

Étude de la variation du régime thermique des lacs à l'échelle nationale et mondiale dans les zones littorales et pélagiques, sous l'effet du réchauffement climatique

Souyris T.^{1*} | Chavigny A.^{1*}

¹Master Écologie des milieux de montagne, USMB, Le Bourget-du-Lac, Savoie, 73370, France

Correspondance

Souyris Thomas & Chavigny Agathe, USMB, Le Bourget-du-Lac, Savoie, 73370, France
Email: souyrist@etu.univ-savoie.fr & chavignya@etu.univ-savoie.fr

Encadrants

Olivia Desgué, Jean-Philippe Jenny et Rosalie Bruel

Les lacs, en tant que sentinelles climatiques, offrent des informations précieuses sur les impacts du réchauffement climatique à différentes échelles spatio-temporelles. Cette étude explore les variations thermiques des lacs dans les zones littorales et pélagiques, en utilisant les couches de l'épilimnion et de l'hypolimnion comme indicateurs de ces zones respectivement. Nous explorons différentes approches de modélisation afin de mieux comprendre les dynamiques des zones. En comparant les données à l'échelle nationale (France) et mondiale, nous constatons que la température augmente à ces deux échelles, avec des vitesses variables selon les mois de l'année. Nos résultats montrent également que la vitesse de réchauffement est plus importante dans les zones pélagiques par rapport aux zones benthiques. Enfin, nous avons couplé ces vitesses de réchauffement avec des équations permettant de déterminer les quantités de carbone organique minéralisé (sous forme de CH₄ et CO₂ libérés), fournissant ainsi des estimations des flux de gaz à effet de serre issus des lacs. Des recherches futures devraient approfondir les interactions entre ces dynamiques thermiques et les écosystèmes aquatiques.

MOTS-CLÉS

Réchauffement climatique, Stratification, Température, Limnologie, Gaz à effet de serre.

* Auteurs ayant contribué de manière égale

Introduction

Les lacs, en tant qu'écosystèmes sensibles, reflètent rapidement les changements environnementaux et sont ainsi considérés comme des sentinelles du climat (Williamson et al., 2009)[1]. Ce rôle est particulièrement mis en lumière par le réchauffement significatif des eaux de surface des lacs à travers le monde, un phénomène qui se produit souvent à un rythme plus rapide que celui du réchauffement de l'air (Lenters et al., 2012)[2]. Une synthèse mondiale des données sur les lacs a révélé une augmentation moyenne de 0,34 °C par décennie des températures des eaux de surface entre 1985 et 2009 (O'Reilly et al., 2015)[3]. Des études régionales, comme celles menées par l'observatoire OLA sur les lacs périalpins, montrent que le réchauffement dans les couches de surface est supérieur à celui des couches profondes avec un taux de 0,46 °C par décennie sur les 30 dernières années, révélant ainsi un découplage thermique entre ces deux strates (Desgué-Itier et al., 2023)[4]. Ce taux de réchauffement des eaux de surface est confirmé sur d'autres lacs périalpins sur la période 1875-2015 (Ficker et al., 2017)[5]. La température de l'eau est un paramètre clé influençant le métabolisme, la composition et le fonctionnement des écosystèmes lacustres. Ces variations thermiques de l'eau jouent notamment un rôle important dans les cycles biogéochimiques des lacs. En effet, il existe une corrélation positive entre la température de l'eau et la minéralisation du carbone organique contenu dans les sédiments (Gudasz et al., 2010)[6]. Les températures des couches de surface des zones pélagiques sont reconnues comme des proxys fiables pour représenter celles des zones littorales (Crétollier et al., 2019)[7]. Par conséquent, le découplage thermique observé entre les eaux de surface et les eaux profondes dans les profils lacustres peut, par analogie, être interprété comme un réchauffement différentiel entre les zones littorales et benthiques. Ce phénomène ouvre des perspectives intéressantes pour étudier la dynamique du cycle du carbone dans ces écosystèmes. En effet, ce différentiel thermique pourrait accélérer la minéralisation et augmenter les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les zones lit-

torales, tandis que les zones benthiques, se réchauffant plus lentement, auraient un rôle accru dans la séquestration du carbone. Dans le contexte du réchauffement climatique, il est crucial d'élargir l'étude de ce découplage thermique au-delà des lacs périalpins pour en évaluer l'ampleur à une échelle nationale et mondiale. Une approche intégrant à la fois des observations et des modélisations sur ces échelles permettrait de mieux appréhender la dynamique du carbone dans les lacs en réponse au réchauffement global. L'objectif principal de cette étude est donc de tester l'hypothèse d'un découplage thermique généralisé entre les zones littorales et profondes, en s'appuyant sur une analogie avec le découplage entre l'épilimnion et l'hypolimnion. Pour ce faire, les données de 822 lacs répartis dans le monde entier seront analysées. Les résultats observés seront ensuite comparés aux simulations réalisées pour les plans d'eau nationaux suivis dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). Enfin, cette étude vise à estimer le taux moyen de minéralisation des zones littorales en fonction de leur taux de réchauffement.

Matériel et Méthodes

| Sites d'étude

À l'échelle mondiale, un total de 822 lacs, répartis comme illustré dans la figure 1, a été analysé. Ces lacs présentent une grande variabilité en termes de profondeur maximale, de superficie et d'altitude, reflétant ainsi une diversité importante dans leur fonctionnement thermique ainsi que dans leur état trophique.

À l'échelle nationale, les simulations ont été conduites sur 210 lacs situés en France, dont la localisation est présentée dans la figure 1. Ces lacs incluent des lacs naturels, artificiels, ainsi que des lacs réservoirs, ces derniers constituant la majorité des sites étudiés. Comme observé pour les lacs à l'échelle mondiale, les lacs français se distinguent également par une hétérogénéité marquée de leurs caractéristiques physiques telles que la profondeur, la superficie et l'altitude.

Une comparaison des caractéristiques des lacs

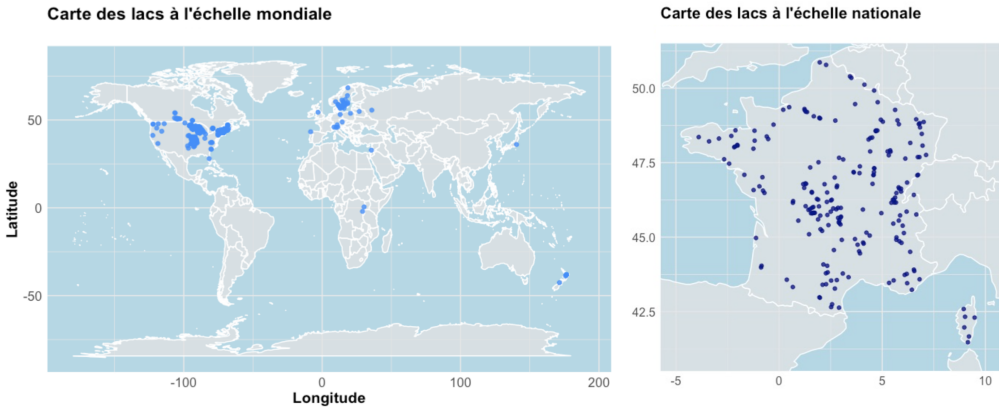


FIGURE 1 Distribution des lacs des deux jeux de données utilisés. A l'échelle mondiale (carte de gauche), le jeu de données réunit 822 lacs. A l'échelle nationale (carte de droite), le jeu de données réunit 210 lacs.

étudiés aux échelles nationale et mondiale révèle que les valeurs médianes de profondeur maximale, d'altitude et de superficie sont globalement similaires. Ces observations suggèrent une distribution comparable de ces paramètres entre les lacs étudiés à l'échelle mondiale et nationale (table 1).

| Bases de données

Pour l'analyse des températures des lacs à l'échelle mondiale, les données utilisées proviennent d'une synthèse de séries chronologiques de températures collectées dans 822 lacs, à différentes profondeurs (Lewis et al., 2023)[8]. Ce jeu de données couvre une période allant de 1921 à 2022, avec une durée médiane de collecte de 29 ans et une médiane de cinq dates distinctes d'échantillonnage par an pour chaque lac.

