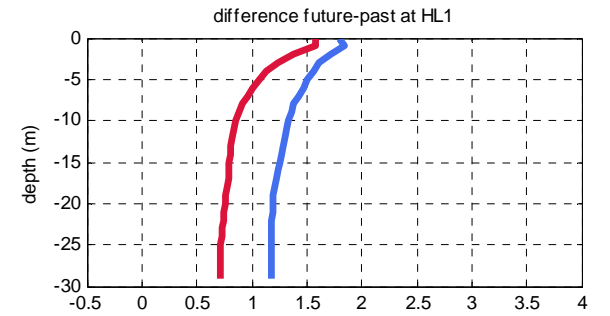
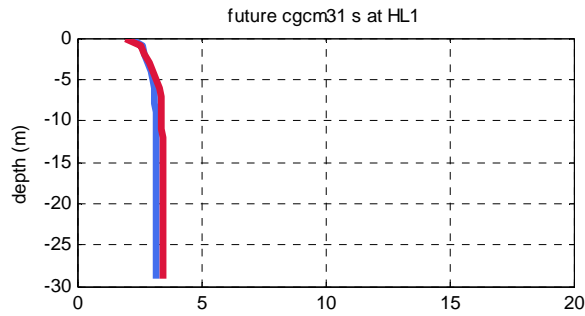
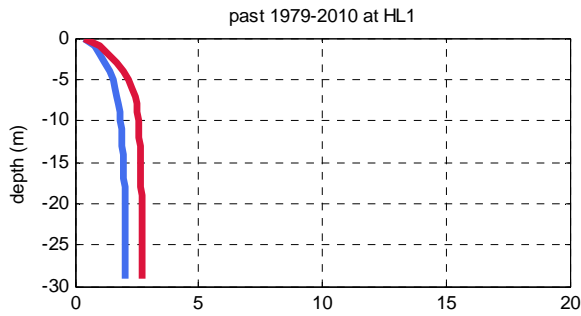
Annexe 12

Annexe 12 Profils de température passée et future pour deux lacs hypothétiques de volume différent ($0,10 \text{ km}^3$, bleu; $0,15 \text{ km}^3$ rouge) lorsque placés aux latitudes HL1, HL4 et HL7, et différences « futur-passé ». Les températures futures 2041-2070 sont obtenues de la moyenne des simulations pilotées par le modèle global CGCM3.1. Pour six décades entre mi-mai et mi-octobre.

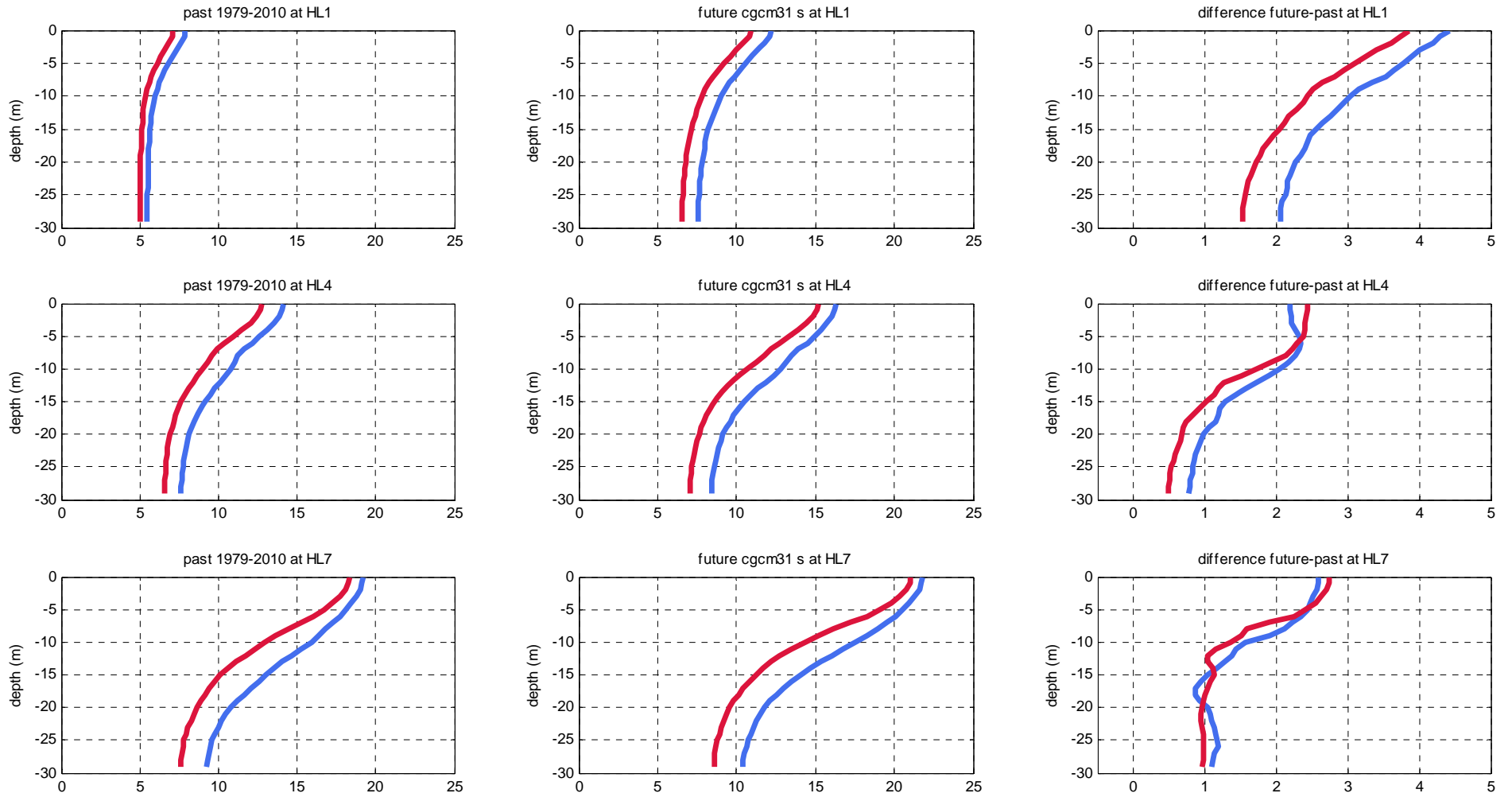
Past and future average temperature profiles for period 11 May to 20 May: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7



