



HAL
open science

Estimation des conditions de référence et seuils de qualité pour le paramètre “ température de l’eau ” en plans d’eau

J. Prats, P.A. Danis

► **To cite this version:**

J. Prats, P.A. Danis. Estimation des conditions de référence et seuils de qualité pour le paramètre “ température de l’eau ” en plans d’eau. [Rapport de recherche] irstea. 2018, pp.43. hal-02608984

HAL Id: hal-02608984

<https://hal.inrae.fr/hal-02608984v1>

Submitted on 16 May 2020


HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Programme 2016/2018

Thème État, fonctionnement et services des écosystèmes aquatiques

Action n° 13

A vertical decorative image on the left side of the page, showing a close-up of reeds or grasses in shades of blue and green.

Estimation des conditions de référence et seuils de qualité pour le paramètre « température de l'eau » en plans d'eau

Rapport final

Jordi PRATS-RODRÍGUEZ
(Irstea)

Pierre-Alain DANIS
(Agence Française pour la Biodiversité)

Décembre 2018

AUTEURS

Jordi PRATS-RODRÍGUEZ

ingénieur de recherche (Irstea, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), jordi.prats@irstea.fr

Pierre-Alain DANIS

chargé de mission en limnologie thermique et chimique (AFB, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), pierre-alain.danis@afbiodiversite.fr

CORRESPONDANTS

AFB : Pierre-Alain DANIS

chargé de mission en limnologie thermique et chimique (AFB, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), pierre-alain.danis@afbiodiversite.fr

Irstea : Martin DAUFRESNE

chargé de recherche (Irstea, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), martin.daufresne@irstea.fr

AUTRES CONTRIBUTEURS

Nathalie FOLTON

ingénieur d'étude (Irstea, équipe RHAX), nathalie.folton@irstea.fr

REFERENCE

Prats, J. & P.-A. Danis, 2018, *Estimation des conditions de référence et seuils de qualité pour le paramètre « température de l'eau » en plans d'eau*, Convention AFB-Irstea, pp 43.

<p>Droits d'usage : Accès libre Niveau géographique : National Couverture géographique : France métropolitaine Niveau de lecture : Professionnels, experts</p>
--

RESUME

La température de l'eau est un des paramètres les plus importants pour l'organisation des écosystèmes aquatiques lenticques. Elle est d'ailleurs définie comme un des paramètres soutenant la biologie dans la Directive Cadre européenne sur l'Eau. La température de l'eau est aussi un paramètre déterminant pour la qualité de l'eau car la température est un paramètre de contrôle à la fois des réactions chimiques et à la fois des échanges de masse et d'énergie au sein des masses d'eau lenticques et au niveau des zones de mélange des apports depuis les bassins versants. Par conséquent, les effets des pressions physico-chimiques anthropiques depuis les bassins versants, sur les masses d'eau lenticques sont en partie contrôlés par les températures des deux masses d'eau, plan d'eau et cours d'eau.

En parallèle, la température est à son tour modifiée par un changement de la qualité de l'eau. En effet, la qualité d'une eau est déterminante pour sa transparence, et cette dernière influence la répartition verticale de l'énergie apportée par le rayonnement solaire au plan d'eau à travers la surface. La réponse d'un lac à des conditions météorologiques et climatiques est donc en partie dépendante des conditions de transparence et donc de la qualité d'eau.

Ce rapport présente les résultats d'un travail de recherche d'un indicateur de température de l'eau DCE afin de relier les seuils de qualité du paramètre transparence (Danis & Roubeix, 2014) pour étudier l'effet de la qualité de l'eau sur la température de l'eau. Pour ça, un modèle mécaniciste GLM (General Lake Model) a permis de simuler la température de l'eau sous de conditions de transparence correspondantes à différents niveaux de qualité. Et ces simulations pourraient être utilisées pour calculer les valeurs seuils pour le paramètre température de l'eau.

Par ailleurs, des données in situ ont été utilisées pour analyser le comportement thermique récent des plans d'eau français. L'analyse a montré une influence de la morphométrie des plans d'eau, en particulier de leur profondeur, sur leur comportement thermique. En particulier, l'étude a montré que la profondeur des plans d'eau conditionne l'effet des variations de la transparence sur le comportement thermique.

MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)

Paramètres physico-chimiques généraux soutenant la biologie en plan d'eau, Température de l'eau, France métropolitaine, Conditions de référence, DCE

ESTIMATION OF REFERENCE CONDITIONS AND QUALITY THRESHOLDS FOR THE "WATER TEMPERATURE" PARAMETER IN LAKES

ABSTRACT

Water temperature is one of the most important parameters for the organization of lentic aquatic ecosystems. It is also defined as one of the parameters supporting biology in the European Water Framework Directive. Water temperature is also a decisive parameter for water quality because temperature is a parameter that controls chemical reactions and both mass and energy exchanges in water bodies and at the mixing areas receiving inflows from watersheds. Consequently, the effects of anthropic physicochemical pressures from watersheds on lentic water bodies are partly controlled by the temperatures of the two water bodies, the water mass and streams.

In parallel, temperature is in turn modified by a change in water quality. Indeed, the quality of water is determinant for its transparency, and the latter influences the vertical distribution of the solar radiation energy absorbed by the water body through the surface. The response of a lake to meteorological and climatic conditions is therefore partly dependent on the conditions of transparency and therefore the water quality.

This report presents the results of a research project on a DCE water temperature indicator in order to link the quality thresholds of the transparency parameter (Danis & Roubeix, 2014) to study the effect of water quality on water temperature. For this, the GLM (General Lake Model) mechanistic model has been used to simulate the temperature of water under transparency conditions corresponding to different levels of quality. And these simulations might be used to calculate the threshold values for the water temperature parameter.

Furthermore, in situ data were used to analyze the recent thermal behavior of French water bodies. The analysis showed an influence of the morphometry of the water bodies, in particular their depth, on their thermal behavior. In particular, the study has shown that the depth of water bodies conditions the effect of changes in transparency on thermal behavior.

KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)

General physicochemical parameters supporting the biological elements, Water temperature, Metropolitan France, Reference conditions, WFD

SOMMAIRE

1. Introduction	6
2. Les mesures de température des plans d'eau français	7
2.1. Profils de température	7
2.2. Mesures de température de surface par satellite	7
3. Le comportement thermique des plans d'eau français d'après les données	8
3.1. Le cycle annuel	8
3.1.1. La température moyenne annuelle de surface	8
3.1.2. Amplitude du cycle thermique annuel de surface	9
3.1.3. La phase du cycle thermique annuel de surface	9
3.2. Les gradients thermiques verticaux	10
3.3. Les gradients thermiques horizontaux	10
4. Le modèle GLM	13
4.1. Configuration de GLM	14
4.2. Spécification de la bathymétrie	14
4.3. Données de forçage	15
4.3.1. Données météorologiques	15
4.3.2. Débits d'entrée	15
4.3.3. Température de l'eau des tributaires	15
4.3.4. Débits de sortie	15
4.3.5. Transparence	15
4.3.6. Conditions initiales	16
4.4. Indicateurs thermiques	16
4.4.1. Indicateurs annuels	16
4.4.2. Indicateurs saisonniers	17
4.4.3. Indicateurs sur la stratification	17
4.4.4. Indicateurs hebdomadaires	18
5. Cas d'étude	18
5.1. Cas de base	18
5.2. Conditions de référence et seuils de qualité	19
6. Résultats des simulations pour le cas de base	20
6.1. Validation avec des données in situ	20
6.2. Validation avec des données satellitaires	23
6.3. Comportement des indicateurs de température sur le long terme	24
7. Effet de la qualité de l'eau sur le comportement thermique	27
7.1. Différences de comportement thermique entre les scénarios extrêmes	27
7.2. Différences de comportement thermique entre les seuils Très bon/Bon et Médiocre/Mauvais	29
8. Calcul des conditions de référence et de seuils de température	31
9. Conclusions et perspectives	37
10. Bibliographie	38
11. Liste des illustrations	40

ESTIMATION DES CONDITIONS DE REFERENCE ET SEUILS DE QUALITE POUR LE PARAMETRE « TEMPERATURE DE L'EAU » EN PLANS D'EAU

1. Introduction

La température de l'eau est une des variables physico-chimiques les plus importantes pour les organismes des écosystèmes d'eau douce. La température de l'eau affecte les organismes aquatiques à plusieurs niveaux d'organisation, du niveau métabolique à leur cycle de vie et à leur distribution géographique. La température est aussi l'un des moteurs du mouvement de l'eau dans les plans d'eau et, donc est un facteur de contrôle de la répartition verticale des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Cette variable fait donc logiquement partie des paramètres physico-chimiques dits « généraux soutenant les communautés biologiques » dans la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) parmi d'autres paramètres que sont la transparence, les nutriments, la salinité et la capacité de neutralisation des acides.

La mise en application de cette Directive implique le développement d'indicateurs d'état écologique pour ces paramètres physico-chimiques. Ces indicateurs doivent être construits sur la base de valeurs de référence, correspondant à des conditions non altérées par les pressions anthropiques, et sur la base de valeurs-seuils permettant de délimiter les différentes classes d'état. L'action de l'AFB numéro 13 vise justement à la détermination de ces valeurs de référence et de ces valeurs-seuils pour la température de l'eau et pour l'oxygène dissous. Ce rapport porte sur la détermination des conditions de référence.

D'après le point 1.3.iii de l'Annexe II de la Directive Cadre sur l'Eau, les conditions hydromorphologiques et physico-chimiques caractéristiques des plans d'eau « peuvent soit avoir une base spatiale, soit être issues d'un modèle ou encore être dérivées d'une combinaison de deux méthodes. Si ces méthodes ne sont pas utilisables, les États membres peuvent recourir à un avis d'expert pour établir lesdites conditions. » En plus, la détermination des valeurs-seuils et des valeurs de référence pour la température et pour l'oxygène dissous doit tenir compte des variabilités intra-annuelles et interannuelles de la température et de l'oxygénation des plans d'eau ; et il faut considérer les variations non seulement d'origines naturelles, i.e. en réponses aux forçages externes hydro-climatiques, mais également d'origines anthropiques, i.e. en réponses à l'occupation du bassin-versant ou à la gestion des plans d'eau.

Cette prise en compte doit être basée sur des critères les plus objectifs possibles et sur l'analyse des données. Or, les données de température de l'eau et d'oxygène dissous disponibles sont limitées dans le cas des réseaux DCE, i.e. à minima 4 profils à l'aplomb de la zone la plus profonde, durant 2 années par plan de gestion de 6 ans. Ces données sont récoltées principalement entre la fin du printemps et l'automne, ce qui ne renseigne que partiellement sur les conditions intra-annuelles de température et d'oxygène. En particulier, les quelques mesures discrètes ne permettent pas d'identifier des caractéristiques majeures pour les organismes biologiques des conditions température et oxygène comme : la durée de la période de stratification, la présence (ou non) et la durée d'une phase d'anoxie estivale ou hivernale.

Pour combler ce manque de donnée, l'utilisation de modélisations thermodynamiques mécanistes (basées sur des processus physiques) a été envisagée. Ce type de modélisation calée sur des données de terrain et sur des données satellitaires (Prats et Danis, 2015a; Simon, Tormos et Danis, 2014) permet potentiellement d'estimer le comportement thermodynamique des plans d'eau à partir des données météorologiques, des données de transparence (naturelle ou en réponse à des pressions chimiques anthropiques) et des données hydrologiques naturelles ou anthropiques.

Ce type de modélisation permet aussi d'avoir une extrapolation mécaniste des données ponctuelles DCE et par là une caractérisation intra et interannuelle des conditions de température. Ces nouvelles connaissances devraient permettre d'estimer des métriques (i.e. des indicateurs d'état) pour ces deux paramètres ainsi que leurs valeurs de référence et valeurs-seuils associées. Enfin, ces outils permettent potentiellement d'analyser également les effets des changements climatiques récents ou à venir sur ces potentiels indicateurs d'état afin de par exemple étudier leur pertinence dans un contexte climatique changeant durant les une ou deux prochaines dizaines d'années. Par exemple, des

simulations faites avec FLake montrent un changement du régime thermique des lacs centro-européens vers la fin des années 1980 (Woolway et al., 2017).

Pour déterminer les conditions de référence pour la température de l'eau, le modèle GLM (General Lake Model) a été choisi. Ce modèle est un des modèles hydrodynamiques en 1D les plus utilisés et a été présenté en détail dans le premier rapport (Prats Rodríguez et Danis, 2016) de l'action AFB n° 13 2016-2018. Plusieurs travaux ont démontré ses capacités. Read et al. (2014) ont montré que GLM peut être appliqué à large échelle avec une erreur d'estimation acceptable (RMSE = 1,74 °C) des températures en surface. Plus récemment, Bruce et al. (2018) ont testé le modèle sur un ensemble de 32 lacs dans différentes régions du globe, atteignant des RMSE moyennes de 1,7 °C pour la température de l'épilimnion et de 1,3 °C pour la température de l'hypolimnion. Pour la France, le deuxième rapport (Prats Rodríguez et Danis, 2017) de l'action AFB n° 13 2016-2018 a évalué la performance de GLM sur l'ensemble des plans d'eau DCE en utilisant des options de configuration homogènes pour tous les plans d'eau. L'erreur absolue moyen était autour de 2 °C. Dans ce rapport, le modèle GLM a été appliqué à l'estimation des conditions de référence de la température de l'eau. Pour ça, la température de l'eau des plans DCE français a été simulée pour des conditions de transparence de l'eau correspondantes à classifications de qualité de très bon état. Les simulations ont été réalisées pour la période 1970-2015, ce qui permet d'observer l'évolution des conditions thermiques dans le temps en réponse au changement climatique.

2. Les mesures de température des plans d'eau français

2.1. Profils de température

Les profils thermiques mesurés par le Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) et le Réseau de Contrôle Opérationnel (RCO) ont été utilisés pour évaluer le comportement du modèle dans la dimension verticale. À ce jour, ces réseaux ont suivis plus de 85% des plans d'eau DCE. Ces suivis sont principalement à la charge des agences de bassin et d'établissements publics gestionnaires de plans d'eau. Théoriquement, ces plans d'eau sont suivis pendant au moins deux ans par plan de gestion de six ans par, entre autre, a minima 4 profils de température/oxygène. La plupart des plans d'eau ont ici 4, 8 ou 12 profils mesurés entre 1999 et 2016 (Figure 1).

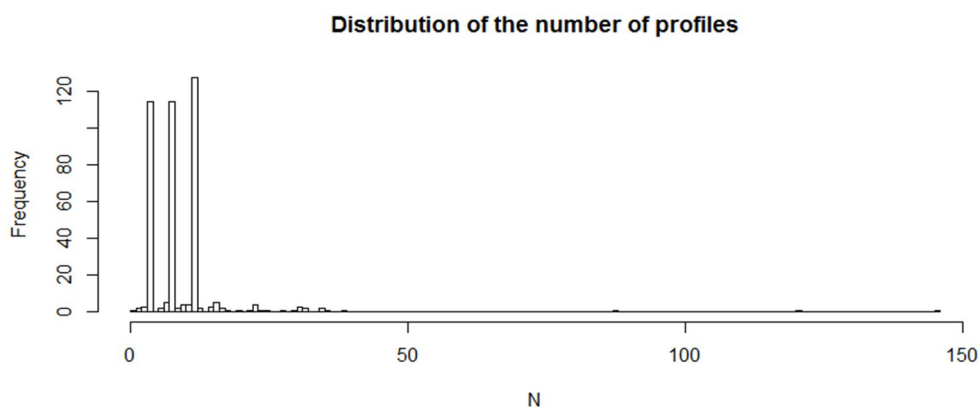


Figure 1 : Distribution du nombre de profils mesurés par plan d'eau.