Concernant les lacs français, l'analyse repose sur l'exploitation du jeu de données LakeTSim, qui intègre des simulations journalières des températures de l'eau dans l'épilimnion et l'hypolimnion, accompagnées des incertitudes associées, pour un total de 210 lacs répartis sur le territoire national. Ces simulations, réalisées sur la période 1959-2020, s'appuient sur le modèle OK-PLM (Ottosson-Kettle-Prats Lake Model) (Sharaf et al., 2023)[9].

| Analyse et filtration des jeux de données

À l'échelle nationale, le jeu de données LakeTSim fournit une modélisation quotidienne des températures de l'eau dans l'épilimnion et l'hypolimnion des lacs français. Ce jeu de données présente plusieurs avantages méthodologiques, notamment un pas de temps journalier sur l'ensemble de l'année, ce qui garantit une résolution temporelle homogène ainsi qu'une définition claire et modélisée des strates thermiques, épilimnion et hypolimnion. Toutefois, il convient de souligner que, comme pour toute modélisation, certaines incertitudes doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats.

À l'échelle globale, le jeu de données d'observation initial, comprenant 822 lacs, présente des biais méthodologiques et des lacunes qu'il est nécessaire de corriger pour obtenir des données scientifiquement valides et comparables au jeu de données national. Ces ajustements visent à garantir une analyse robuste et une interprétation fiable des résultats. La première étape a consisté à filtrer les observations en limitant la période d'analyse aux années 1960-2019. Cette plage temporelle a été choisie en raison du faible nombre de relevés disponibles avant les années 1970 et après 2019, mais aussi pour assurer une comparabilité avec les données nationales.

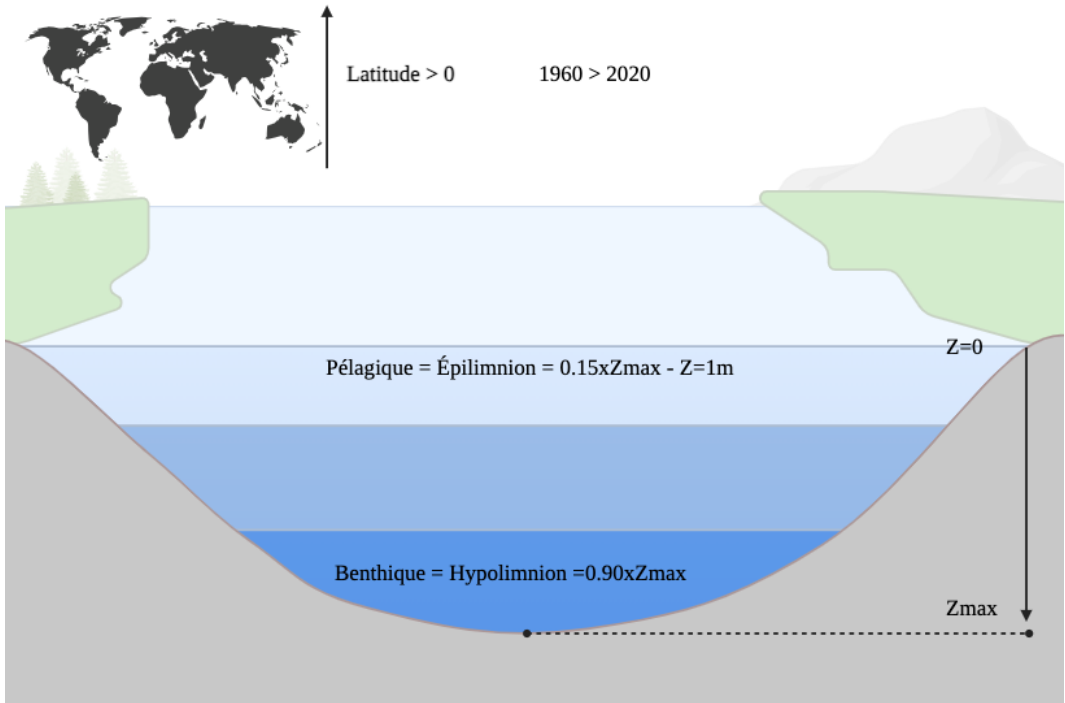


FIGURE 2 Schéma récapitulatif du filtre appliqué aux données globales, avec Z_{max} représentant la profondeur maximale du lac

Pour identifier les principales strates thermiques des lacs, nous avons filtré les données afin de conserver uniquement les observations représentatives de l'épilimnion et de l'hypolimnion (couche profonde, stable). Les lacs ont été retenus s'ils comprenaient au moins une observation à 1 m de profondeur, correspondant à l'épilimnion, et une observation proche de 95 % de la profondeur maximale, correspondant à l'hypolimnion. Ensuite, seules les couches à 1 m ou celles situées à une profondeur supérieure ou égale à 90 % de la profondeur maximale ont été sélectionnées. Les observations ont été catégorisées en "épi" pour l'épilimnion (1 m) et "hypo" pour l'hypolimnion (≥ 90 % de la profondeur maximale), tandis que les autres données ont été exclues. (Figure 2)

Une autre étape cruciale a été l'attribution des strates thermiques à partir des profondeurs. Pour chaque date de relevé, seule la température mesurée la plus

en surface et celle mesurée la plus en profondeur ont été conservées. La température la plus en surface a été utilisée comme proxy pour l'épilimnion, tandis que celle mesurée à la plus grande profondeur a été utilisée comme proxy pour l'hypolimnion. Seuls les relevés comprenant des mesures simultanées pour l'épilimnion et l'hypolimnion sur une même date ont été retenus pour l'analyse. Cette approche permet de simplifier les analyses dans un contexte de forte hétérogénéité de bathymétrie des lacs. Toutefois, définir une strate sur la base d'une seule mesure de température à une profondeur donnée est discutable, notamment en raison des fluctuations journalières marquées de la température en surface.

TABLE 1 Caractéristiques environnementales des lacs étudiés

Caractéristique	Données globale	Données nationale
Nombre total de lacs	822	210
Profondeur min/max (m)	1.5/480	0.8/309.7
Profondeur médiane (m)	12.4968	16
Surface min/max	0.5/237000 ha	0.08366085/577.1245 km ²
Surface médiane	85.4 ha	0.7869682 km ²
Altitude min/max (m)	-215/2804	1/1753
Altitude médiane (m)	264	268

Note: Les données incluent les caractéristiques des lacs naturels, des réservoirs et des lacs artificiels pour chaque groupe.

| **Méthode de calcul de la variation de la température**

Régression non paramétrique de Theil Sen

Nous avons utilisé la régression non paramétrique de Theil-Sen (package "trend" (Pohlert, 2020)[10]) pour estimer le taux de réchauffement des lacs en fonction des mois et des différentes strates des lacs. Cette approche a été choisie pour sa robustesse aux valeurs aberrantes et sa capacité à modéliser des relations linéaires avec des hypothèses minimales sur la distribution des données. La régression est appliquée indépendamment pour chaque lac, strate et mois. Les résultats sont ensuite filtrés par une p-value < 0,05.

Régression linéaire

Nous avons appliqué le modèle de régression linéaire suivant pour chaque lac étudié, à l'échelle nationale et globale :

Ce modèle linéaire permet d'examiner la température de l'eau en fonction de la strate (hypolimnion ou épilimnion) et du temps, exprimé en mois et années, ainsi que de leur interaction. Les coefficients issus de ce modèle représentent les pentes, qui indiquent le taux de réchauffement dans chaque strate pour un lac donné. La pente de l'épilimnion est directement donnée par le coefficient associé au temps, tandis que la pente de l'hypolimnion est calculée en tenant compte de l'effet d'interaction, correspondant à la différence entre les deux strates. Nous avons également calculé la

différence relative entre les pentes des deux strates, exprimant ainsi l'ampleur de la différence entre le réchauffement de l'épilimnion et celui de l'hypolimnion. Seuls les lacs présentant un taux de réchauffement significatif dans les deux strates, ainsi qu'une différence relative entre les pentes des deux strates, ont été retenus pour l'analyse statistique.