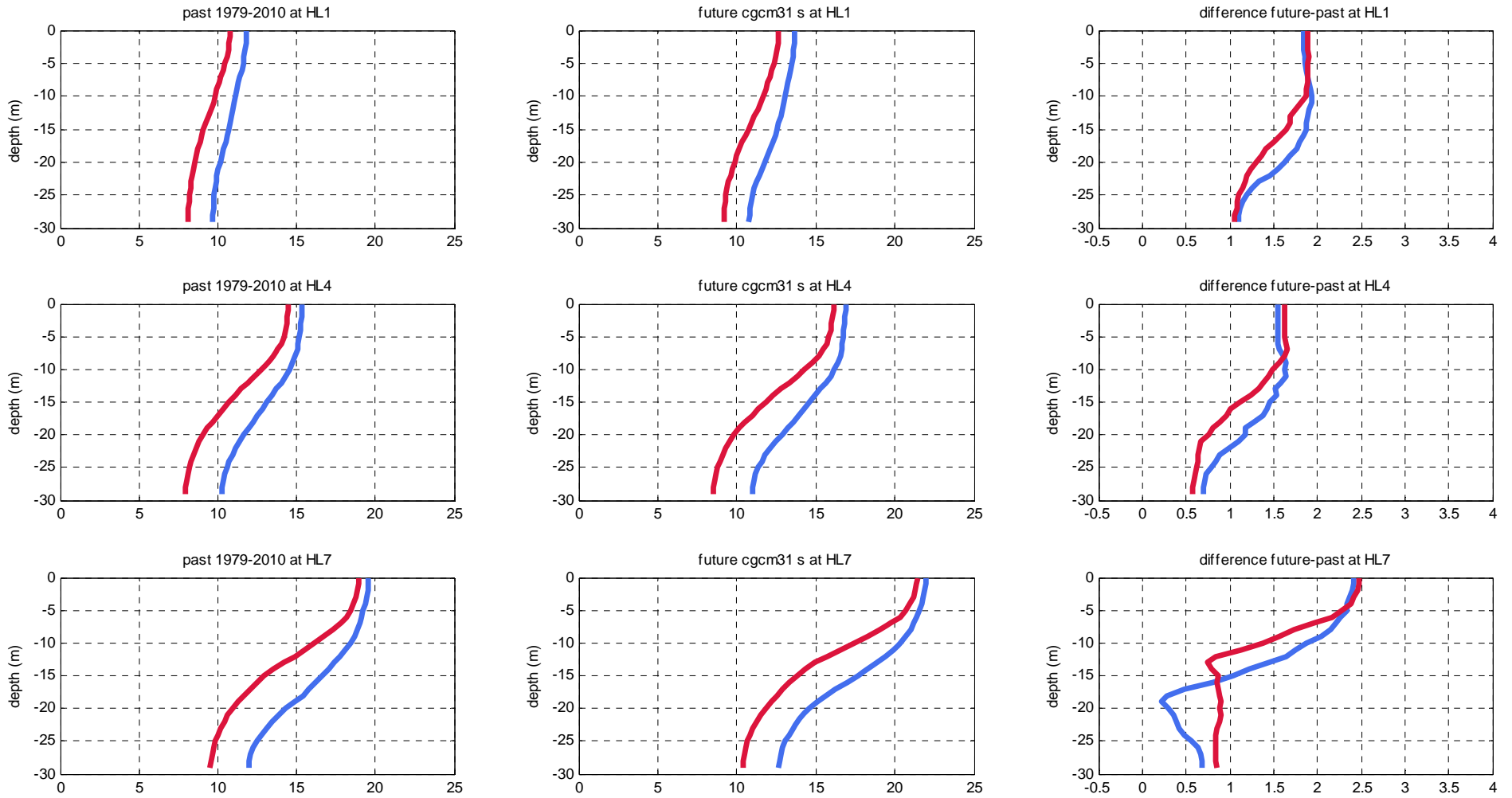
Past and future average temperature profiles for period 11 Jun to 20 Jun: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7