Source des données : base de données Plan_deau.

2.2. Mesures de température de surface par satellite

Les mesures de température superficielle du jeu de données LakeSST (Prats et al., 2018a) ont été utilisées pour évaluer la qualité des estimations de la température de l'épilimnion et de la dynamique temporelle des simulations à l'échelle pluriannuelle. Cette base de données a été développée à partir

d'images thermiques des satellites Landsat-5 et Landsat-7 pour les plans DCE français pour la période 1999-2016.

À cause des limitations opérationnelles des satellites Landsat et de la présence de nuages, le nombre de mesures disponibles par an est variable (Figure 2).

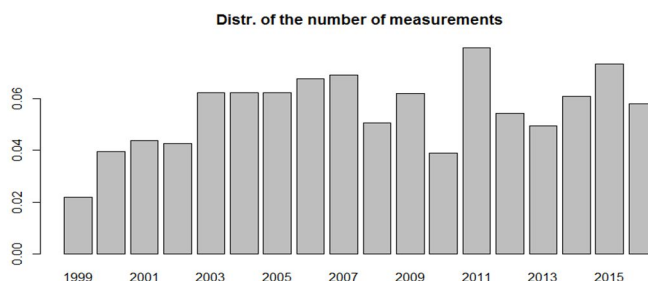


Figure 2 : Distribution du nombre de mesures exploitables par année dans le jeu de données LakeSST.

Source des données : jeu de données LakeSST.

En accord avec les résultats de l'analyse de qualité des données (Prats et al., 2018a), le biais saisonnier des mesures de la température de peau b_e a été corrigé :

$$T_{skin} = T_{skin,uncorr} - b_e \quad \text{où} \quad b_e = -1,6 + 8,725 \cdot 10^{-4} R_s$$

où T_{skin} est température de peau (°C), $T_{skin,uncorr}$ est la température de peau non corrigée (°C), et R_s est la radiation solaire moyenne journalière ($J \text{ cm}^{-2}$). La température de l'épilimnion T_e a été estimée comme :

$$T_e = T_{skin} - \Delta T_c - \Delta T_w$$

où ΔT_c est l'effet « peau froide » (°C) et ΔT_w est l'effet de la « couche chaude » (°C). Les valeurs constantes $\Delta T_c = -0,46$ et $\Delta T_w = 0,12$ ont été utilisées, d'après les résultats moyens obtenus pour le barrage de Bimont (Prats et al., 2018a).

3. Le comportement thermique des plans d'eau français d'après les données

Une grande partie des résultats dans cette section ont été présentés pendant le « European Large Lakes Symposium » 2018 à Évian-les-Bains (Prats et al. 2018b).

3.1. Le cycle annuel

Le cycle annuel des plans d'eau français a été étudié à travers le calage d'une fonction sinusoïdale sur les données satellitaires de température de surface. Les paramètres de la fonction sinusoïdale nous informent du comportement moyen des plans d'eau par rapport à la température moyenne, l'amplitude du cycle annuel et la phase du cycle annuel (Figure 3).

3.1.1. La température moyenne annuelle de surface

La température moyenne annuelle de surface (MAET) des plans d'eau français dépend principalement de la localisation du plan d'eau (altitude, latitude), mais aussi de la morphologie du plan d'eau (aire surfacique) : $MAET = T_m = 39,9 - 0,0045Alt - 0,484Lat - 0,167 \ln(Surf)$

où Alt est l'altitude (m), Lat est la latitude (° nord) et $Surf$ est la surface du plan d'eau (m^2). Le coefficient de détermination de la régression est $r^2 = 0.83$.

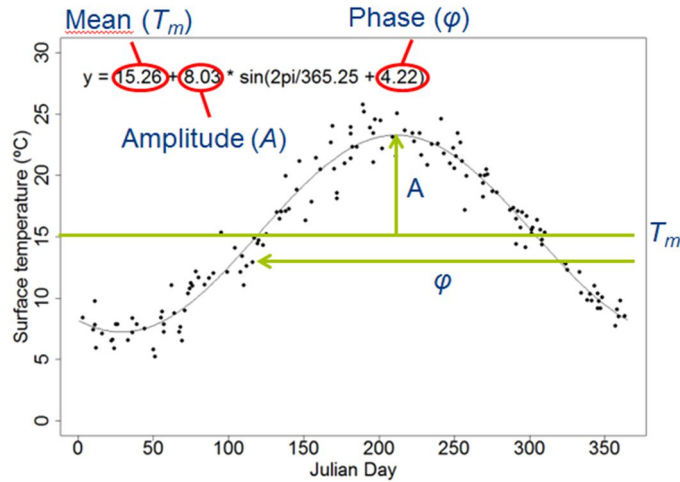


Figure 3 : Caractéristiques d'un cycle annuel de température de surface résumé par 3 variables : la température moyenne (T_m), l'amplitude du cycle annuel (A) et la phase du cycle annuel (φ).

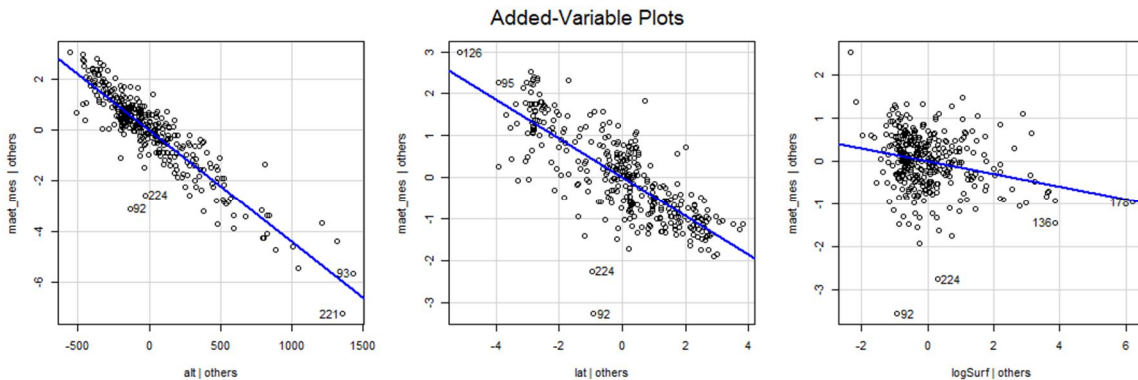


Figure 4 : Diagrammes de régression partielle de la MAET en fonction, de gauche à droite, de l'altitude, la latitude et la surface.

3.1.2. Amplitude du cycle thermique annuel de surface

L'amplitude du cycle annuel présente une petite variabilité entre plans d'eau. Elle dépend de l'altitude et du volume du plan d'eau :

$$A = 10,5 - 0,0004 Alt - 0,13 \ln(Vol)$$

où A (°C) est l'amplitude et Vol est le volume (m^3). Comme l'amplitude est peu variable, le coefficient de détermination de la régression est bas ($r^2 = 0,23$).

3.1.3. La phase du cycle thermique annuel de surface

La phase du cycle thermique φ (en radians) dépend de l'altitude, du volume et de la profondeur du plan d'eau :

$$\varphi = -1,498 - 0,94 \cdot 10^{-4} Alt - 0,0194 \ln(Vol) - 0,0423 \ln(z_{max})$$

où z_{max} (m) est la profondeur maximale du plan d'eau. Le coefficient de détermination de la régression est $r^2 = 0,73$.

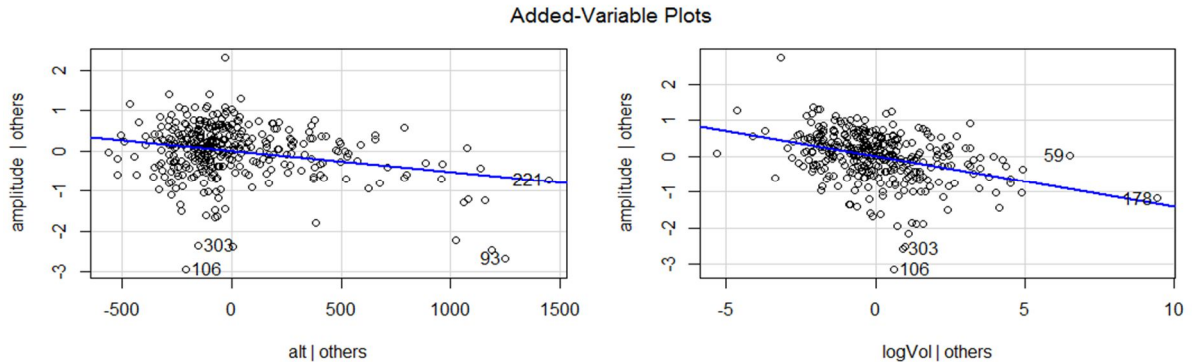


Figure 5 : Diagrammes de régression partielle de l'amplitude du cycle thermique annuel de surface en fonction de l'altitude et le volume.

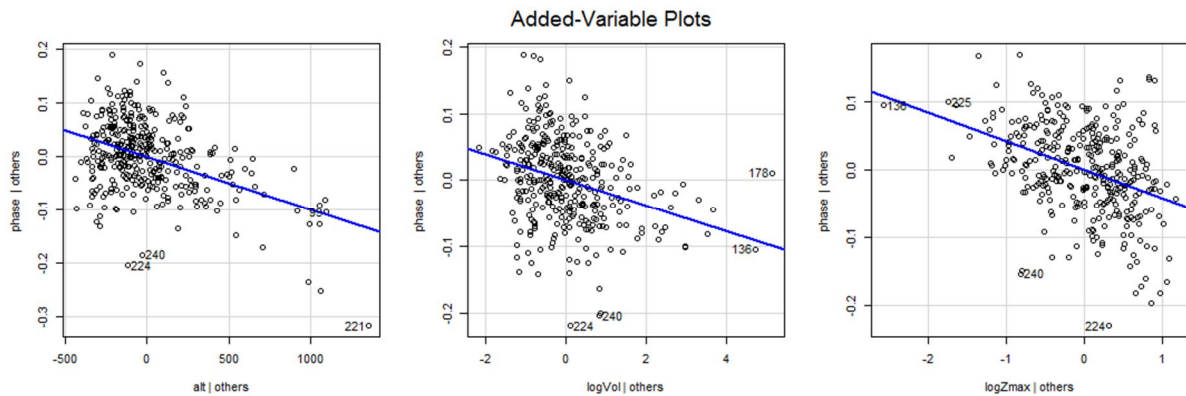


Figure 6 : Diagrammes de régression partielle de la phase en fonction, de gauche à droite, de l'altitude, le volume et la profondeur maximale.

3.2. Les gradients thermiques verticaux

Pour étudier les profils thermiques verticaux, la température de l'épilimnion, la température de l'hypolimnion, la différence de température entre épilimnion et hypolimnion et la profondeur de la thermocline ont été calculées pour les profils disponibles en été. L'effet de la profondeur maximale sur ces variables a été analysé par type de plan d'eau (Figure 7-8).

Pour de plans d'eau peu profonds, les températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion sont presque égales et semblent dépendre de la profondeur. Il s'agit de plans d'eau pas ou peu stratifiés en été. À partir d'une certaine profondeur, qui semble coïncider avec la profondeur critique de 6,4 m calculée par Kirillin et Shatwell (2016), la stratification s'intensifie : la température de l'hypolimnion diminue rapidement avec la profondeur, la différence de température entre épilimnion et hypolimnion augmente, et la thermocline descend. De plus, la température de l'épilimnion a tendance à diminuer avec la profondeur. Ces changements sont plus clairs pour les lacs naturels, mais semblent avoir lieu aussi pour les réservoirs. Enfin, pour les lacs naturels à partir d'une profondeur de 50-100 m, la dépendance de la profondeur disparaît et ces variables deviennent à peu près constantes.

3.3. Les gradients thermiques horizontaux

Les estimations de température superficielle obtenues à partir d'images satellite Landsat, montrent qu'il peut y avoir d'importants gradients thermiques spatiaux dans un plan d'eau (exemple Figure 9).

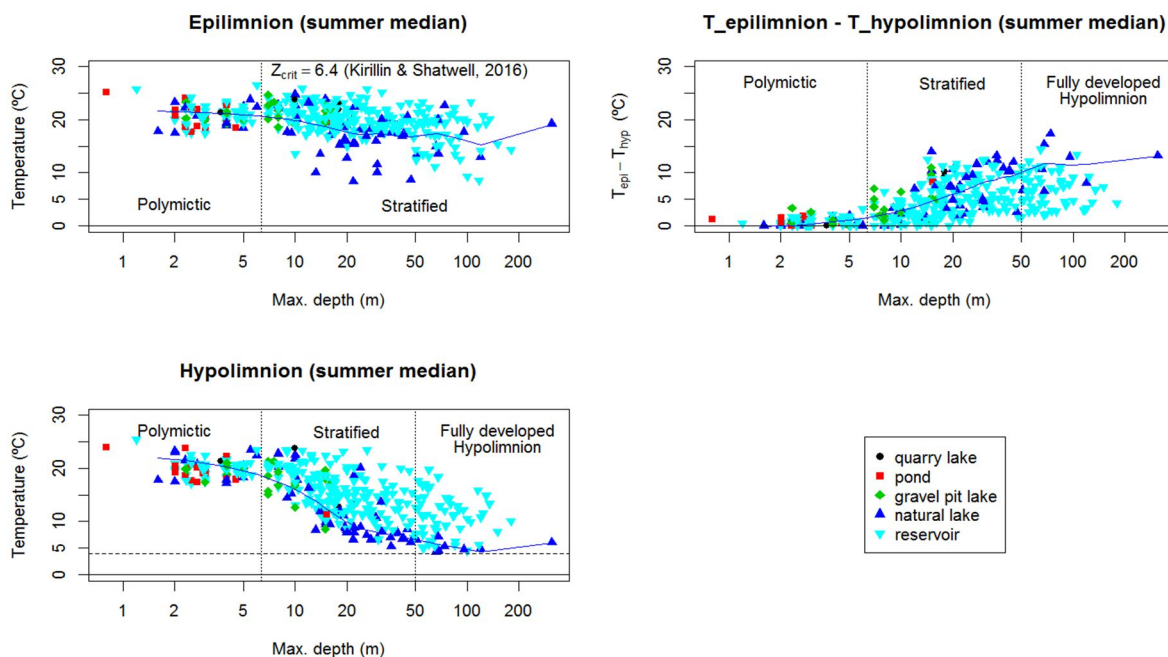


Figure 7 : Température de l'épilimnion, de l'hypolimnion et différence de températures entre épilimnion et hypolimnion en été. La ligne bleue indique le lissage LOWESS des données pour les lacs naturels.

Source des données : base de données *Plan_deau*.