Afin d'analyser les différences entre les strates (hypolimnion et épilimnion) en fonction des mois, nous avons également comparé les variations entre ces strates selon les mois et l'origine des données (nationale ou globale). Les comparaisons post hoc ont été réalisées à l'aide des estimations des moyennes marginales. Les comparaisons par paires ont été effectuées à l'aide de la méthode de Tukey. Toutes les analyses ont été réalisées avec le package "emmeans" (Lenth, 2021) [11] sous R (R Core Team, 2024) [12].

| **Calcul de la tonnes de carbone minéralisé**

∀ Lac, Strate, Mois

Nous calculons la température prédite pour chaque année via les coefficients du modèle linéaire pour chaque jeu de données:

$$T_{n+1} = T_n + T_n \times \text{VariationTempérature},$$

avec T_{2010} comme température initiale.

Pour prédire la quantité de carbone organique (CO) minéralisée dans les lacs à l'échelle globale et nationale, nous avons utilisé les équations proposées par (Gudas et al., 2010)[6]. Ces équations décrivent la minéralisation du CO en fonction de la température, exprimée par le nombre de jours et la surface des sédiments lacustres.

Deux modèles distincts ont été établis pour représenter des lacs ayant des sources contrastées de matière organique :

Svarttjärn est dominé par de la matière organique terrestre, issue principalement des apports externes. L'équation de minéralisation du CO dans ce lac est donnée par :

$$Y_{\text{Svarttjärn}} = \left(10^{(0.0336 \times T_n + 1.359)} \times 0.365 \right),$$

$$Y_{\text{Svarttjärn}} = T \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

Vallentunasjön est dominé par des débris algaux produits localement. L'équation associée est donnée par :

$$Y_{\text{Vallentunasjön}} = \left(10^{(0.0341 \times T_n + 1.848)} \times 0.365 \right).$$

$$Y_{\text{Vallentunasjön}} = T \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$$

Étant donné l'absence d'informations précises sur le niveau trophique des lacs étudiés, nous avons choisi d'utiliser la moyenne des deux modèles ($Y_{\text{Svarttjärn}}$ et $Y_{\text{Vallentunasjön}}$) pour estimer la minéralisation moyenne du carbone organique (CO). La minéralisation annuelle de CO est ensuite multipliée par la surface afin d'obtenir la quantité totale de CO minéralisé chaque année. Enfin, la somme cumulative de ces contributions, calculée pour chaque lac, chaque strate et chaque mois, permet d'estimer le carbone total minéralisé entre 2010 et 2100.

$$\text{CO}_{\text{total}} = \sum_{n=2010}^{2100} \left(\frac{Y_{\text{Svarttjärn}} + Y_{\text{Vallentunasjön}}}{2} \right) \times \text{Surface}$$

Résultats

Régression non paramétrique de Theil-Sen

Tout d'abord, on observe que pour le jeu de données national, la moyenne et la médiane de chaque mois, pour les deux strates de la variation de température, sont quasiment égales, ce qui n'est pas le cas pour les données globales. Cela indique que la répartition des données de variation de température à l'échelle nationale suit une distribution relativement symétrique autour d'une valeur centrale, contrairement aux données globales, qui semblent contenir des valeurs aberrantes (outliers). De plus, les données mesurées globales semblent présenter une variabilité plus élevée que les données modélisées nationales.

Aux échelles globale et nationale, la régression non paramétrique de Theil-Sen révèle une différence statistiquement significative (P-value du test de Kruskal-Wallis < 0,05) dans la variation annuelle des températures entre l'hypolimnion et l'épilimnion pour certains mois. À l'échelle globale, un découplage statistiquement significatif de la variation de température entre les deux strates est observé pour les mois de juin, juillet, août, septembre et octobre. En revanche, à l'échelle nationale, ce découplage est statistiquement significatif pour tous les mois, à l'exception de février et octobre. D'après les valeurs médianes observées pour ces mois à l'échelle globale, le réchauffement de l'épilimnion est compris entre 0.16 et 0.37 °C par décennie, tandis que l'hypolimnion se refroidit de 0.08 à 0.24 °C par décennie. Ainsi, le facteur de variation de température entre l'épilimnion et l'hypolimnion est compris entre 1.5 et 2.

À l'échelle nationale, pour les mois statistiquement significatifs, l'épilimnion se réchauffe en moyenne de 0.26 à 0.42 °C par décennie, contre 0.13 à 0.28 °C par décennie pour l'hypolimnion. L'épilimnion se réchauffe donc, en moyenne, 1.5 à 2 fois plus vite que

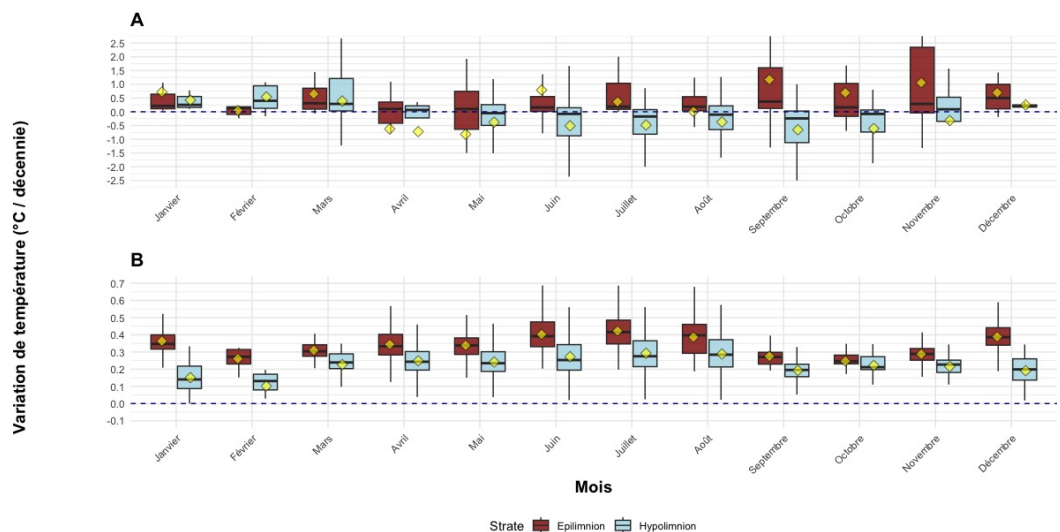


FIGURE 3 Variation mensuelle de la température (°C/décennie) dans l'épilimnion et l'hypolimnion avec indication des moyennes (points jaunes) pour les données globales (A) et nationales (B), La ligne bleue représente la variation de température de 0°C.

l'hypolimnion.

Ces facteurs de variation de température entre l'épilimnion et l'hypolimnion sont similaires aux deux échelles, bien que les tendances soient opposées à l'échelle globale, où l'épilimnion se réchauffe tandis que l'hypolimnion se refroidit.

Néanmoins, les variations de température de l'épilimnion et de l'hypolimnion sont statistiquement différentes entre les deux échelles pour les mois de février, avril, mai, juin, juillet, août, et juillet (pour l'épilimnion), ainsi que d'avril à octobre (pour l'hypolimnion) (P-value du test de Kruskal-Wallis < 0.05 ; Annexe 1).

En effet, durant ces mois, l'épilimnion se réchauffe (médiane) de 0.1 à 0.37 °C par décennie à l'échelle globale, contre un réchauffement de 0.33 à 0.42 °C par décennie à l'échelle nationale. L'épilimnion a donc tendance à se réchauffer plus rapidement à l'échelle nationale qu'à l'échelle globale.

Pour l'hypolimnion, sur ces mêmes mois statistiquement significatifs, les tendances sont opposées entre les deux échelles. À l'échelle globale, l'hypolimnion se refroidit (médiane) de 0.05 à 0.24 °C par décennie, tan-

dis qu'à l'échelle nationale, il se réchauffe de 0.24 à 0.28 °C par décennie. Ainsi, l'hypolimnion se réchauffe à l'échelle nationale et tend à se refroidir à l'échelle globale. De plus, à l'échelle nationale, l'hypolimnion se réchauffe plus vite qu'il ne se refroidit à l'échelle globale. Ce refroidissement de l'hypolimnion à l'échelle globale est particulièrement observé pour les mois de mai, juin, juillet, août, septembre et octobre.