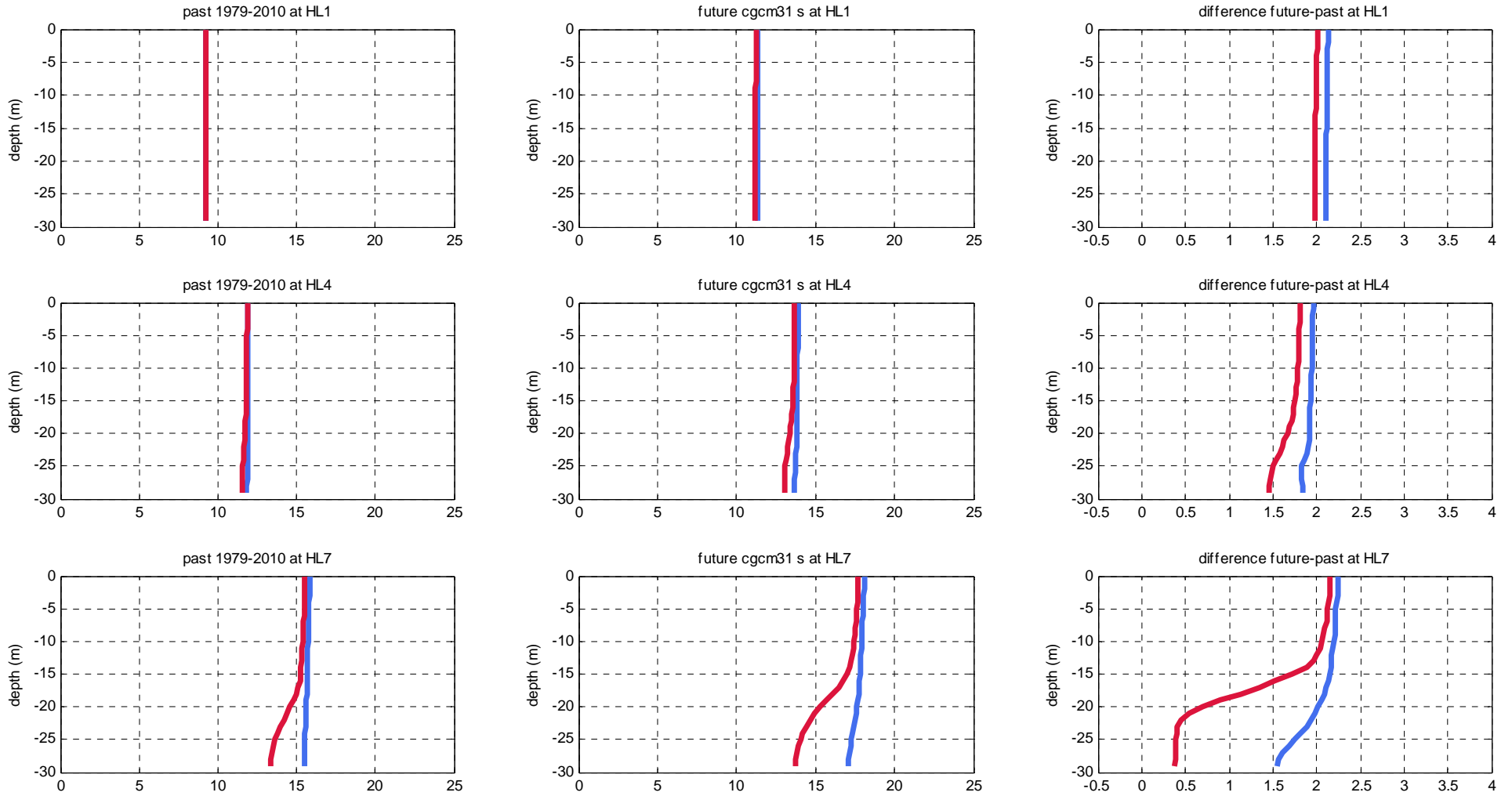
Past and future average temperature profiles for period 11 Jul to 20 Jul: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7



Past and future average temperature profiles for period 11 Aug to 20 Aug: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7



Past and future average temperature profiles for period 11 Sep to 20 Sep: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7



Past and future average temperature profiles for period 11 Oct to 20 Oct: 2 shapes (volumes) at lakes HL1, HL4 and HL7