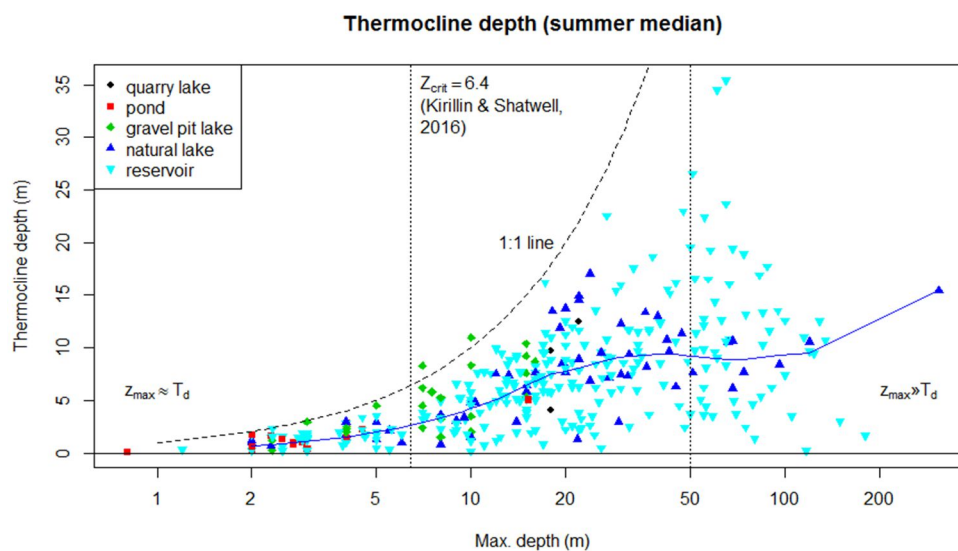


Figure 8 : Profondeur de la thermocline en été. La ligne bleue indique le lissage LOWESS des données pour les lacs naturels.

Source des données : base de données *Plan_deau*.

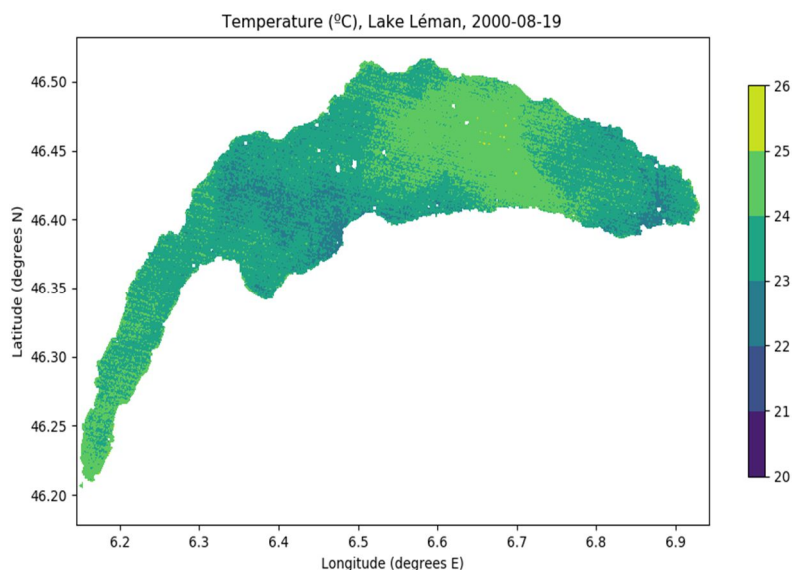


Figure 9 : Température de surface du Lac Léman le 19 août 2000.

Source des données : image Landsat traitée avec l'algorithme de Simon, Tormos et Danis, 2014.

Pour étudier comment la variabilité spatiale augmente avec la taille du plan d'eau, nous avons comparé la médiane de l'écart type de la température de surface par plan d'eau avec la profondeur, la surface et le volume du plan d'eau (Figure 10). La variabilité thermique spatiale est mieux corrélée avec la racine carrée de la surface, qui donne une estimation du fetch. L'écart type de la température augmente avec le fetch, de valeurs de l'écart type de 0,3 °C pour de petits fetchs (~500 m) à valeurs >0,6 °C pour de grands fetchs (>20 km).

Si on regarde la différence de température qui correspond à ces écarts types, on observe que l'ordre de grandeur de la variabilité spatiale des températures superficielles sur un plan d'eau est normalement inférieur à 2 °C pour de fetchs inférieurs à 3 km (Figure 11). Dans de grands plans d'eau comme le Léman, cette différence peut atteindre 6-7 °C.

Dans la simulation du comportement thermique des plans d'eau avec un modèle 1D il est souvent considéré qu'un RMSE de 2 °C est la limite supérieure pour une performance acceptable du modèle. Par contre, la Figure 11 montre que pour de plans d'eau avec fetch > 3 km la variabilité spatiale de la température est plus importante que l'erreur attendu du modèle. Cette variabilité est certainement due aux processus de mélange horizontaux par le vent, des ondes internes, l'entrée de tributaires... qui requièrent l'utilisation d'un modèle 2D ou 3D. Une détermination rigoureuse du type de modèle à utiliser doit être basée sur le calcul de nombres adimensionnels tels que le nombre de Rossby, le nombre de Froude pour les entrées/sorties, le nombre de Wedderburn et le nombre de Lac. Mais la valeur de fetch = 3000 m peut être utilisé comme un critère simple pour prendre cette décision.

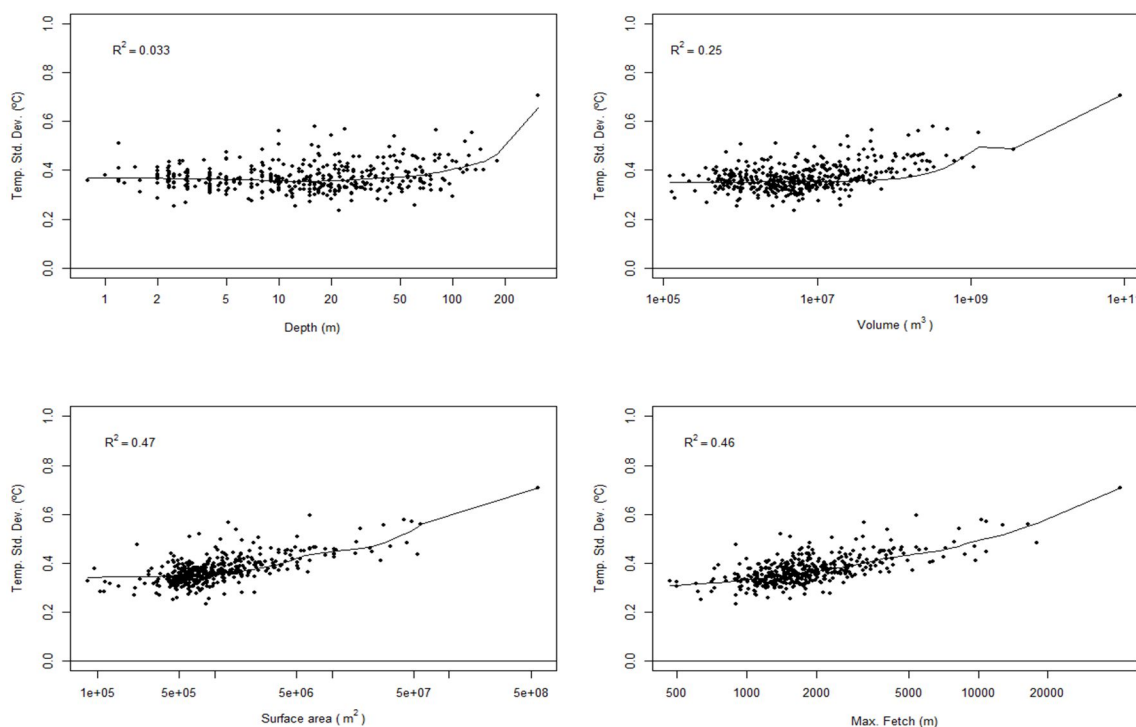


Figure 10 : Médiane de l'écart type de la température superficielle des plans d'eau DCE français.

Source des données : Jeu de données LakeSST (Prats et al., 2018a).

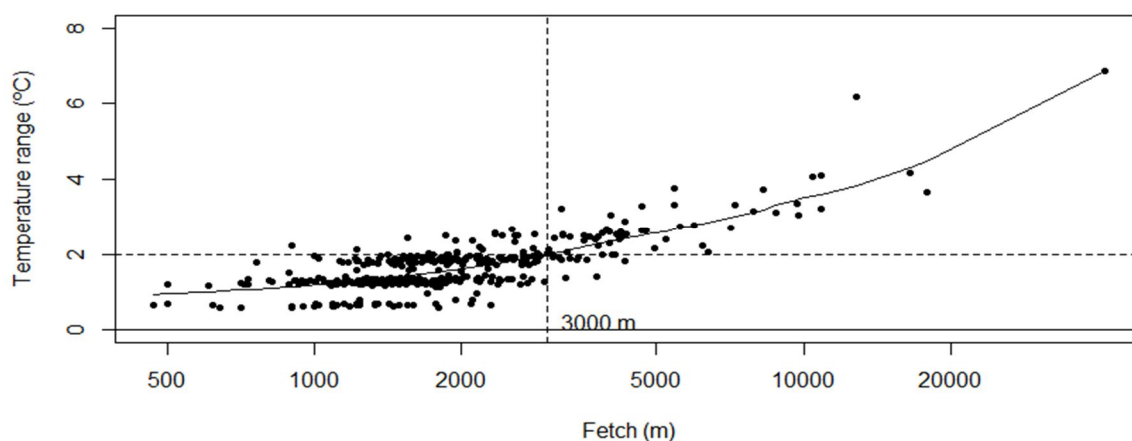


Figure 11 : Médiane d'amplitude de température de surface de chaque image de température superficielle des plans d'eau DCE français. Un point représente un seul plan d'eau.

Source des données : Jeu de données LakeSST (Prats et al., 2018a).

4. Le modèle GLM

Le modèle GLM (Hipsey, Bruce et Hamilton, 2014) est un modèle hydrodynamique qui simule la structure verticale de la température, la salinité et la densité des plans d'eau. Il est spécialement adapté à la simulation du comportement hydrodynamique de plans d'eau naturels ou artificiels. GLM prend en compte les échanges superficiels de chaleur, l'effet des affluents et des effluents, et les principaux processus de diffusion et de mélange. Le modèle offre différentes options de personnalisation et/ou de

complexification du modèle comme un module pour calculer l'englacement et un couplage aux modèles biogéochimiques basés sur la librairie AED, Aquatic EcoDynamics (Hipsey, Bruce et Hamilton, 2013). La version de GLM utilisée ici est la version 2.2, parue en 2016. Le modèle est toujours en cours de développement et d'amélioration et la version 3.0beta a été mise à disposition des utilisateurs en 2018. Bien qu'il soit relativement récent, GLM a été déjà utilisé dans plusieurs études démontrant une bonne performance (Read et al., 2014; Rose, Winslow, Read et Hansen, 2016; Snortheim et al., 2017; Yao et al., 2014; Bruce et al., 2018).

Une des limitations de la version 2.2 de GLM est l'utilisation d'une valeur constante du coefficient d'extinction de la lumière, ce qui limite sa performance à cause de la sensibilité du comportement hydrodynamique lacustre à cette variable (Heiskanen et al., 2015; Henderson-Sellers, 1988; Rose et al., 2016). Pour surmonter cette limitation, nous avons réalisé une modification de GLM à partir du code source pour lui permettre d'utiliser une chronique journalière du coefficient d'extinction de la lumière. De plus, nous avons modifié GLM pour corriger des bugs qui ont été rencontrés. Voir le rapport de Prats Rodríguez et Danis (2016) pour plus de détails.

Le code source de GLM v. 2.2 a été importé en juin 2016. Les modifications postérieures au code ont été développées sur le gitlab d'Irstea (<https://gitlab.irstea.fr>). GLM a été compilé avec les compilateurs d'Intel ifort et icc sur le cluster HIICS (Horizon Intensif Irstea pour le Calcul Scientifique) de Montpellier.

4.1. Configuration de GLM

Les principales options de configuration sont :

- ▶ La période de simulation est comprise entre le 1 janvier 1970 (start = '1970-01-01 00:00:00') et le 31 décembre 2015 (stop = '2015-12-31 23:00:00'), avec un pas de temps d'une heure (dt = 3600).
- ▶ L'épaisseur minimale de couche est fixée à 0,5 m (min_layer_thick = 0.500) et l'épaisseur maximale de couche est fixée à 3 m (max_layer_thick = 3.000). Le nombre maximale de couches était égale à la partie entière de la division de la profondeur maximale entre l'épaisseur minimale de couche plus cinq. L'ajout de cinq couches a été fait pour éviter des problèmes quand le niveau d'eau était très haut.
- ▶ L'albédo de l'eau à la radiation solaire a été calculé avec l'approximation journalière de Patten, Egloff et Richardson (1975) (albedo_mode = 1).
- ▶ Le rayonnement atmosphérique est donné par le fichier de forçage (lw_type = "LW_IN").
- ▶ L'option pour la correction de la stabilité atmosphérique non-neutre n'a pas été activée (atm_stab = .false.).

4.2. Spécification de la bathymétrie

La bathymétrie de la plupart des plans d'eau étudiés n'est pas disponible. La bathymétrie a donc été estimée à partir des équations proposées par Johansson et al. (2007) à partir des données de profondeur (z_{max} , m), surface (S_{max} , m²) et volume (V_{max} , m³) maximales et le paramètre de développement de volume (V_d), calculé comme $V_d = 3V_{max} / (S_{max} z_{max})$. Quand V_d est compris entre 0,20 et 2,70, la surface du plan d'eau en fonction de la profondeur est estimée comme

$$S(z) = S_{max} \left(\frac{H_d^{-z/z_{max}} - H_d^{-1}}{1 - H_d^{-1}} \right)^2$$

où

$$H_d(b) = \begin{cases} 10^{1,6b^4 - 2,1b^3 - 1,2b^2 - 3,92b} & 0,20 \leq V_d \leq 0,55 \\ 10^{-34b^5 - 18b^4 - 6,3b^3 - 1,9b^2 - 4b} & 0,55 \leq V_d \leq 1,85 \\ 10^{-19261b^5 + 27179b^4 - 15506b^3 + 4432,6b^2 - 639,51b + 36,442} & 1,85 \leq V_d \leq 2,40 \\ 10^{-3077645b^5 + 6028981b^4 - 4728714,5b^3 + 1855729,6b^2 - 364329,44b + 2861,94} & 2,40 \leq V_d \leq 2,70 \end{cases}$$

avec $b = \log(V_d)$. En dehors de cette gamme de valeurs de V_d la bathymétrie est estimée avec la formule :

$$S(z) = S_{\max} \left[(1 - z') (1 + z' \sin \sqrt{z'}) \right]^{f(V_d)} \quad \text{où } z' = z/z_{\max} \quad \text{et } f(V_d) = 1,7V_d^{-1} + 2,5 - 2,4V_d + 0,23V_d^3 .$$

4.3. Données de forçage

4.3.1. Données météorologiques

Les données météorologiques de forçage utilisées sont celles du réanalyse SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) (Quintana-Seguí et al., 2008; Vidal, Martin, Franchistéguy, Baillon et Soubeyroux, 2010). Les données SAFRAN couvrent toute la France métropolitaine avec une grille régulière de 8 km par 8 km depuis le 1 août 1958. Une correction adiabatique de $-0,0065$ °C/m a été appliquée à la température de l'air pour corriger l'effet de la différence altitudinale entre le plan d'eau et la grille SAFRAN la plus proche.