Toutefois, ces valeurs moyennes négatives (refroidissement global) sont probablement fortement influencées par certains lacs qui présentent un refroidissement important de l'hypolimnion, en raison de leur fonctionnement spécifique.

Régression linéaire

Nous constatons que les mois d'hiver (décembre, janvier, février, mars) montrent des variations de température non significatives statistiquement à l'échelle globale (p-value > 0.05). Cependant, le modèle linéaire appliqué aux lacs nationaux révèle des variations de température statistiquement solides pour certaines périodes de l'année, avec des p-values inférieures à 0.05, indiquant

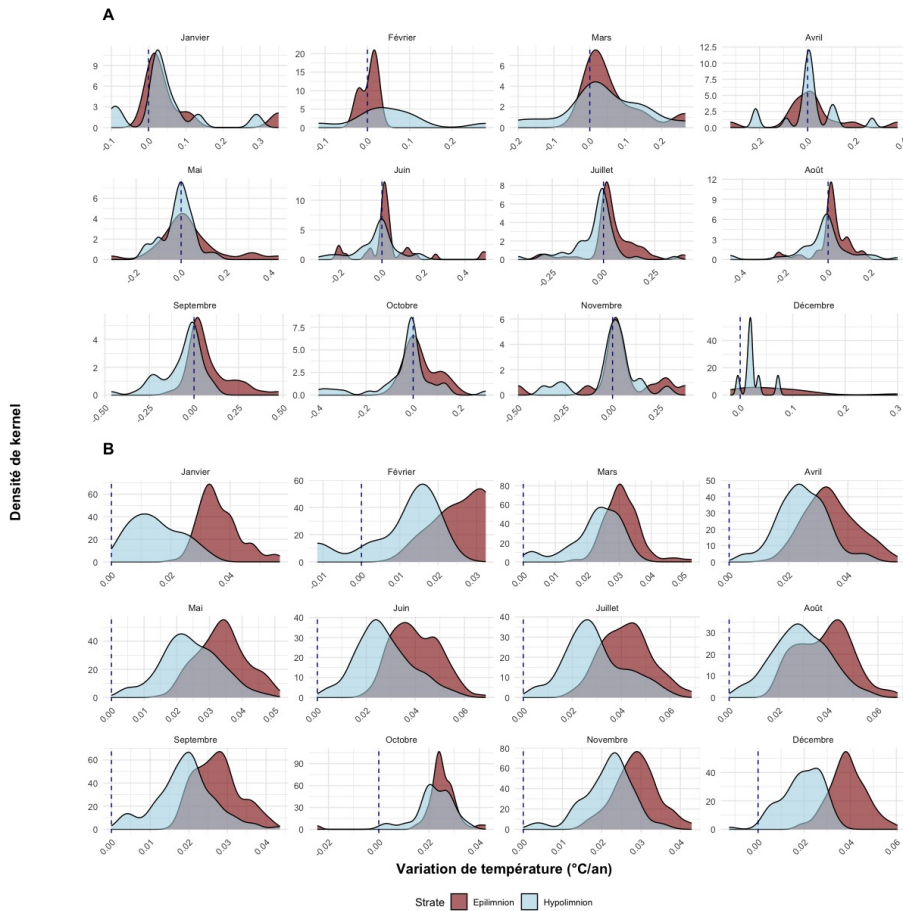


FIGURE 4 Distribution (densité de kernel) mensuelle de la variation de température (°C/an) dans l'épilimnion et l'hypolimnion selon les données globales (A) et nationales (B), La ligne bleue représente la variation de température de 0°C .

des différences significatives.

À l'échelle globale, les résultats pour les mois de décembre, janvier, février et mars ne sont pas analysés en raison de leur non-significativité statistique dans le modèle linéaire. En revanche, les mois d'avril, mai, juin, juillet, septembre et octobre montrent une différence significative de réchauffement entre l'épilimnion et l'hypolimnion (test t, p-value < 0.05). Cependant, aucune différence significative de vitesse de réchauffement n'est observée pour les mois d'août et de novembre (test t, p-value > 0.05 ; Annexe 9).

La différence d'augmentation des températures entre

l'épilimnion et l'hypolimnion semble s'amplifier à partir du mois d'avril (+0.55 °C par décennie), avant d'atteindre +0.63 °C par décennie en mai, puis un pic en juin à +0.85 °C par décennie. Cette tendance décroît ensuite en septembre (+0.22 °C par décennie) et en octobre (+0.18 °C par décennie).

Nous observons que l'épilimnion se réchauffe généralement plus rapidement que l'hypolimnion, à l'exception du mois d'octobre, où aucune différence significative dans la vitesse de réchauffement entre les deux couches n'est détectée (test t, p-value > 0.05). La différence de vitesse de réchauffement entre

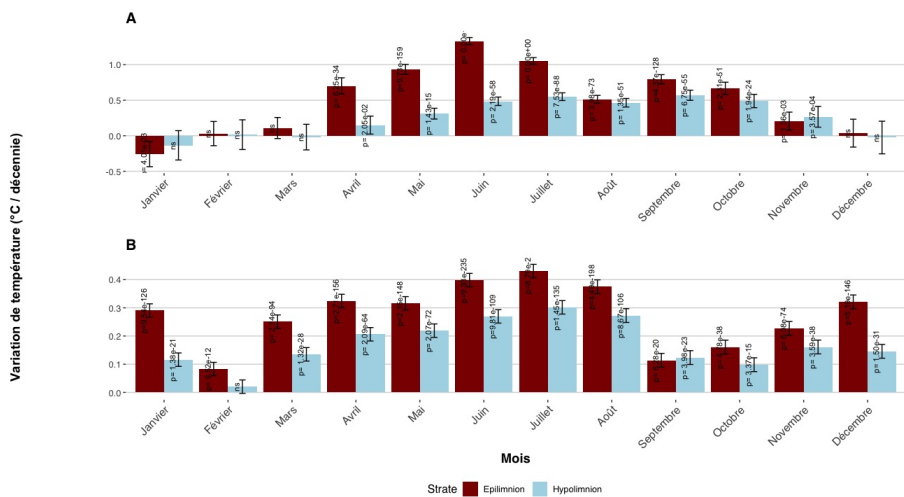


FIGURE 5 Variation mensuelle de la température (°C par décennie) dans l'épilimnion et l'hypolimnion pour les données globales (A) et nationales (B)

l'épilimnion et l'hypolimnion tend à augmenter à partir du mois de mars, avec des valeurs respectives de +0.12 °C par décennie en mars et avril, et de +0.10 °C par décennie en mai. Cette différence atteint un pic en juin et juillet, avec une augmentation de +0.13 °C par décennie, avant de diminuer progressivement à partir d'août (+0.10 °C par décennie).

Les écarts de réchauffement les plus importants entre l'épilimnion et l'hypolimnion sont observés pendant l'hiver, notamment en décembre (+0.18 °C par décennie) et en janvier (+0.17 °C par décennie).

En comparant les deux jeux de données, nous distinguons clairement que les lacs globaux tendent à se réchauffer plus vite qu'à l'échelle nationale. Les résultats du t-test révèlent des différences statistiquement significatives ($p < 0.05$) dans les variations de température entre les strates de l'épilimnion et de l'hypolimnion pour certains mois de l'année. À l'échelle globale, les mois de janvier et décembre montrent une diminution importante des températures dans l'épilimnion, avec des valeurs de -0.55 °C par décennie et -0.28 °C par décennie respectivement. En revanche, les mois de printemps et d'été (avril, mai, juin, juillet, septembre et octobre) affichent des augmentations de température, particulièrement en juin (+0.93 °C par décennie), où le réchauffe-

ment est le plus marqué.

Les mois de février et novembre dans l'épilimnion, avec des p-values respectives de 0.443 et 0.688, ne présentent pas de différences statistiquement significatives. Concernant l'hypolimnion, les variations de température sont également significatives pour les mois de janvier, mars, mai, juin, juillet, septembre et octobre, avec des augmentations notables en juin (+0.22 °C par décennie) et en juillet (+0.25 °C par décennie). Cependant, les mois de février, avril, novembre et décembre dans l'hypolimnion ne montrent pas de différences statistiquement significatives ($p > 0.05$).