4.3.2. Débits d'entrée

Les débits d'entrée utilisés sont ceux de la dernière version du modèle Loieau. Le débit total d'entrée est estimé à partir des résultats du modèle Loieau et est réparti entre les tributaires permanents de chaque plan d'eau et un tributaire « fictif » qui recueille les contributions des tributaires non-permanents. Le débit total est distribué entre les différents tributaires proportionnellement à la surface des sous-bassins-versants respectifs. Le tributaire « fictif » a une surface équivalente à celle du bassin versant du plan d'eau moins les surfaces des sous-bassins des tributaires permanents.

4.3.3. Température de l'eau des tributaires

La température des tributaires peut avoir un effet important sur le comportement thermique et hydrodynamique d'un plan d'eau Råman Vinnå et al. (2018). Des différentes méthodes testées (Prats-Rodríguez et Danis, 2016, 2017), celle qui a été retenue la plus appropriée pour cette étude est l'utilisation d'une fonction logistique de la température de l'eau des tributaires (T_e , °C) en fonction de la

température de l'air, suivant Mohseni et al. (1998) :

$$T_e = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + \exp[\gamma(\beta - T_a)]}$$

où T_a est la température de l'air (°C) et α (°C), β (°C), γ (°C⁻¹), μ (°C) sont des paramètres de calage. Les valeurs des paramètres ont été calées à partir des données du Réseau National de suivi des Températures des cours d'eau comme (Prats Rodríguez & Danis, 2017) :

$$\alpha = 20,86$$

$$\beta = 12,7065 - 0,0045 Alt$$

$$\gamma = 0,1968$$

$$\mu = 3,512$$

où Alt est l'altitude (m).

4.3.4. Débits de sortie

Pour les retenues, on a supposé que l'extraction d'eau a lieu par le fond du barrage et que le débit de sortie est égal au débit d'entrée. Pour les autres types de plans d'eau, on suppose que l'eau sort par déversement et on n'impose pas les débits de sortie, qui sont calculés par GLM.

4.3.5. Transparence

On a calculé le coefficient d'extinction de la lumière (η , m⁻¹) à partir des mesures du disque de Secchi

(DS, m) comme : $\eta = 1,7/DS$.

La transparence de l'eau varie le long de l'année. Les tests faits avec de sites pilotes bien suivis a montré que l'utilisation d'une transparence variable n'a pas un très grande effet sur les simulations (Prats-Rodríguez et Danis, 2016) : l'estimation de la température de l'épilimnion et de l'hypolimnion n'est pas affectée et la profondeur de la thermocline est affecté seulement en certains années. Donnée la rareté des données on a utilisé une valeur constante de transparence, la moyenne des estimations de transparence obtenues à partir des mesures du disque de Secchi de la base Plan_deau. Pour les plans d'eau où il n'y avait pas de mesures du disque de Secchi, cette valeur a été estimée comme (Roubeix et Danis, 2016, Prats-Rodríguez et Danis, 2017) : $DS = 10^{-0,11103 + 0,54833 \log(V_{max}/S_{max})}$

4.3.6. Conditions initiales

En générale, la température initiale est supposée homogène et égale à :

$$T_{D\acute{e}c-Jan} = 26,1 - 0,49Lat - 0,0030Alt + 0,21 \log(V_{max}) + 0,0091z_{max}$$

où Lat est la latitude (degrés Nord) et $T_{D\acute{e}c-Jan}$ est la température moyenne des mois de décembre et janvier. Cette relation a été obtenue à partir des mesures de la température de surface par satellite (Prats & Danis, en presse).

Quand la température prédite par cette équation est inférieure à 0 °C, on suppose que la température de la couche de surface est 0 °C et que la température des couches inférieures est 4 °C.

4.4. Indicateurs thermiques

Pour caractériser le comportement thermique des plans d'eau à partir des simulations du modèle GLM, un total de 63 indicateurs thermiques, classifiés en quatre groupes, ont été calculés. On a calculé la température de l'épilimnion, la température de l'hypolimnion, la température de la colonne d'eau et la profondeur de la thermocline en utilisant le package rLakeAnalyzer pour R (Winslow et al., 2016).

4.4.1. Indicateurs annuels

1. Somme annuelle cumulée des températures moyennes journalières au-dessus de la température

$$DJ = \sum_{i: T_{epi,i} > 12} T_{epi,i} - 12$$

de base de 12 °C à l'épilimnion (degrés-jours) :

2. Jour de l'année où la température de l'épilimnion est maximale.
3. Jour de l'année où la température de l'épilimnion est minimale.
4. Jour de l'année où la température de l'hypolimnion est maximale.
5. Jour de l'année où la température de l'hypolimnion est minimale.
6. Jour de l'année où la température moyenne de la colonne d'eau est maximale.
7. Jour de l'année où la température moyenne de la colonne d'eau est minimale.
8. Température maximale annuelle de la colonne d'eau (°C).
9. Température moyenne annuelle de la colonne d'eau (°C).
10. Température minimale annuelle de la colonne d'eau (°C).
11. Température maximale annuelle de l'épilimnion (°C).
12. Température moyenne annuelle de l'épilimnion (°C).
13. Température minimale annuelle de l'épilimnion (°C).
14. Température maximale annuelle de l'hypolimnion (°C).

15. Température moyenne annuelle de l'hypolimnion (°C).
16. Température minimale annuelle de l'hypolimnion (°C).

4.4.2. Indicateurs saisonniers

17. Différence de température (°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Tepi – Thyp) en été (Juil. – Aout – Sept.).
18. Différence de température (°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Tepi – Thyp) en hiver (Jan. – Feb. – Mar.).
19. Ratio de températures (°C/°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Thyp/Tepi) en été (Juil. – Aout – Sept.).
20. Ratio de températures (°C/°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Thyp/Tepi) en hiver (Jan. – Feb. – Mar.).
21. Température moyenne de la colonne d'eau (°C) au printemps (Avr. – Mai – Juin).
22. Température moyenne de la colonne d'eau (°C) en été (Juil. – Aout – Sept.).
23. Température moyenne de la colonne d'eau (°C) à l'automne (Oct. – Nov. – Déc.).
24. Température moyenne de la colonne d'eau (°C) en hiver (Jan. – Feb. – Mar.).
25. Température moyenne de l'épilimnion (°C) au printemps (Avr. – Mai – Juin).
26. Température moyenne de l'épilimnion (°C) en été (Juil. – Aout – Sept.).
27. Température moyenne de l'épilimnion à l'automne (Oct. – Nov. – Déc.).
28. Température moyenne de l'épilimnion (°C) en hiver (Jan. – Feb. – Mar.).
29. Température moyenne de l'hypolimnion (°C) au printemps (Avr. – Mai – Juin).
30. Température moyenne de l'hypolimnion (°C) en été (Juil. – Aout – Sept.).
31. Température moyenne de l'hypolimnion (°C) à l'automne (Oct. – Nov. – Déc.).
32. Température moyenne de l'hypolimnion (°C) en hiver (Jan. – Feb. – Mar.).

4.4.3. Indicateurs sur la stratification

33. Numéro de jours dans l'année pour lesquels la température de l'épilimnion est supérieure à 4 °C.
34. Numéro de jours par année avec englacement.
35. Durée en jours de la période d'englacement la plus longue.
36. Jour de l'année de début de la période d'englacement la plus longue.
37. Jour de l'année de fin de la période d'englacement la plus longue.
38. Numéro de jours avec stratification inverse.
39. Durée en jours de la période de stratification inverse la plus longue.
40. Jour de l'année de début de la période de stratification inverse la plus longue.
41. Jour de l'année de fin de la période de stratification inverse la plus longue.
42. Différence de température (°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Tepi – Thyp) pendant la période la plus longue de stratification inverse.
43. Ratio de températures (°C/°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Thyp/Tepi) pendant la période de stratification inverse la plus longue.
44. Numéro de jours dans l'année sans aucun type de stratification.
45. Numéro de mélanges dans l'année.

46. Numéro de jours dans l'année avec stratification directe.
47. Durée en jours de la période de stratification directe la plus longue.
48. Jour de l'année de fin de la période de stratification directe la plus longue.
49. Jour de l'année de début de la période de stratification directe la plus longue.
50. Différence de température (°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Tepi – Thyph) pendant la période de stratification directe la plus longue.
51. Ratio de températures (°C/°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Thyp/Tepi) pendant la période de stratification directe la plus longue.
52. Profondeur de la thermocline au jour 60 de l'année.
53. Profondeur de la thermocline au jour 120 de l'année.
54. Profondeur de la thermocline au jour 180 de l'année.
55. Profondeur de la thermocline au jour 240 de l'année.
56. Profondeur de la thermocline au jour 300 de l'année.
57. Profondeur de la thermocline au jour 360 de l'année.

4.4.4. Indicateurs hebdomadaires

58. Semaine de l'année avec la température de la colonne d'eau la plus basse.
59. Semaine de l'année avec la température de la colonne d'eau la plus haute.
60. Différence de température (°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Tepi – Thyph) pendant la semaine la plus froide de l'année.
61. Différence de température (°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Tepi – Thyph) pendant la semaine la plus chaude.
62. Ratio de températures (°C/°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Thyp/Tepi) pendant la semaine la plus froide.
63. Ratio de températures (°C/°C) entre l'épilimnion et l'hypolimnion (Thyp/Tepi) pendant la semaine la plus chaude de l'année.

5. Cas d'étude

Pour cette étude, deux ensembles de simulations ont été réalisées : 1) des simulations avec des conditions de base pour évaluer la qualité des simulations, et 2) des simulations sous conditions de référence, objectif de l'étude. Les simulations ont été réalisées pour un total de 188 plans d'eau.

5.1. Cas de base

Bien que la qualité des simulations de la température des plans d'eau français ait été évalué dans le rapport de Prats Rodríguez et Danis (2017), une nouvelle évaluation est nécessaire à cause de :

- ▶ L'utilisation des nouvelles données Loieau, qui n'étaient pas disponibles dans le précédent rapport et qui ont permis de réaliser des simulations jusqu'à 2015 au lieu de 2008.
- ▶ Estimation de la bathymétrie en fonction du développement de volume en dehors du rang $0,20 \leq V_d \leq 2,70$, ce qui permet d'augmenter le nombre des plans d'eau simulés.
- ▶ La modification de l'estimation de la température initiale.

Dans le cas de base a été utilisée une valeur constante de transparence égale à la moyenne des estimations de transparence obtenues à partir des mesures du disque de Secchi disponibles dans la

base PLAN_DEAU. Pour les plans d'eau où il n'y avait pas de mesures du disque de Secchi disponibles, nous avons estimé la profondeur du disque de Secchi à partir de la régression :

$$DS = 10^{-0.11103+0.54833\log(V_{\max}/S_{\max})}$$

dérivée à partir des données extraites de la base PLAN_DEAU d'après Roubeix et Danis (2016).

La performance du modèle GLM a été évaluée en comparant les résultats des simulations à deux types de mesures de la température de l'eau : des profils mesurés du réseau RCS-RCO et des mesures de température superficielle du jeu de données LakeSST. D'un côté, les profils thermiques mesurés par le Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) et le Réseau de Contrôle Opérationnel (RCO) ont été utilisés pour évaluer le comportement du modèle dans la dimension verticale. À ce jour, ces réseaux ont suivis plus de 85% des plans d'eau DCE. Ces suivis sont principalement à la charge des agences de bassin et d'établissements publics gestionnaires de plans d'eau (e.g. EPTB Loire pour les retenues de Naussac et de Villerest). Théoriquement, ces plans d'eau sont suivis pendant au moins deux ans par plan de gestion de six ans par, entre autre, a minima 4 profils de température/oxygène. De l'autre côté, les mesures de température superficielle du jeu de données LakeSST (Prats et al., 2018a) ont été utilisées pour évaluer la qualité des estimations de la température de l'épilimnion et de la dynamique temporelle des simulations à l'échelle pluriannuelle. Cette base de données a été développée à partir d'images thermiques des satellites Landsat-5 et Landsat-7 pour les plans DCE français pour la période 1999-2016. Les corrections proposées dans Prats et al. (2018a) ont été appliquées pour débiaiser les mesures satellitaires.

5.2. Conditions de référence et seuils de qualité

Les conditions de référence sont associées à l'absence totale ou presque totale de perturbation d'origine anthropique. En particulier, pour les lacs, « la transparence et la température n'indiquent pas de signes de perturbation anthropogénique et restent dans la fourchette normalement associée aux conditions non perturbées » (DCE, Annexe V). Pour les masses d'eaux fortement modifiées ou artificielles (réservoirs, gravières, etc.), la température correspond à celle « des types de masse d'eau de surface les plus comparables dans de conditions non perturbées » (DCE, Annexe V).

La température d'un plan d'eau peut être modifiée par différentes causes :

- ▶ Une augmentation de la quantité de nutriments qui arrivent dans un plan d'eau fait augmenter la biomasse de phytoplancton et diminue la transparence. Cette modification de la transparence peut avoir un effet important sur la stratification et la température de surface (Han et al., 2000 ; Heiskanen et al., 2015 ; Henderson-Sellers, 1988).
- ▶ La modification de la température des tributaires, l'existence de rejets thermiques ou l'utilisation des plans d'eau pour le refroidissement et le chauffage par pompes à chaleur peuvent avoir des effets sur le contenu de chaleur, la stratification et les phénomènes de mélange (Fink et al., 2014 ; Gaudard et al., 2018 ; Hunziker et Wüest, 2011 ; Kirillin et al., 2013 ; Râman Vinnâ et al., 2017 ; Râman Vinnâ et al., 2018).
- ▶ L'installation de panneaux photovoltaïques flottants réduit la quantité de radiation solaire qui pénètre dans la masse d'eau et peut réduire les températures de surface (Sahu et al., 2016).
- ▶ Les altérations sur l'hydrologie (extraction d'eau, variabilité perturbée des débits, existence de tributaires artificiels) influencent les phénomènes de mélange et le niveau d'eau, et donc la température et la stratification (Fink et al., 2016 ; Marcé et al., 2010 ; Moreno-Ostos et al., 2008 ; Rimmer et al., 2011 ; Wang et al., 2012).
- ▶ La profondeur de l'exutoire et le volume d'eau extraite affectent la profondeur de la thermocline et la structure thermique verticale (He et al., 2017 ; Howington, 1990 ; Ma et al., 2008 ; Prats et Danis, 2015a).
- ▶ Le changement climatique produit une augmentation de la température de l'eau, l'intensification et le rallongement de la stratification estivale, et une diminution des périodes d'englacement (Danis et al., 2004 ; Livingstone, 2003 ; O'Reilly et al., 2015 ; Prats et Danis, 2015a ; Woolway et al., 2017).

Pour déterminer les conditions de référence, il est supposé, pour les simulations, qu'il n'y a pas de modification de la température des entrées, pas de rejets thermiques, pas d'utilisation de systèmes de refroidissement ou de chauffage par pompes à chaleur, et pas d'installation de panneaux photovoltaïques. Par rapport aux débits, nous avons utilisé les simulations du modèle Loieau, qui correspondent à des simulations de débit sous l'actuelle occupation du sol, mais sans l'effet d'altération hydrologique produite par les barrages à l'amont.

Pour les masses d'eau fortement modifiées et artificielles, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes techniques obligatoires pour définir les conditions de référence. Pour les retenues, ces contraintes sont : l'obligation de maintenir un certain débit et ou une certaine hauteur de chute, les caractéristiques de marnage nécessaires pour l'exploitation du barrage, et le volume utilisable. De plus, la gestion des retenues doit éviter de détériorer la qualité de l'eau à l'aval. Ces contraintes complexes varient au cas par cas et déterminent la profondeur de l'exutoire et le volume d'eau extrait. Étant donnée l'absence de données suffisantes pour caractériser la gestion hydrologique des barrages, on a considéré un niveau constant et un exutoire au fond du barrage pour simuler les conditions de référence.

Le changement climatique et les changements d'utilisation du sol posent un problème pour la définition de conditions de référence, puisque la DCE est basée sur une hypothèse de conditions de référence stables (Bouleau et Pont, 2014 ; Bouleau et Pont, 2015). Une période de simulation assez longue (1970-2015) a donc été choisie pour évaluer l'ordre de grandeur des changements de température sur le long terme et leurs échelles temporelles de variation.

Pour déterminer les seuils de température associés à différents états de qualité de l'eau, on a utilisé la transparence comme proxy de la qualité de l'eau et on a réalisé des simulations pour différentes valeurs du coefficient d'extinction de la lumière η :

- Eau pure : $\eta = 0,0384 \text{ m}^{-1}$ (Lorenzen, 1972).
- Seuil Très Bon/Bon : Coefficient d'extinction de la lumière calculé selon le *Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)* (version de Mars 2016) pour ce seuil de qualité.
- Seuil Médiocre/Mauvais : Coefficient d'extinction de la lumière calculé selon le *Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)* (version de Mars 2016) pour ce seuil de qualité.
- Pire : Cas extrême de mauvaise qualité, avec $\eta = 15 \text{ m}^{-1}$, correspondant à une profondeur du disque de Secchi de ~11 cm. Pour comparaison, la valeur du coefficient d'extinction de la lumière la plus grande utilisée dans les simulations de base est $\eta = 17,4 \text{ m}^{-1}$, correspondant à une profondeur du disque de Secchi de ~10 cm. La différence n'est vraiment pas importante pour la modélisation, puisque dans les deux cas plus de 99,9% du rayonnement solaire incident est absorbé dans la première couche d'eau du modèle (épaisseur minimale ici de 0,5 m).

Avec ces quatre scénarios il est possible de déterminer les conditions thermiques extrêmes en fonction de la qualité de l'eau, ainsi que le seuil Très Bon/Bon et le seuil Médiocre/Mauvais. Le reste de seuils (Bon/Moyen, Moyen/Médiocre) sont définies à partir d'un espacement régulier entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais.

6. Résultats des simulations pour le cas de base

6.1. Validation avec des données in situ

L'erreur moyenne (ME) des simulations de la température moyenne de la colonne d'eau pour le cas de base varie entre -4,0 °C et 8,9 °C, avec une moyenne de 0,8 °C (Figure 12). L'erreur quadratique moyenne (RMSE) varie entre 0,8 °C et 9,1 °C, avec une moyenne de 2,5 °C. On observe qu'il y a des erreurs importantes dans un bon nombre des plans d'eau simulés.

Un certain d'erreur est attendu étant données les connaissances limitées de certaines variables :

- La température de l'eau est mal connue ;
- Les débits d'entrée et de sortie ne sont pas connus et sont estimés comme des débits sans régulation hydrique ;
- Les températures des affluents sont estimées ;
- Les conditions météorologiques correspondent à celles simulées par le modèle SAFRAN dans le point de grille le plus proche. Elles peuvent ne pas se correspondre aux conditions locales sur le plan d'eau à cause des conditions microclimatiques créées par le plan d'eau et surtout l'orographie ;
- La bathymétrie utilisée n'est pas réelle, mais est une idéalisation mathématique à partir du volume, surface et profondeur maximales du plan d'eau ;
- Le coefficient d'extinction de la lumière utilisé est constant, alors qu'il varie dans le temps.

Par contre, d'après les simulations individualisées réalisées avec des plans d'eau bien suivis (Prats et Danis, 2016), l'effet de ses limitations ne suffit pas à expliquer les grands marges d'erreur observés.

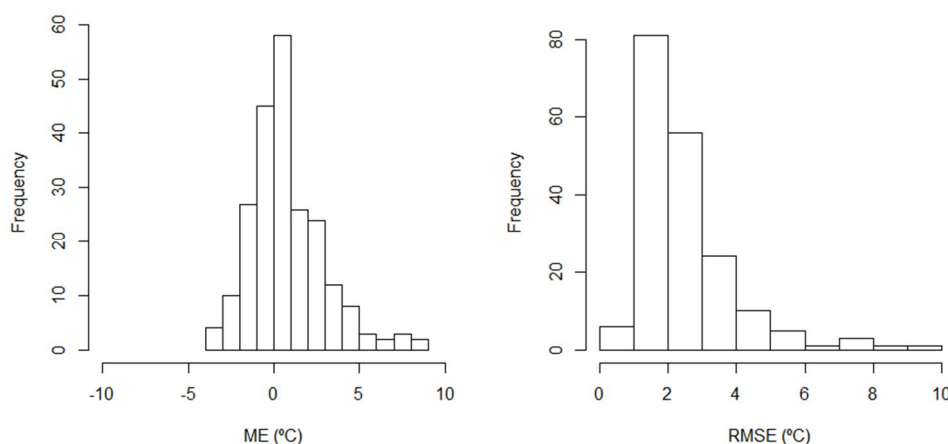


Figure 12 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température moyenne de la colonne d'eau simulée avec GLM pour le cas de base.

En effet, la principale source d'erreur est la profondeur de la sortie d'eau et la gestion hydraulique, comme le montre la comparaison des performances de GLM entre les retenues et le reste des plans d'eau (Figure 13). Pour les plans d'eau qui ne sont pas des retenues, la ME moyenne est de 0,7 °C, et le premier et troisième quartile sont -0,9 °C et 0,9 °C, respectivement ; la RMSE moyenne est 2,5 °C, et Q1 = 1,5 °C et Q3 = 2,4 °C. Ces résultats sont plus en accord avec la qualité espérée des simulations, excepté pour quelques plans d'eau d'altitude, le lac d'Allos (ALL04, 2232 m) et le Lac Bleu (BLE65, 1947 m). Une simulation avec les débits réduits d'un facteur de 1000, donne des erreurs beaucoup moins importantes (ME ~ 1°C) pour ces deux lacs, ce qui semble indiquer qu'il y a des problèmes dans la spécification des caractéristiques des tributaires, débits et/ou température. En effet, les erreurs les plus importantes du modèle de température des tributaires ont lieu pendant l'hiver et l'été ; et les températures d'hiver des tributaires de ces deux lacs semblent trop élevées. On observe que l'erreur augmente avec l'altitude, spécialement au-dessus de 1000 m. Pour les plans d'eau à une altitude de moins de 1000 m, la ME moyenne est 0,0 °C et la RMSE moyenne est 1,8 °C.

Par contre, les simulations des retenues présentent des erreurs beaucoup plus importantes en général et ces erreurs augmentent aussi avec l'altitude (Figure 13). Pour des réservoirs à basse altitude (< 250 m), le modèle n'est pas biaisée (ME moyenne = -0,1 °C), mais il tend à surestimer (ME moyenne = 1,8 °C) la température des plans d'eau à des altitudes supérieures (> 250 m). L'erreur des simulations pour les retenues, comme pour les autres types de plans d'eau, augmente plus

rapidement à partir de 1000 m d'altitude. La RMSE moyenne des réservoirs pour des altitudes au-dessous de 1000 m est 3,4 °C ; et des de 6,0 °C pour des altitudes au-dessus de 1000 m.

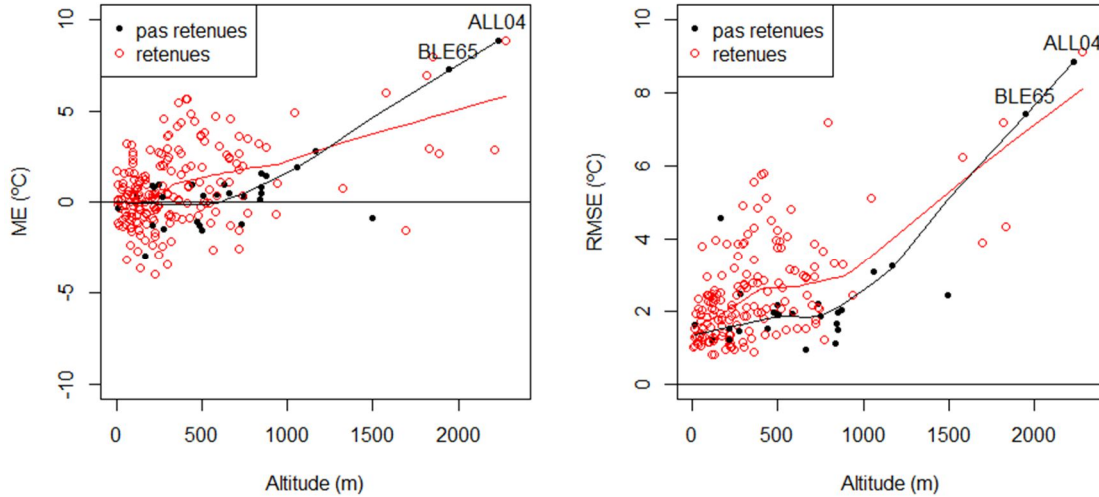


Figure 13 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température moyenne de la colonne d'eau simulée avec GLM pour le cas de base, pour les plans d'eau de type retenue et pour le reste de types de plan d'eau.

En général, le modèle surestime la température de l'épilimnion (ME moyenne = 2,0 °C) et n'est pas biaisé pour la température de l'hypolimnion (ME moyenne = 0,3 °C) (Figure 14). Le coefficient de corrélation entre les simulations et les données mesurées est élevé, en particulier pour l'épilimnion. La simulation de la température de l'hypolimnion pose plus de difficultés, ce qui se traduit par un coefficient de corrélation plus bas (r moyen = 0,84 pour l'hypolimnion et r moyen = 0,93 pour l'épilimnion), bien que la RMSE est similaire pour les deux couches (RMSE moyenne = 2,9 °C pour l'hypolimnion et RMSE moyenne = 3,0 °C pour l'épilimnion).

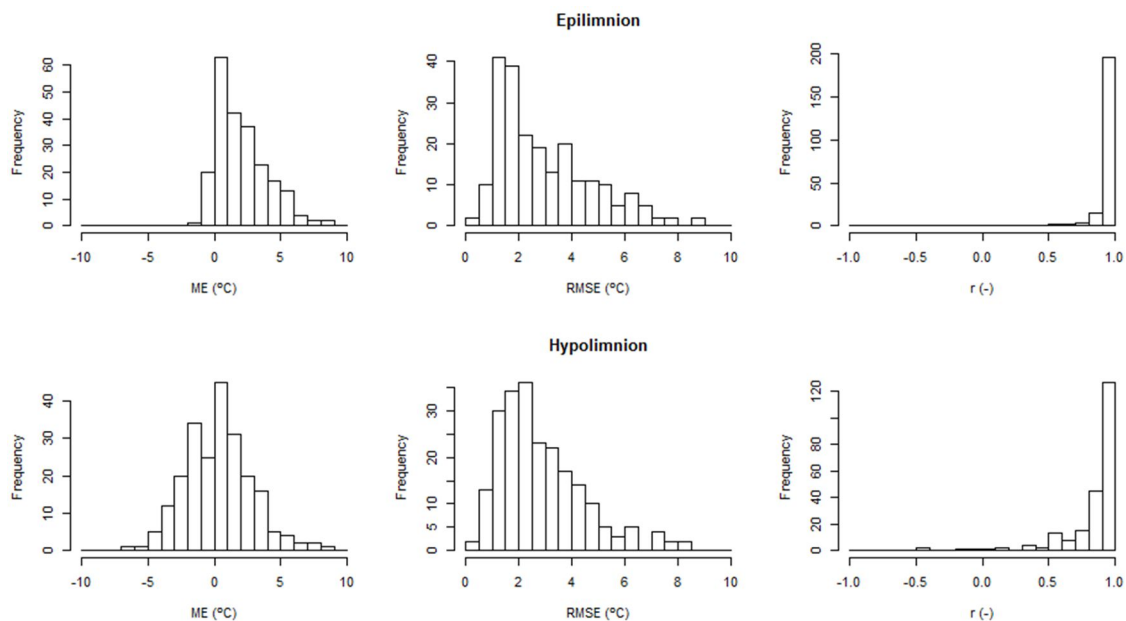


Figure 14 : Erreur moyenne (ME), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation de la température de l'épilimnion et de l'hypolimnion simulées avec GLM pour le cas de base.

Pour la température de l'épilimnion, il n'y a pas de différences de performance entre les réservoirs et les autres types de plans d'eau, mais on peut observer une tendance à l'augmentation de l'erreur avec la profondeur du plan d'eau (Figure 15). Pour la température de l'hypolimnion il n'y a pas une forte relation entre la RMSE et la profondeur, mais les erreurs sont plus importantes pour les réservoirs que pour les autres types de plan d'eau. Ce qui confirme l'hypothèse que les différences de performance pour les réservoirs sont causées par une mauvaise localisation de la profondeur de sortie pour une grande partie des barrages. La profondeur de sortie influence l'intensité de la stratification et la profondeur de la thermocline, ce qui résulte en une grande variabilité de la structure verticale de la colonne d'eau, comme montre la Figure 15. Ces résultats montrent la nécessité de bien prendre en compte la profondeur d'extraction de l'eau et la gestion hydraulique pour la simulation du comportement thermique des retenues. D'ailleurs, on retrouve la tendance à une augmentation de l'erreur avec l'altitude, spécialement pour les lacs naturels. Ceci est cohérent avec une température des tributaires en hiver trop élevée.

6.2. Validation avec des données satellitaires

Les résultats observés pour la validation de la température de l'épilimnion avec des données in situ (Figure 15) sont cohérents avec les résultats de la validation avec des données satellite (Figure 16). La tendance à l'augmentation de l'erreur avec la profondeur et l'altitude du plan d'eau est toujours présente.