Ces résultats mettent en évidence des réchauffements plus prononcés dans l'épilimnion que dans l'hypolimnion, particulièrement pendant les mois chauds, tandis que les mois d'hiver présentent des tendances moins claires ou non significatives.

Minéralisation du Carbone

Il apparaît que, dans les données globales, la quantité de carbone organique (CO) minéralisée en 2100 dans la zone benthique(hypolimnion) ne présente pas de différence flagrante entre les différents mois, en raison de la grande variabilité des tailles des lacs. Cependant,

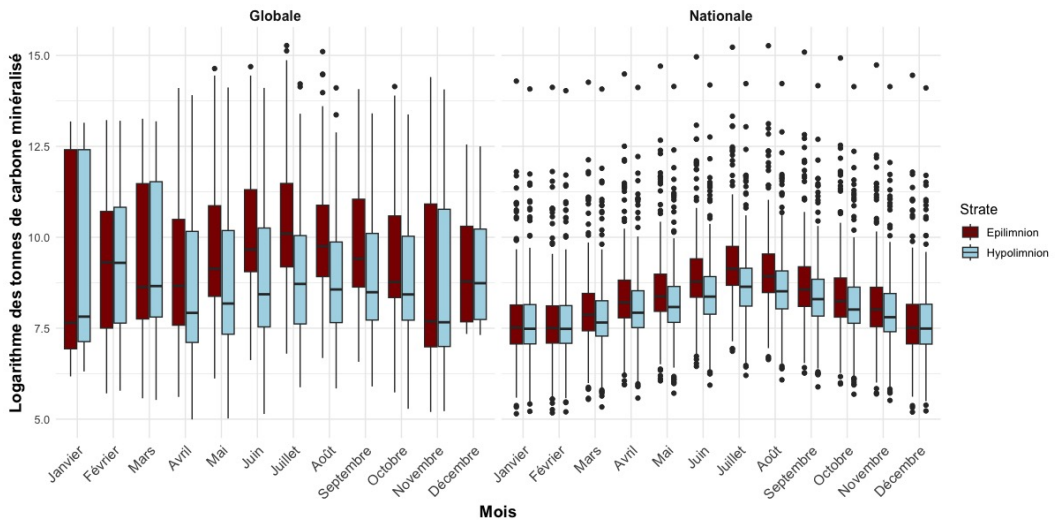


FIGURE 6 Variation mensuelle du logarithme des tonnes de carbone minéralisé accumulées entre 2010 et 2100 dans l'épilimnion et l'hypolimnion, selon les données globales et nationales

en comparaison avec la zone pélagique (épilimnion), la quantité de carbone minéralisée y est légèrement moins importante. Enfin, en comparaison avec les données nationales, il ne semble pas y avoir de grande différence. Sur les différentes périodes intra-annuelles, entre les mois à l'échelle globale, on retrouve les mêmes tendances observées dans la comparaison de la vitesse de réchauffement, avec de larges intervalles de tonnes de carbone minéralisé dus à la grande variabilité de taille entre les lacs. Nous observons un léger découplage entre les zones benthique et pélagique, plus marqué que dans les données globales (Figure 6).

Discussion

Lors de l'analyse des données avec la régression de Theil-Sen, nous avons volontairement appliqué peu de filtres afin de conserver un nombre suffisant de lacs dans notre étude. Nous avons donc utilisé un filtre statistique, en supprimant les données présentant des p-values supérieures à 0,05. Nous avons également exploré l'utilisation d'un modèle linéaire mixte en intégrant le nom des lacs comme effet aléatoire. Cependant, cette approche s'est révélée problématique en raison d'une

forte variabilité associée à cet effet aléatoire, rendant les résultats difficilement exploitables. Cela souligne les limites de l'utilisation de modèles complexes lorsque l'effet aléatoire domine les résultats, et nous a conduits à abandonner cette méthode. L'utilisation de la fonction "dredge" du package MuMIn a permis de comparer différents modèles en intégrant des paramètres supplémentaires, comme la profondeur maximale, la profondeur moyenne, la surface du lac et l'altitude. Ces ajouts ont permis une augmentation du $R^2 = 0.87$ mais le modèle utilisé dans nos résultats n'intègre pas ces paramètres afin d'éviter un problème de sur-ajustement. Un modèle trop complexe aurait rendu les résultats moins compréhensibles et difficiles à interpréter. Enfin, nous avons testé une régression linéaire où la température a été transformée par une fonction exponentielle afin de tester une augmentation non linéaire. Cependant, nous n'avons pas gardé ce modèle en raison d'un R^2 extrêmement faible (0.012).

Il a été observé pour les lacs mondiaux que, sur les mois de mai à octobre, l'hypolimnion se refroidit d'environ 0,05 à 0,24 °C/décennie (Annexe 2). Ce sont 129 lacs qui sont concernés par un refroidissement d'une de leurs strates sur au moins un mois. Cer-

tains lacs présentent également un refroidissement de l'épilimnion sur certains mois, mais le refroidissement de l'hypolimnion est plus fréquemment observé. Si l'on regarde plus en détail, parmi ces 129 lacs, 116 se situent aux États-Unis et 8 au Canada (soit environ 9 % des lacs échantillonnés au Canada présentent un refroidissement et 5 % de ceux échantillonnés aux États-Unis).

Il a été observé un découplage statistiquement significatif entre les strates épilimnion et hypolimnion, que ce soit à l'échelle globale (de juin à octobre) et nationale (toute l'année, sauf en février et octobre). Ce découplage s'observe sur les mois plutôt chauds. On peut expliquer cela par le fait que l'épilimnion se réchauffe plus rapidement durant ces mois chauds, car il est en contact avec l'air atmosphérique. Aussi, si ces lacs subissent un brassage des eaux, le découplage de réchauffement est absent durant la période de brassage, puisque les eaux de l'hypolimnion et de l'épilimnion se mélangent.

La variabilité des données des lacs mondiaux est nettement plus importante que celle des lacs nationaux. Tout d'abord, le jeu de données est issu de simulations et limite ainsi la variabilité entre les lacs. De plus, les lacs à l'échelle nationale, bien qu'ayant des fonctionnements différents et des climats variables, sont plus proches du point de vue de leur fonctionnement et du climat qui les définit que des lacs ne se situant pas sur le même continent.

Dans l'estimation de la teneur en carbone minéralisé, les résultats doivent être interprétés avec une attention particulière, étant donné que nous avons utilisé une moyenne entre deux types de lacs ayant des degrés trophiques différents. De plus, nos données sur les lacs comportent de nombreuses lacunes, étant donné que la surface des lacs renseignée correspond souvent à la surface et non au fond.

Conclusion

En conclusion, cette étude met en évidence un découplage statistiquement significatif entre les strates épilimnion et hypolimnion, observé aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle nationale. Nous déterminons des tendances de réchauffement dans les deux échelles,

marqueur du changement climatique. Ce découplage est particulièrement marqué durant les mois les plus chauds à l'échelle globale et persiste presque toute l'année à l'échelle nationale. Les analyses révèlent que, bien que les facteurs responsables de ce découplage soient similaires aux deux échelles, l'ordre de grandeur diffère : l'épilimnion se réchauffe plus rapidement à l'échelle nationale, tandis que l'hypolimnion montre des tendances de réchauffement plus nettes à l'échelle nationale qu'il ne présente de refroidissement à l'échelle globale.

Ces différences peuvent être attribuées aux particularités climatiques des zones géographiques étudiées. À l'échelle globale, une grande proportion des lacs se situe en Amérique du Nord, où le climat plus froid pourrait expliquer une variation de température médiane inférieure par rapport à l'échelle nationale. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les spécificités climatiques et géographiques dans l'analyse des variations thermiques des lacs, ainsi que la nécessité d'une approche locale et globale pour mieux comprendre les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques.

Remerciements

Nous souhaitons remercier chaleureusement Olivia Desgué, Jean-Philippe Jenny et Rosalie Bruel pour nous avoir aidés et guidés pendant ce mini-projet. Nous souhaitons également remercier le CARTEL ainsi que Stéphane Jacquet pour l'organisation de la semaine à Thonon. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers les chercheurs et professeurs ayant participé au module. Enfin, nous remercions l'équipe technique pour nous avoir accueillis dans les meilleures conditions.

Conflit d'intérêt

Les co-auteurs ont examiné et approuvé la version finale de l'article. Les auteurs reconnaissent l'utilisation de ChatGPT d'OpenAI pour la correction de l'orthographe et l'aide à la rédaction de scripts. L'outil d'IA a été utilisé

pour aider à coder certains scripts, mais tout le contenu intellectuel, les conclusions et les interprétations restent sous la seule responsabilité des auteurs.

Informations supplémentaires

Les données et les scripts R utilisés pour les analyses dans cette étude sont disponibles aux adresses suivantes :

[Lien Code](#)

[Lien données nationales](#)

[Lien données globales](#)

References

- [1] Williamson CE, Saros JE, Vincent WF, Smol JP. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography* 2009;54(6part2):2273–2282.
- [2] Lenters JD, Hook SJ, McIntyre PB. Workshop examines warming of lakes worldwide. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 2012 Oct;93(43):427–427.
- [3] O'Reilly CM, Sharma S, Gray DK, Hampton SE, Read JS, Rowley RJ, et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 2015 Dec;42(24).
- [4] Desgué-Itier O, Melo Vieira Soares L, Anneville O, Bouffard D, Chanudet V, Danis PA, et al. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 2023 Feb;27(3):837–859.
- [5] Ficker H, Luger M, Gassner H. From dimictic to monomictic: Empirical evidence of thermal regime transitions in three deep alpine lakes in Austria induced by climate change. *Freshwater Biology* 2017;62(8):1335–1345.
- [6] Gudas C, Bastviken D, Steger K, Premke K, Sobek S, Tranvik LJ. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature* 2010 Jul;466(7305):478–481.
- [7] Crétollier F, Guillard J, Klein A, Lemmin U, Tofield-Pasche N, Tran-Khac V, et al. Mise en place d'un protocole de suivi des températures du littoral du Léman / Lake Geneva nearshore water temperatures monitoring setup 2019;.
- [8] Lewis AS, Lau MP, Jane SF, Beeri-Shlevin Y, Burnet SH, Clayer F, et al. Dissolved oxygen, temperature, chlorophyll-a, total phosphorus, total nitrogen, and dissolved organic carbon at multiple depths in 822 lakes from 1921-2022 2023 Jan;.
- [9] Sharaf N, Prats J, Reynaud N, Tormos T, Bruel R, Peroux T, et al. A long-term dataset of simulated epilimnion and hypolimnion temperatures in 401 French lakes (1959–2020). *Earth System Science Data* 2023 Dec;15(12):5631–5650.
- [10] Pohlert T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection; 2023.
- [11] Lenth RV. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means; 2024.
- [12] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria; 2024.

ANNEXE 1 Résultats du calcul des taux de variation (°C/an) à l'aide de l'estimateur de Theil-Sen, en fonction des mois et des strates, pour les jeux de données globaux et nationaux, comparaison Global national avec les résultats du test de Kruskal-Wallis.

Mois	Strate	MoyenneGlobale	MoyenneNationale	MédianeGlobale	MédianeNationale	Kruskal-Wallis _{pvalue}
Janvier	Epilimnion	0.072	0.036	0.021	0.035	0.219
Février	Epilimnion	0.004	0.026	0.013	0.027	0.010
Mars	Epilimnion	0.065	0.031	0.031	0.030	0.936
Avril	Epilimnion	-0.063	0.035	0.010	0.033	0.002
Mai	Epilimnion	-0.082	0.034	0.010	0.034	0.001
Juin	Epilimnion	0.079	0.040	0.016	0.039	0.000
Juillet	Epilimnion	0.036	0.042	0.018	0.042	0.022
Août	Epilimnion	0.001	0.039	0.018	0.040	0.000
Septembre	Epilimnion	0.117	0.028	0.037	0.027	0.268
Octobre	Epilimnion	0.069	0.025	0.016	0.025	0.046
Novembre	Epilimnion	0.106	0.029	0.029	0.029	0.654
Décembre	Epilimnion	0.069	0.039	0.050	0.039	0.257
Janvier	Hypolimnion	0.042	0.015	0.025	0.014	0.014
Février	Hypolimnion	0.054	0.010	0.040	0.013	0.143
Mars	Hypolimnion	0.039	0.023	0.029	0.024	0.791
Avril	Hypolimnion	-0.072	0.025	0.007	0.024	5.97e-4
Mai	Hypolimnion	-0.038	0.024	-0.005	0.024	6.94e-6
Juin	Hypolimnion	-0.051	0.027	-0.008	0.025	2.14e-12
Juillet	Hypolimnion	-0.048	0.029	-0.017	0.028	3.58e-15
Août	Hypolimnion	-0.037	0.029	-0.010	0.028	1.89e-10
Septembre	Hypolimnion	-0.066	0.019	-0.024	0.020	9.26e-11
Octobre	Hypolimnion	-0.061	0.022	-0.008	0.021	1.67e-4
Novembre	Hypolimnion	-0.032	0.022	0.009	0.023	0.304
Décembre	Hypolimnion	0.025	0.019	0.020	0.020	0.745

ANNEXE 2 Résultats du calcul des taux de variation (°C/an) à l'aide de l'estimateur de Theil-Sen, en fonction des mois et des source de donnée , pour les jeux de données globaux et nationaux, comparaison entre strate avec les résultats du test de Kruskal-Wallis.

Mois	Source	Moyenne _{Epilimnion}	Moyenne _{Hypolimnion}	Médiane _{Epilimnion}	Médiane _{Hypolimnion}	Kruskal-Wallis _{pvalue}
Janvier	Globale	0.072	0.042	0.021	0.025	0.885
Février	Globale	0.004	0.054	0.013	0.040	0.129
Mars	Globale	0.065	0.039	0.031	0.029	0.571
Avril	Globale	-0.063	-0.072	0.010	0.007	0.803
Mai	Globale	-0.082	-0.038	0.010	-0.005	0.487
Juin	Globale	0.079	-0.051	0.016	-0.008	0.001
Juillet	Globale	0.036	-0.048	0.018	-0.017	0.000
Août	Globale	0.001	-0.037	0.018	-0.010	0.004
Septembre	Globale	0.117	-0.066	0.037	-0.024	0.000
Octobre	Globale	0.069	-0.061	0.016	-0.008	0.039
Novembre	Globale	0.106	-0.032	0.029	0.009	0.155
Décembre	Globale	0.069	0.025	0.050	0.020	0.276
Janvier	Nationale	0.036	0.015	0.035	0.014	0.000
Février	Nationale	0.026	0.010	0.027	0.013	0.010
Mars	Nationale	0.031	0.023	0.030	0.024	0.000
Avril	Nationale	0.034	0.025	0.033	0.024	0.000
Mai	Nationale	0.034	0.024	0.034	0.023	0.000
Juin	Nationale	0.040	0.027	0.039	0.025	0.000
Juillet	Nationale	0.042	0.029	0.042	0.028	0.000
Août	Nationale	0.039	0.029	0.040	0.028	0.000
Septembre	Nationale	0.027	0.019	0.027	0.020	0.000
Octobre	Nationale	0.025	0.022	0.025	0.021	0.101
Novembre	Nationale	0.029	0.022	0.029	0.023	0.000
Décembre	Nationale	0.039	0.019	0.039	0.020	0.000

ANNEXE 3 Résultats des pentes estimées (°C/an) pour le changement de température en fonction des strates et des mois, sans prise en compte de l'effet individuel des lacs, pour les données à l'échelle nationale.