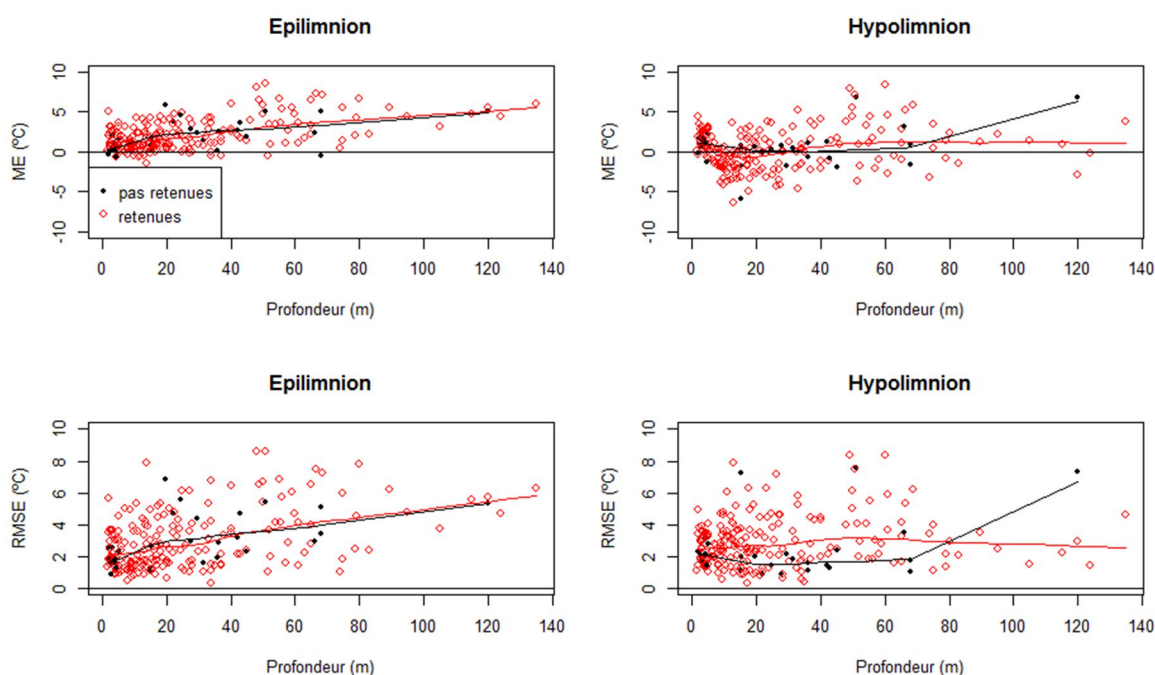


Figure 15 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température de l'épilimnion et de l'hypolimnion simulées avec GLM pour le cas de base par type de plan d'eau.

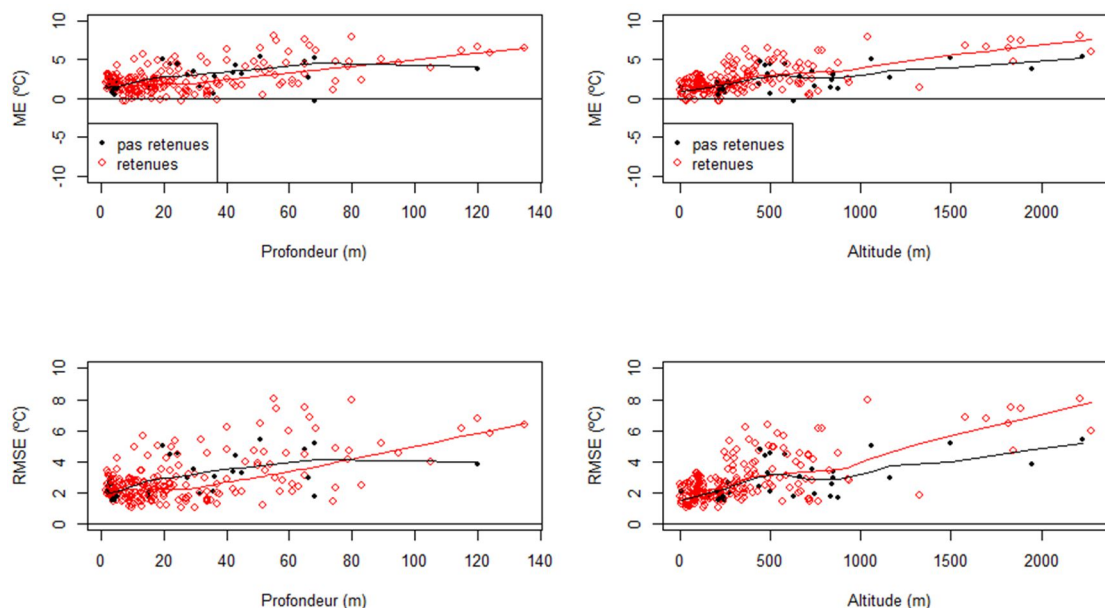


Figure 16 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température de l'épilimnion simulée avec GLM pour le cas de base par type de plan d'eau. Validation avec des données satellite.

6.3. Comportement des indicateurs de température sur le long terme

On analyse ici le comportement des indicateurs de température sur le long terme pour les 87 plans d'eau avec une bonne qualité des simulations ($RMSE \leq 2^\circ C$).

Les simulations sur la période 1970-2015 montrent une tendance à l'augmentation de la température de la colonne d'eau, de l'épilimnion et de l'hypolimnion (Figure 17), et du nombre de degrés-jours (Figure 18). L'augmentation de la température a lieu principalement entre 1980 et 1995 d'après les simulations. Par contre, dans les périodes 1970-1980 et 1995-2015 les tendances simulées sont peu importantes.

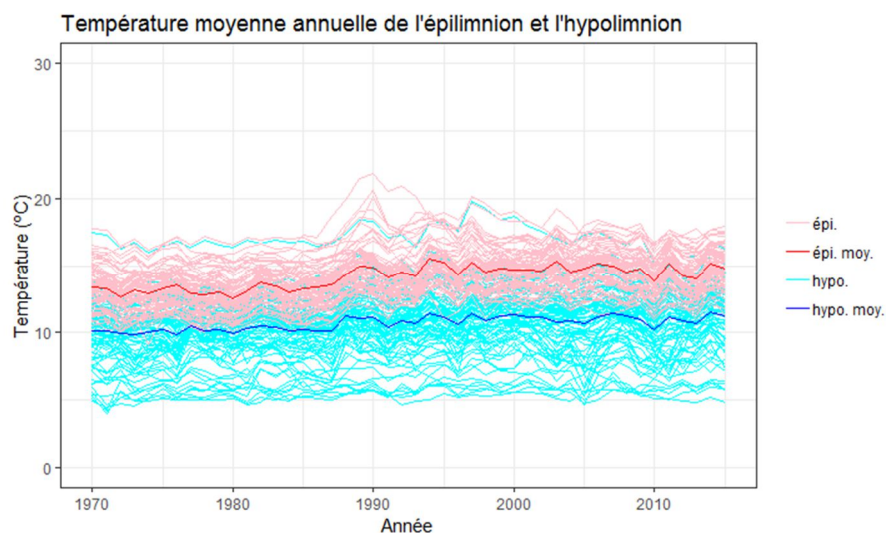


Figure 17 :
Température
moyenne
annuelle de
l'épilimnion et
de
l'hypolimnion
des plans
d'eau français
d'après les
simulations de
base avec
GLM (87 plans
d'eau avec
 $RMSE \leq 2^\circ C$).

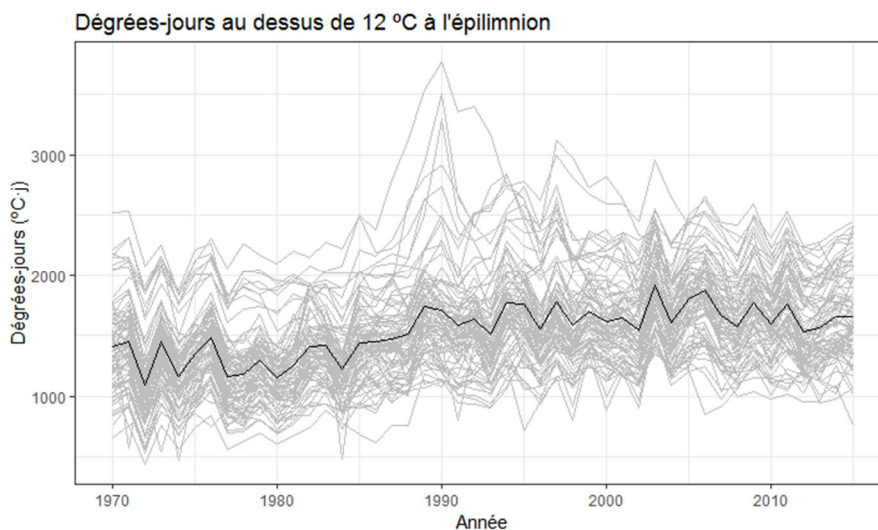


Figure 18 : Degrées-jours au-dessus de 12 °C des plans d'eau français d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec RMSE \leq 2 °C). La ligne noire représente la moyenne pour l'ensemble de plans d'eau.

Ces tendances sont observables pendant toute l'année et dans les différentes saisons de l'année (Figure 19). Mais l'intensité de la stratification estivale ne semble pas augmenter avec le temps (Figure 20). Ceci peut être dû à l'augmentation en parallèle de la température de l'épilimnion et de la température de l'hypolimnion (Figure 17).

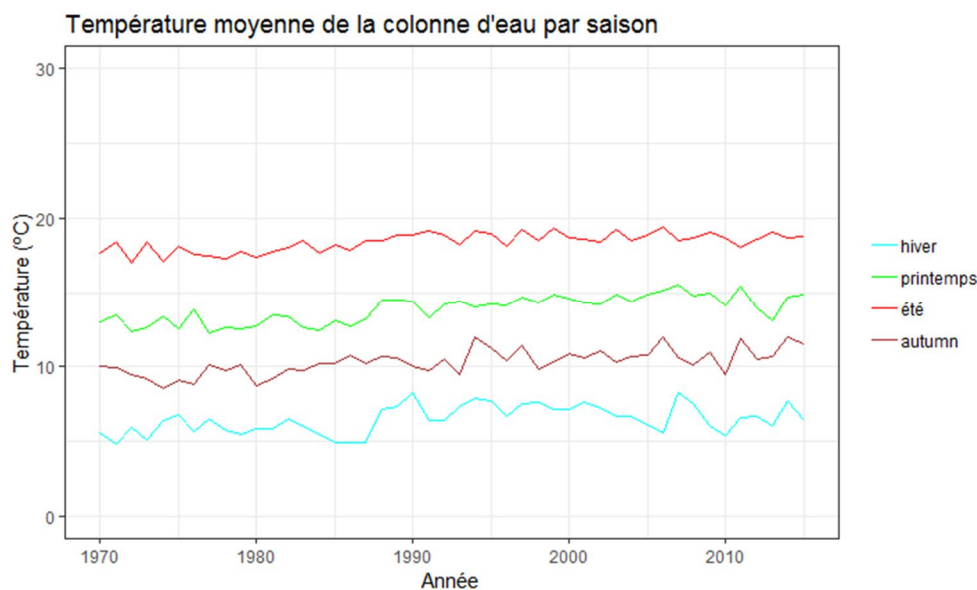


Figure 19 : Température moyenne de la colonne d'eau des plans d'eau français par saison d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec RMSE \leq 2 °C).

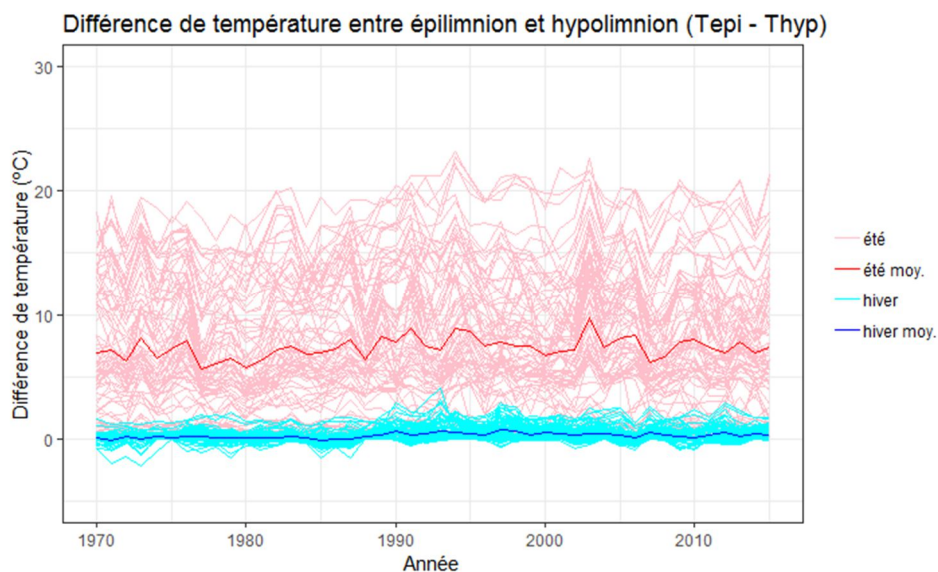


Figure 20 : Différence de température entre l'épilimnion et l'hypolimnion des plans d'eau français pendant les semaines la plus chaude et la plus froide, d'après les simulations de base avec GLM (68 plans d'eau avec RMSE ≤ 2 °C).

Par contre, il y a clairement un effet sur la stratification : le nombre de jours avec stratification estivale augmente (0,85 j/a, p -valeur $< 0,001$) alors que le nombre de jours sans stratification diminue (-0,84 j/a, p -valeur $< 0,001$) (Figure 21). En effet la stratification estivale tend à commencer plus tôt (-0,4 j/a, p -valeur = 0,005) et finir plus tard (0,23 j/a, p -valeur = 0,013). Par contre, la profondeur de la thermocline ne montre pas de tendances (voir par exemple les résultats pour le jour 240) (Figure 22).

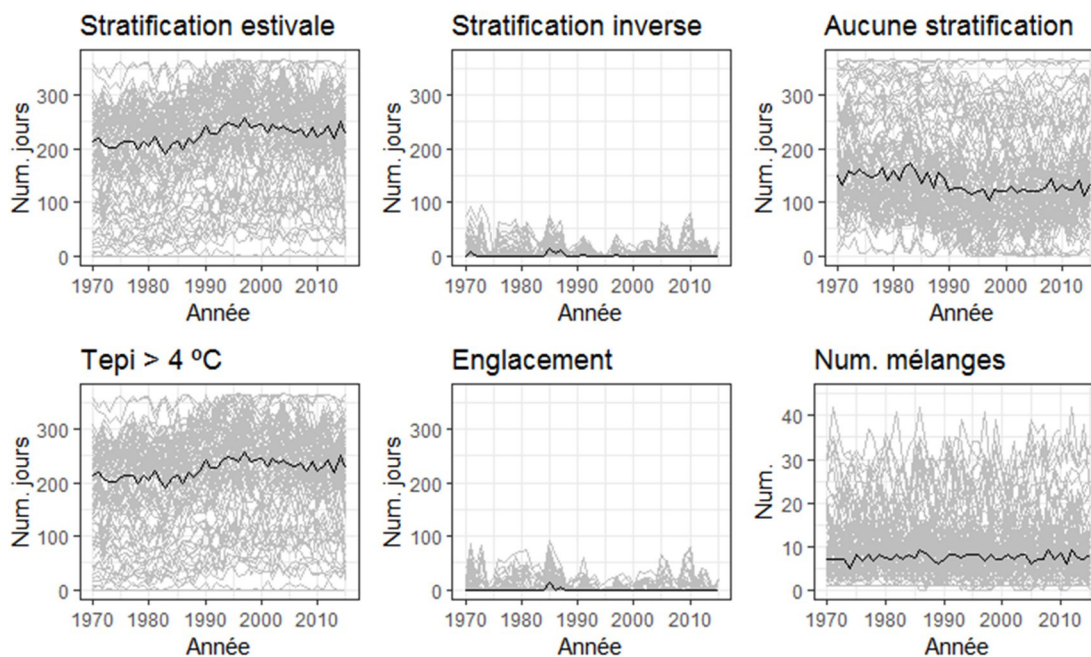


Figure 21 : Indicateurs de stratification des plans d'eau français, d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec RMSE ≤ 2 °C). La ligne noire représente la moyenne pour l'ensemble de plans d'eau.