Mois	Strate	Vitesse(C°/ans	Standard Error	Degrees of Freedom	Lower.CL	Upper.CL	T.ratio	P.value
Janvier	Épilimnion	0.029	0.001	305292.000	0.027	0.031	23.864	0.000
Février	Épilimnion	0.008	0.001	305292.000	0.006	0.011	6.814	0.000
Mars	Épilimnion	0.025	0.001	305292.000	0.023	0.027	20.615	0.000
Avril	Épilimnion	0.032	0.001	305292.000	0.030	0.035	26.650	0.000
Mai	Épilimnion	0.032	0.001	305292.000	0.029	0.034	25.958	0.000
Juin	Épilimnion	0.040	0.001	305292.000	0.037	0.042	32.743	0.000
Juillet	Épilimnion	0.043	0.001	305292.000	0.041	0.045	35.390	0.000
Août	Épilimnion	0.037	0.001	305292.000	0.035	0.040	30.048	0.000
Septembre	Épilimnion	0.011	0.001	305292.000	0.009	0.014	9.140	0.000
Octobre	Épilimnion	0.016	0.001	305292.000	0.014	0.019	12.897	0.000
Novembre	Épilimnion	0.023	0.001	305292.000	0.020	0.025	18.196	0.000
Décembre	Épilimnion	0.032	0.001	305292.000	0.030	0.035	25.745	0.000
Janvier	Hypolimnion	0.012	0.001	305292.000	0.009	0.014	9.544	0.000
Février	Hypolimnion	0.002	0.001	305292.000	-0.000	0.004	1.673	0.094
Mars	Hypolimnion	0.014	0.001	305292.000	0.011	0.016	11.097	0.000
Avril	Hypolimnion	0.021	0.001	305292.000	0.018	0.023	16.949	0.000
Mai	Hypolimnion	0.022	0.001	305292.000	0.020	0.024	18.002	0.000
Juin	Hypolimnion	0.027	0.001	305292.000	0.025	0.029	22.162	0.000
Juillet	Hypolimnion	0.030	0.001	305292.000	0.028	0.033	24.793	0.000
Août	Hypolimnion	0.027	0.001	305292.000	0.025	0.030	21.854	0.000
Septembre	Hypolimnion	0.012	0.001	305292.000	0.010	0.015	9.905	0.000
Octobre	Hypolimnion	0.010	0.001	305292.000	0.007	0.012	7.877	0.000
Novembre	Hypolimnion	0.016	0.001	305292.000	0.014	0.019	12.919	0.000
Décembre	Hypolimnion	0.015	0.001	305292.000	0.012	0.017	11.688	0.000

ANNEXE 4 Résultats des pentes estimées (°C/an) pour le changement de température en fonction des strates et des mois, sans prise en compte de l'effet individuel des lacs, pour les données à l'échelle globale.

Mois	Strate	Vitesse(C°/ans	Standard Error	Degrees of Freedom	Lower.CL	Upper.CL	T.ratio	P.value
Janvier	Épilimnion	-0.026	0.009	119429	-0.044	-0.008	-2.878	0.004
Février	Épilimnion	0.003	0.009	119429	-0.014	0.020	0.350	0.727
Mars	Épilimnion	0.011	0.008	119429	-0.004	0.026	1.438	0.150
Avril	Épilimnion	0.070	0.006	119429	0.059	0.082	12.147	0.000
Mai	Épilimnion	0.094	0.003	119429	0.087	0.100	26.885	0.000
Juin	Épilimnion	0.133	0.003	119429	0.128	0.138	52.729	0.000
Juillet	Épilimnion	0.105	0.002	119429	0.101	0.110	44.577	0.000
Août	Épilimnion	0.051	0.003	119429	0.046	0.057	18.100	0.000
Septembre	Épilimnion	0.080	0.003	119429	0.073	0.086	24.106	0.000
Octobre	Épilimnion	0.067	0.004	119429	0.058	0.075	15.084	0.000
Novembre	Épilimnion	0.021	0.006	119429	0.008	0.033	3.202	0.001
Décembre	Épilimnion	0.004	0.010	119429	-0.016	0.023	0.365	0.715
Janvier	Hypolimnion	-0.014	0.011	119429	-0.034	0.007	-1.285	0.199
Février	Hypolimnion	0.002	0.011	119429	-0.019	0.022	0.141	0.888
Mars	Hypolimnion	-0.002	0.009	119429	-0.020	0.016	-0.204	0.838
Avril	Hypolimnion	0.015	0.006	119429	0.002	0.028	2.316	0.021
Mai	Hypolimnion	0.031	0.004	119429	0.023	0.039	7.984	0.000
Juin	Hypolimnion	0.049	0.003	119429	0.043	0.054	16.118	0.000
Juillet	Hypolimnion	0.055	0.003	119429	0.050	0.060	19.886	0.000
Août	Hypolimnion	0.046	0.003	119429	0.040	0.053	15.119	0.000
Septembre	Hypolimnion	0.057	0.004	119429	0.050	0.064	15.613	0.000
Octobre	Hypolimnion	0.049	0.005	119429	0.040	0.058	10.204	0.000
Novembre	Hypolimnion	0.027	0.007	119429	0.012	0.041	3.570	0.000
Décembre	Hypolimnion	-0.003	0.012	119429	-0.026	0.020	-0.216	0.829

ANNEXE 5 Résultats des modèles linéaires pour le calcul de la vitesse de changement de température en fonction des strates et des mois, sans prise en compte de l'effet individuel des lacs.

Analyse de la variance pour les données globales						Résultats du modèle linéaire pour les données globales			
Facteur	Sum of Squares	Degrees of Freedom	F value	Pr(>F)		R ²	Adj. R ²	F _{Statistic}	F _{p.value}
Year	84421.60	1	6258.82	0.0e+0		0.76	0.76	7987.22	0
Mois	1752836.62	22	5906.88	0.0e+0					
strate	3797862.34	12	23463.74	0.0e+0					
Year:Mois	12986.41	11	87.53	1.3e-198					
Year:strate	7606.04	1	563.89	2.3e-124					
Mois:strate	571447.31	11	3851.44	0.0e+0					
Year:Mois:strate	4157.09	11	28.02	2.0e-59					
Residuals	1610907.41	119429.00							
Analyse de la variance pour les données nationales						Résultats du modèle linéaire pour les données nationales			
Facteur	Sum of Squares	Degrees of Freedom	F value	Pr(>F)		R ²	Adj. R ²	F _{Statistic}	F _{p.value}
Year	46783.12	1	7957.88	0.0e+0		0.82	0.82	28909.61	0
Mois	7075601.97	22	54707.77	0.0e+0					
strate	1116807.28	12	15830.89	0.0e+0					
Year:Mois	7657.77	11	118.42	4.8e-272					
Year:strate	2441.26	1	415.26	3.0e-92					
Mois:strate	259177.80	11	4007.87	0.0e+0					
Year:Mois:strate	563.25	11	8.71	1.2e-15					
Residuals	1794763.06	305292.00							

ANNEXE 6 Résultats des régressions de Theil-Sen pour les données à l'échelle globale, sans la prise en compte du caractère individuel de chaque lac.

Strate	Mois	Vitesse(C°/ans	Pvalue	Intervalle de confiance _{Bas}	Intervalle de confiance _{Haut}	n _{obs}
Epilimnion	Janvier	-3.0e-3	4.16e-22	NA	NA	1090
Epilimnion	Février	-3.8e-4	3.15e-2	NA	NA	1141
Epilimnion	Mars	-2.0e-4	3.02e-1	NA	NA	1477
Epilimnion	Avril	-1.2e-3	1.17e-37	NA	NA	2654
Epilimnion	Mai	-6.2e-4	9.01e-155	NA	NA	7669
Epilimnion	Juin	-4.1e-4	1.43e-287	NA	NA	12103
Epilimnion	Juillet	-3.0e-4	0.00e+0	NA	NA	13689
Epilimnion	Aout	-2.7e-4	1.92e-241	NA	NA	11047
Epilimnion	Septembre	-4.8e-4	2.73e-235	NA	NA	8217
Epilimnion	Octobre	-1.0e-3	1.98e-163	NA	NA	4526
Epilimnion	Novembre	-2.0e-3	5.21e-49	NA	NA	2029
Epilimnion	Décembre	0.0e+0	9.20e-1	NA	NA	907
Hypolimnion	Janvier	-7.9e-4	1.75e-3	NA	NA	730
Hypolimnion	Février	8.6e-4	1.60e-5	NA	NA	769
Hypolimnion	Mars	-3.0e-4	4.92e-2	NA	NA	997
Hypolimnion	Avril	-5.9e-4	7.03e-29	NA	NA	2153
Hypolimnion	Mai	-4.6e-4	5.77e-223	NA	NA	6458
Hypolimnion	Juin	-3.5e-4	1.11e-232	NA	NA	9277
Hypolimnion	Juillet	-3.4e-4	0.00e+0	NA	NA	10713
Hypolimnion	Aout	-3.8e-4	1.11e-261	NA	NA	9548
Hypolimnion	Septembre	-6.4e-4	1.04e-233	NA	NA	6628
Hypolimnion	Octobre	-1.1e-3	6.19e-166	NA	NA	3634
Hypolimnion	Novembre	-5.4e-4	8.73e-6	NA	NA	1405
Hypolimnion	Décembre	-9.9e-4	1.04e-1	NA	NA	616

ANNEXE 7 Résultats des régressions de Theil-Sen pour les données à l'échelle nationale, sans la prise en compte du caractère individuel de chaque lac.

Strate	Mois	Vitesse(C°/ans)	Pvalue	Intervalle de confiance _{Bas}	Intervalle de confiance _{Haut}	n _{obs}
Epilimnion	Janvier	7.61e-6	2.08e-1	NA	NA	12810
Epilimnion	Février	4.01e-6	5.32e-1	NA	NA	12810
Epilimnion	Mars	-8.00e-6	1.56e-1	NA	NA	12810
Epilimnion	Avril	-1.45e-5	3.05e-3	NA	NA	12810
Epilimnion	Mai	-2.30e-5	7.90e-6	NA	NA	12810
Epilimnion	Juin	-2.16e-5	3.07e-5	NA	NA	12810
Epilimnion	Juillet	-1.30e-5	2.14e-2	NA	NA	12810
Epilimnion	Août	-1.26e-8	9.98e-1	NA	NA	12600
Epilimnion	Septembre	8.60e-6	7.60e-2	NA	NA	12600
Epilimnion	Octobre	1.48e-5	2.16e-3	NA	NA	12600
Epilimnion	Novembre	2.41e-5	2.52e-6	NA	NA	12600
Epilimnion	Décembre	1.57e-5	6.88e-3	NA	NA	12600
Hypolimnion	Janvier	-1.18e-5	3.03e-9	NA	NA	12810
Hypolimnion	Février	-1.40e-5	3.59e-9	NA	NA	12810
Hypolimnion	Mars	-3.38e-5	2.30e-16	NA	NA	12810
Hypolimnion	Avril	-5.14e-5	9.16e-23	NA	NA	12810
Hypolimnion	Mai	-8.34e-5	1.58e-35	NA	NA	12810
Hypolimnion	Juin	-1.15e-4	2.56e-43	NA	NA	12810
Hypolimnion	Juillet	-1.33e-4	6.51e-48	NA	NA	12810
Hypolimnion	Août	-1.28e-4	5.15e-47	NA	NA	12600
Hypolimnion	Septembre	-8.97e-5	4.16e-38	NA	NA	12600
Hypolimnion	Octobre	-5.22e-5	1.56e-23	NA	NA	12600
Hypolimnion	Novembre	-6.55e-6	1.21e-1	NA	NA	12600
Hypolimnion	Décembre	-6.38e-6	2.27e-2	NA	NA	12600

ANNEXE 8 Comparaison des estimations marginales des moyennes (test de Student) entre l'épilimnion et l'hypolimnion par mois et par source de données

Comparaison	Mois	Source	Estimate	Erreur Standard	df	t.ratio	p.value
Epilimnion - Hypolimnion	Janvier	Globale	-0.012	0.010	424721.000	-1.158	0.247
Epilimnion - Hypolimnion	Février	Globale	0.002	0.010	424721.000	0.145	0.885
Epilimnion - Hypolimnion	Mars	Globale	0.013	0.009	424721.000	1.390	0.164
Epilimnion - Hypolimnion	Avril	Globale	0.055	0.006	424721.000	8.267	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Mai	Globale	0.063	0.004	424721.000	15.520	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Juin	Globale	0.085	0.003	424721.000	27.939	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Juillet	Globale	0.050	0.002	424721.000	17.974	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Août	Globale	0.005	0.003	424721.000	1.482	0.138
Epilimnion - Hypolimnion	Septembre	Globale	0.022	0.003	424721.000	5.930	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Octobre	Globale	0.018	0.005	424721.000	3.543	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Novembre	Globale	-0.006	0.007	424721.000	-0.799	0.424
Epilimnion - Hypolimnion	Décembre	Globale	0.006	0.011	424721.000	0.521	0.603
Epilimnion - Hypolimnion	Janvier	Nationale	0.017	0.002	424721.000	8.670	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Février	Nationale	0.006	0.002	424721.000	3.113	0.002
Epilimnion - Hypolimnion	Mars	Nationale	0.012	0.002	424721.000	5.763	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Avril	Nationale	0.012	0.002	424721.000	5.873	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Mai	Nationale	0.010	0.002	424721.000	4.817	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Juin	Nationale	0.013	0.002	424721.000	6.406	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Juillet	Nationale	0.013	0.002	424721.000	6.416	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Août	Nationale	0.010	0.002	424721.000	4.961	0.000
Epilimnion - Hypolimnion	Septembre	Nationale	-0.001	0.002	424721.000	-0.463	0.643
Epilimnion - Hypolimnion	Octobre	Nationale	0.006	0.002	424721.000	3.040	0.002
Epilimnion - Hypolimnion	Novembre	Nationale	0.007	0.002	424721.000	3.195	0.001
Epilimnion - Hypolimnion	Décembre	Nationale	0.018	0.002	424721.000	8.511	0.000

ANNEXE 9 Comparaison des estimations marginales des moyennes (test de Student) entre les données globales et nationales par mois et par strate

Comparaison	Mois	Strate	Estimate	Erreur Standard	df	t.ratio	p.value
Globale - Nationale	Janvier	Epilimnion	-0.055	0.007	424721	-7.754	0.000
Globale - Nationale	Février	Epilimnion	-0.005	0.007	424721	-0.767	0.443
Globale - Nationale	Mars	Epilimnion	-0.014	0.006	424721	-2.358	0.018
Globale - Nationale	Avril	Epilimnion	0.038	0.005	424721	8.079	0.000
Globale - Nationale	Mai	Epilimnion	0.062	0.003	424721	20.418	0.000
Globale - Nationale	Juin	Epilimnion	0.093	0.002	424721	38.731	0.000
Globale - Nationale	Juillet	Epilimnion	0.062	0.002	424721	26.977	0.000
Globale - Nationale	Août	Epilimnion	0.014	0.003	424721	5.248	0.000
Globale - Nationale	Septembre	Epilimnion	0.068	0.003	424721	23.239	0.000
Globale - Nationale	Octobre	Epilimnion	0.051	0.004	424721	13.653	0.000
Globale - Nationale	Novembre	Epilimnion	-0.002	0.005	424721	-0.402	0.688
Globale - Nationale	Décembre	Epilimnion	-0.028	0.008	424721	-3.622	0.000
Globale - Nationale	Janvier	Hypolimnion	-0.025	0.008	424721	-3.050	0.002
Globale - Nationale	Février	Hypolimnion	-0.001	0.008	424721	-0.064	0.949
Globale - Nationale	Mars	Hypolimnion	-0.015	0.007	424721	-2.125	0.034
Globale - Nationale	Avril	Hypolimnion	-0.006	0.005	424721	-1.092	0.275
Globale - Nationale	Mai	Hypolimnion	0.009	0.003	424721	2.766	0.006
Globale - Nationale	Juin	Hypolimnion	0.022	0.003	424721	7.927	0.000
Globale - Nationale	Juillet	Hypolimnion	0.025	0.003	424721	9.689	0.000
Globale - Nationale	Août	Hypolimnion	0.019	0.003	424721	6.909	0.000
Globale - Nationale	Septembre	Hypolimnion	0.045	0.003	424721	14.087	0.000
Globale - Nationale	Octobre	Hypolimnion	0.039	0.004	424721	9.839	0.000
Globale - Nationale	Novembre	Hypolimnion	0.011	0.006	424721	1.779	0.075
Globale - Nationale	Décembre	Hypolimnion	-0.017	0.009	424721	-1.870	0.062