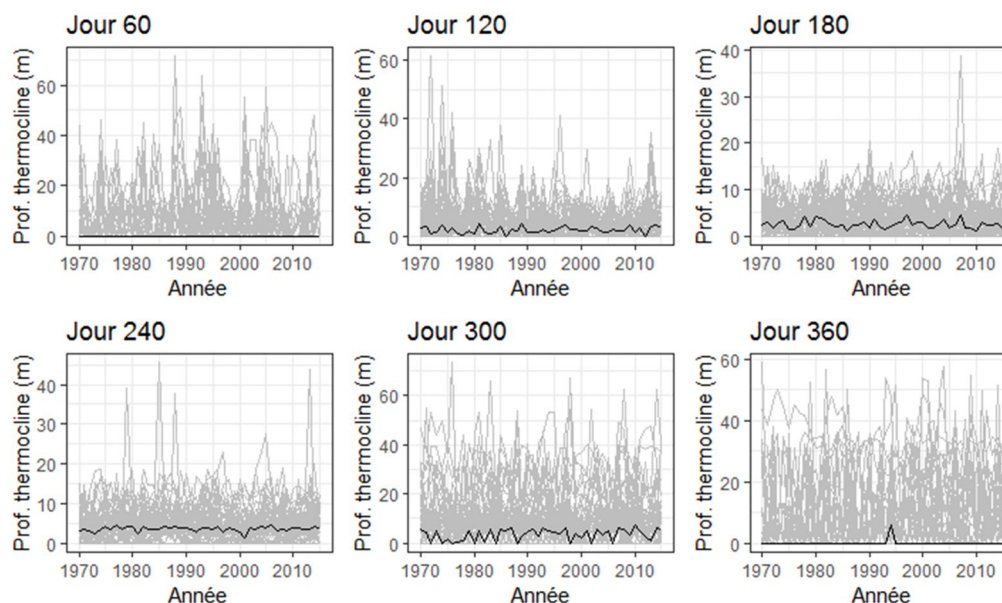


Figure 22 : Profondeur de la thermocline des plans d'eau français par jour de l'année, d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). La ligne noire représente la moyenne pour l'ensemble de plans d'eau.

En résumé, d'après les simulations avec GLM pour la période 1970-2015, le changement climatique a causé une augmentation de la température des plans d'eau français et un rallongement de la période de stratification estivale. Ces changements se sont produits surtout pendant la période 1980-1995 et le comportement thermique des plans d'eau s'est maintenu relativement stable pendant la période 1970-1980 et pendant la période 1995-2015.

7. Effet de la qualité de l'eau sur le comportement thermique

On analyse ici l'effet de la qualité de l'eau à travers le lien entre la qualité de l'eau et la transparence de l'eau pour les 87 plans d'eau avec une bonne qualité de simulation (i.e. $RMSE \leq 2$ °C). Les valeurs seuils pour le paramètre transparence de l'eau sont fonction de la profondeur moyenne des plans d'eau (Danis & Roubeix, 2014).

7.1. Différences de comportement thermique entre les scénarios extrêmes

Commençons par analyser l'effet maximal de la transparence sur le comportement thermique à partir des scénarios extrêmes de qualité de l'eau, « Eau pure » et « Pire ».

La diminution de la transparence de l'eau a comme conséquence une absorption du rayonnement solaire plus proche de la surface, ce qui se traduit par une température de surface plus haute et une intensification de la stratification thermique. Cet effet s'observe dans les simulations à travers différents indicateurs. Il y a une diminution de la température maximale annuelle de la colonne d'eau (2,3 °C, p -valeur < 0,001) dans le cas « Pire » par rapport au cas « Eau pure ». De plus, il y a une augmentation de la température de l'épilimnion moyenne annuelle (1,4 °C, p -valeur < 0,001) et de la température de l'épilimnion maximale annuelle (5,1, p -valeur < 0,001), et une diminution de la température de l'hypolimnion moyenne annuelle (1,2 °C, p -valeur < 0,001) et de la température de l'hypolimnion maximale annuelle (4,7 °C, p -valeur < 0,001). Pendant l'hiver, comme la colonne d'eau est bien mélangée, il n'y a pas d'effet notable sur les températures minimales en générale (augmentation de la température minimale annuelle de la colonne d'eau de 0,4 °C, p -valeur < 0,001).

Des tendances similaires apparaissent pour les indicateurs saisonniers. Par exemple, dans le cas

« Pire » l'augmentation de la température de l'épilimnion est plus importante pendant le printemps (2,5 °C, p -valeur < 0,001) et l'été (2,1 °C, p -valeur < 0,001), et la diminution de la température de l'hypolimnion est plus importante pendant le printemps (1,0 °C, p -valeur < 0,001) et l'été (3,7 °C, p -valeur < 0,001).

L'intensification de la stratification estivale due à la diminution de la transparence a comme conséquence une augmentation du nombre de jours avec stratification positive (99 jours, p -valeur < 0,001). Il y a aussi une diminution de la profondeur de la thermocline qui se rapproche de la surface (par exemple, de 4,0 m en moyenne le jour 240, p -valeur < 0,001) (Figure 25).

Ces résultats sont généraux pour l'ensemble des plans d'eau étudiés mais le comportement varie en fonction de la profondeur du plan d'eau (Figure 23). Pour l'épilimnion l'effet de la diminution de transparence est peu important pour des plans d'eau peu profonds et augmente avec la profondeur du plan d'eau jusqu'à une profondeur maximale de ~10 m. Pour les plans d'eau de profondeurs plus importantes, l'effet est à peu près le même pour les différents plans d'eau. Pour l'hypolimnion, l'effet de la diminution de la transparence sur la température est peu important pour des plans d'eau peu profonds. Cet effet augmente avec la profondeur jusqu'à une profondeur de ~10 m. Entre ~10 m et ~40 m l'effet de la diminution de la transparence diminue avec la profondeur et reste stable pour des profondeurs supérieures.

Les altérations de la stratification dépendent aussi de la profondeur (Figure 24). Pour des plans d'eau très peu profonds (< 2 m) ou très profonds (> 40 m) la durée de la période de stratification ne varie presque pas. Pour les autres plans d'eau, la durée de stratification tend à augmenter avec la diminution de la transparence, avec une augmentation maximale de la durée pour une profondeur maximale de ~10 m. Aussi, la profondeur de la thermocline ne varie pour les plans d'eau peu profonds (< 8-10 m) et tend à diminuer pour les plans d'eau profonds (Figure 25).

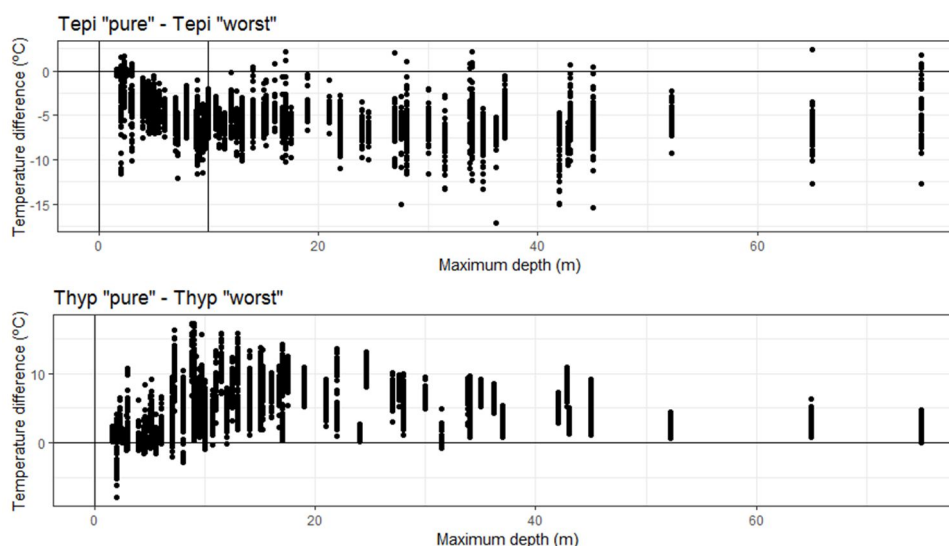


Figure 23 : Différence de température maximale annuelle entre l'état "pure" et l'état "pire" pour tous les 87 plans d'eau où RMSE < 2°C, d'après les simulations avec GLM. Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.

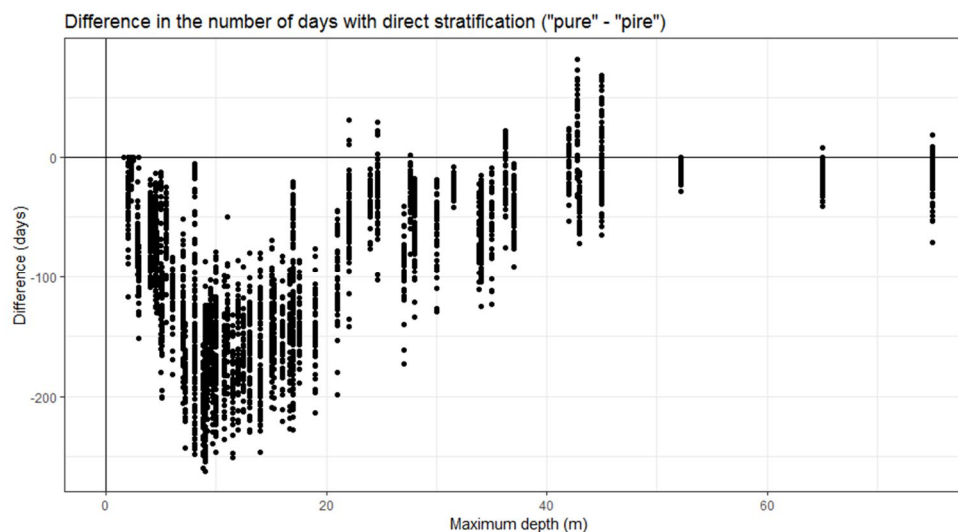


Figure 24 : Différence sur le nombre de jours de stratification directe entre le cas “pure” et l’état “pire”, d’après les simulations avec GLM (87 plans d’eau avec RMSE ≤ 2 °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d’eau.

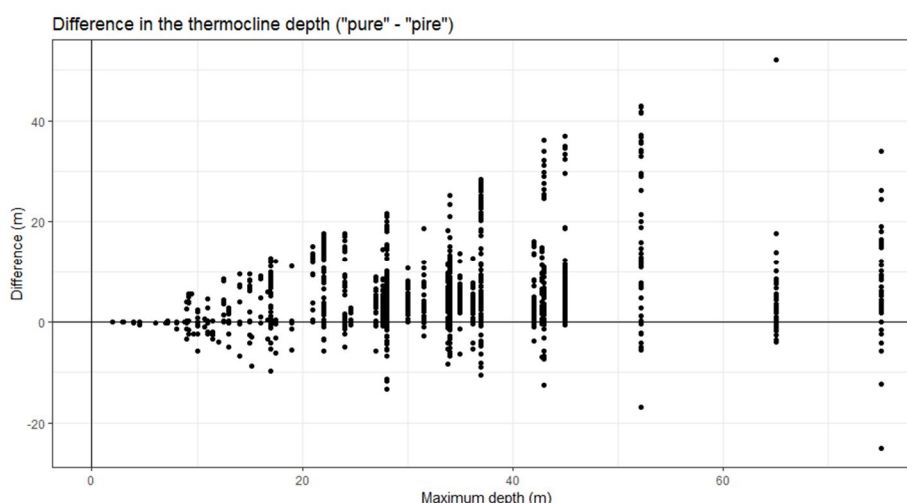


Figure 25 : Différence sur la profondeur de la thermocline entre le cas “pure” et l’état “pire”, d’après les simulations avec GLM (87 plans d’eau avec RMSE ≤ 2 °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d’eau.

7.2. Différences de comportement thermique entre les seuils Très bon/Bon et Médiocre/Mauvais

Si on compare le comportement thermique des plans d'eau entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, on observe en général les mêmes types d'effets de la diminution de la transparence, mais, comme attendu, de moindre amplitude.

Avec la diminution de transparence entre ces deux états, la température moyenne annuelle de la colonne d'eau diminue de 0,3 °C (p -valeur < 0,001) et la température maximale annuelle de la colonne d'eau diminue de 1,0 °C (p -valeur < 0,001). En plus, la température maximale annuelle de l'épilimnion augmente de 1,1 °C (p -valeur < 0,001), la température maximale de l'hypolimnion diminue de 0,4 °C (p -valeur < 0,001) et il y a une augmentation de 55 degrés-jours en moyenne. Par contre, les variations

de la température moyenne annuelle de l'épilimnion et de la température moyenne annuelle de l'hypolimnion sont trop petites pour être considérées ($\sim 0,1-0,2$ °C). Le fait que la température de l'hypolimnion soit très affectée par la diminution de la transparence si on compare les cas extrêmes mais presque pas si on compare les seuils TB/B et Me/Ma indique qu'il peut y avoir des modifications du régime hydrodynamique (intensification de la stratification, peut être avec des transitions polymyctique-monomyctique) dans les conditions de référence pour les plans d'eau de profondeur intermédiaire.

Regardons maintenant l'effet par saisons. La température moyenne de la colonne d'eau diminue de $0,7$ °C (p -valeur $< 0,001$) en été, et la température moyenne de l'épilimnion augmente de $0,4$ °C (p -valeur $< 0,001$) en moyenne au printemps. Pour les autres saisons et pour la température de l'hypolimnion l'effet est encore moins important.

L'effet sur la durée de la période de stratification est peu important, avec une augmentation du nombre de jours de stratification directe de seulement $6,5$ jours en moyenne (p -valeur $< 0,001$) et une diminution de la profondeur de la thermocline le jour 240 de $1,1$ m plus proche de la surface (p -valeur $< 0,001$).

Comme dans la section 7.1, l'effet de la diminution de transparence dépend de la profondeur et est variable d'une année à l'autre pour certains paramètres. Pour la température maximale de la colonne d'eau (Figure 26), l'effet est presque nul pour les plans d'eau peu profonds (< 5 m). La plus grande diminution de la température avec la transparence a lieu pour les plans d'eau de profondeurs entre ~ 5 m et ~ 50 m. Pour les plans d'eau plus profonds, la diminution de température est de $0,7$ °C en moyenne.

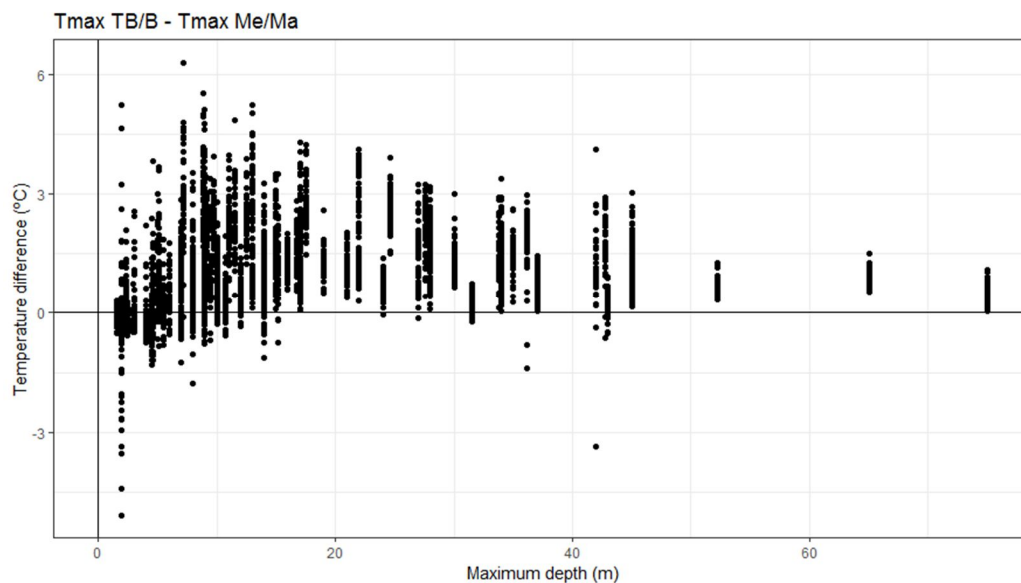


Figure 26 : Différence de température maximale entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec RMSE ≤ 2 °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.

Le nombre de jours avec stratification directe dépend aussi de la profondeur (Figure 27). Le nombre de jours de stratification augmente ($10,5$ jours en moyenne) pour des plans d'eau de $< \sim 20$ m, mais tend à se maintenir stable (diminution de $1,8$ jours en moyenne) pour les plans d'eau plus profonds.

Par contre, l'effet sur la température maximale annuelle de l'épilimnion ne dépend presque pas de la profondeur maximale (Figure 28). Pour les plans d'eau inférieurs à ~ 2 m, il n'y a pas d'effet de la diminution de transparence, mais pour les autres plans d'eau, la température augmente de $1,2$ °C en moyenne entre le seuil TB/B et le seuil Me/Ma.

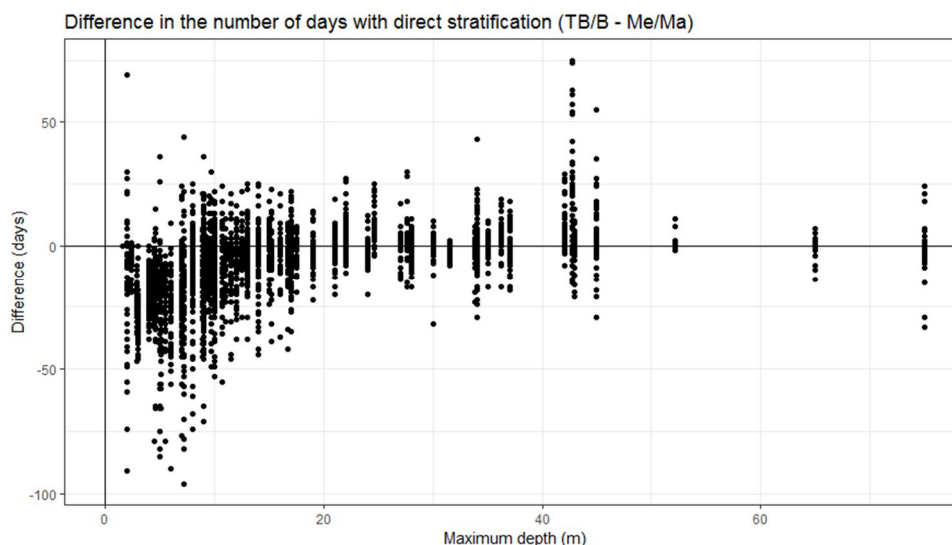


Figure 27 : Différence du numéro de jours avec stratification positive entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec RMSE \leq 2 °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.

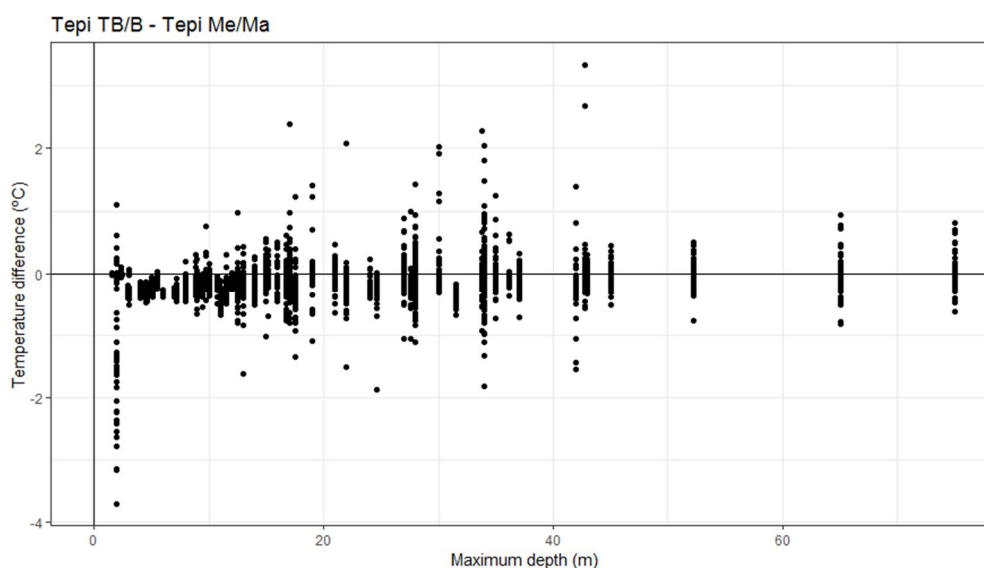


Figure 28 : Différence de température maximale de l'épilimnion entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec RMSE \leq 2 °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.

8. Calcul des conditions de référence et de seuils de température

Les sections antérieures ont montré une dépendance du comportement des plans d'eau français à la transparence et à la profondeur, comme l'ont montré les réponses de différents indicateurs de la température. Parmi les indicateurs étudiés, ceux qui répondent le plus aux variations de transparence sont la température maximale annuelle de la colonne d'eau, la valeur maximale annuelle de la température de l'épilimnion et le nombre de jours avec stratification directe.

Le calcul des conditions de référence et des seuils de qualité pour un indicateur de température pour le plan de gestion 2010-2015 est décrit ici pour les 87 plans d'eau avec une bonne qualité de simulation

(i.e. $RMSE \leq 2 \text{ } ^\circ\text{C}$). Nous utilisons le lac Gérardmer (GER88, 48,069° N 6,854° E), un lac naturel de 36 m de profondeur maximale, pour illustrer la procédure de calcul des valeurs-seuils pour le plan de gestion 2010-2015 à cause de la bonne qualité des simulations pour ce plan d'eau ($RMSE = 0,93 \text{ } ^\circ\text{C}$). Tous les scripts utilisés sont disponibles dans le projet TempLac dans la forge logiciel d'Irstea.

Le script « simulations_glm.py » simule le comportement thermique de l'ensemble de plans d'eau DCE pour la période 1970-2015 sous différentes hypothèses et les résultats sont sauvegardés dans le dossier « folder0 » indiqué dans le script. La Figure 29 montre la température simulée pour GER88 pour la période 1970-2015 et le cas base. On peut observer que GLM tend à surestimer la température de l'épilimnion, comme montré dans les Figures 15-16. La période de simulation peut être modifiée en changeant la date des variables « start_date » (début de la simulation) et « end_date » (fin de la simulation). Les cas calculés par le script sont montrés dans le tableau suivant.

Cas	Dossier où sont sauvegardés les résultats
Simulations de base	folder0 + 'GLM_1970_2015_base_sim'
Eau pure ($LEC = 0,0384 \text{ m}^{-1}$)	folder0 + 'GLM_1970_2015_pure'
Seuil TB/B	folder0 + 'GLM_1970_2015_reference_conditions'
Seuil Me/Ma	folder0 + 'GLM_1970_2015_bad_status'
Cas « Pire » ($LEC = 15 \text{ m}^{-1}$)	folder0 + 'GLM_1970_2015_worst'

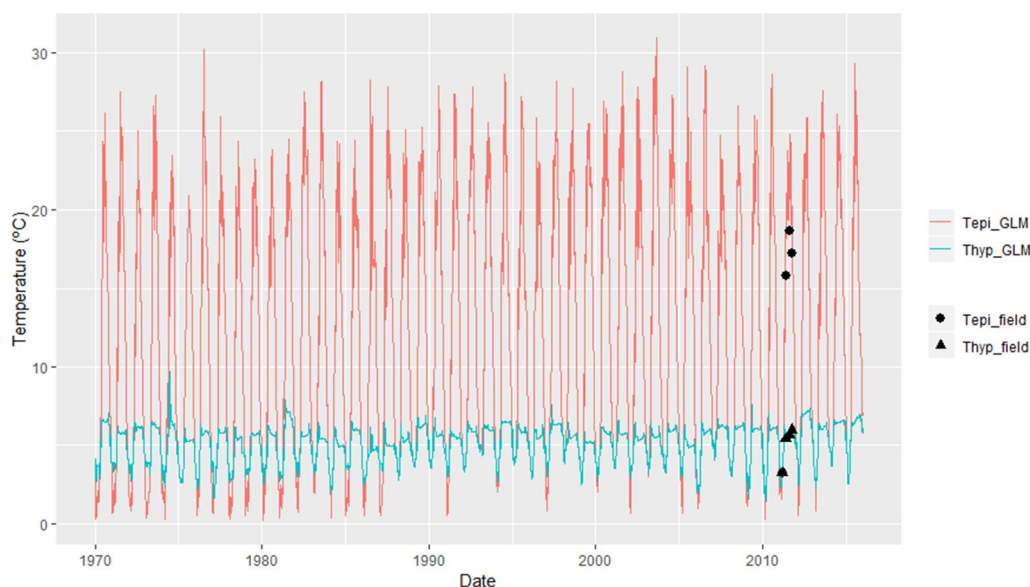


Figure 29 : Température de l'épilimnion (Tepi_GLM) et de l'hypolimnion (Thyp_GLM) simulée à l'échelle journalière par GLM et mesures in situ du réseau RCS-RCO (Tepi_field, Thyp_field) sur la période 1970-2015 pour le lac Gérardmer (GER88).

Ensuite le script « calc_temp_indicators from nc.R » est utilisé pour calculer les indicateurs de température pour l'ensemble de plans d'eau DCE du dossier « folder ». Ce script est appliqué à chaque dossier du tableau ci-dessus en modifiant la variable « folder ». La Figure 30 présente, pour GER88 la chronique 1970-2015 de trois indicateurs de température calculés à partir des simulations : température maximale annuelle de la colonne d'eau (T_{max_yr}), température maximale annuelle de l'épilimnion ($Tepi_max_yr$) et nombre annuel de jours avec stratification directe (str_n).

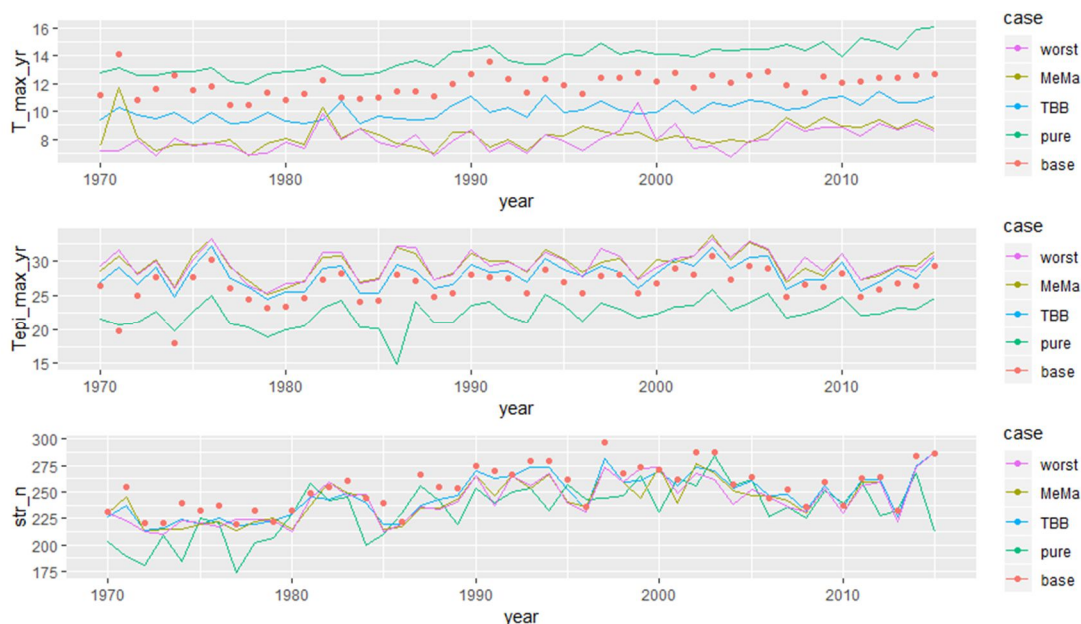


Figure 30 : Indicateurs de température maximale annuelle (T_{max_yr}), température maximale de l'épilimnion ($Tepi_max_yr$) et nombre annuel de jours de stratification directe (str_n) sur la période 1970-2015 pour le lac Gérardmer pour les cas « pure » et « pire » (worst), et pour les seuils Très Bon/Bon (TBB) et Médiocre/Mauvais (MeMa).

Finalement, le script « ref_seuils.R » permet de calculer les conditions de référence et les valeurs-seuils pour un plan d'eau, un indicateur et une période donnés. Le dossier qui contient les données est identifié par la variable « folder0 », le plan d'eau par la variable « cdl » et l'indicateur par la variable « indicator ». On indique l'année initiale et l'année finale de la période d'étude avec les variables « start_yr » et « end_yr », respectivement.

Le script donne la distribution de l'indicateur pour les différents cas à partir des simulations avec GLM (Figure 31), ainsi que la distribution de l'écart de l'indicateur entre le cas « pure » et les autres cas (Figure 32). Et ceci pour la totalité de la période simulée, i.e. 1970-2015, ou pour le plan de gestion 2010-2015, en fonction des valeurs spécifiées des variables « start year » et « end year ». Les indicateurs pris en compte sont indiqués à travers de la variable « ind_list ».

Le script calcule aussi les valeurs des seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) comme la médiane de la distribution des écarts pour ces cas (Figure 32).

Sur cette période récente 2010-2015 et pour la température maximale de l'épilimnion sur GER88, la valeur du seuil TB/B est 4,31 °C et la valeur du seuil Me/Ma est 6,06 °C. Les valeurs des seuils Bon/Moyen (B/Mo) et Moyen/Médiocre (Mo/Me) sont calculées par interpolation linéaire à partir des valeurs des seuils TB/B et Me/Ma. Ainsi, la valeur du seuil B/Mo est 4,90 °C et la valeur du seuil Mo/Me est 5,48 °C. Il faut répéter ce procès pour chaque plan d'eau, puisque chaque plan d'eau a ses propres conditions de référence et valeurs-seuils (Figure 33-35). Ceci peut être réalisé avec le script « ref_seuils_all.R » pour un indicateur et période donnés.

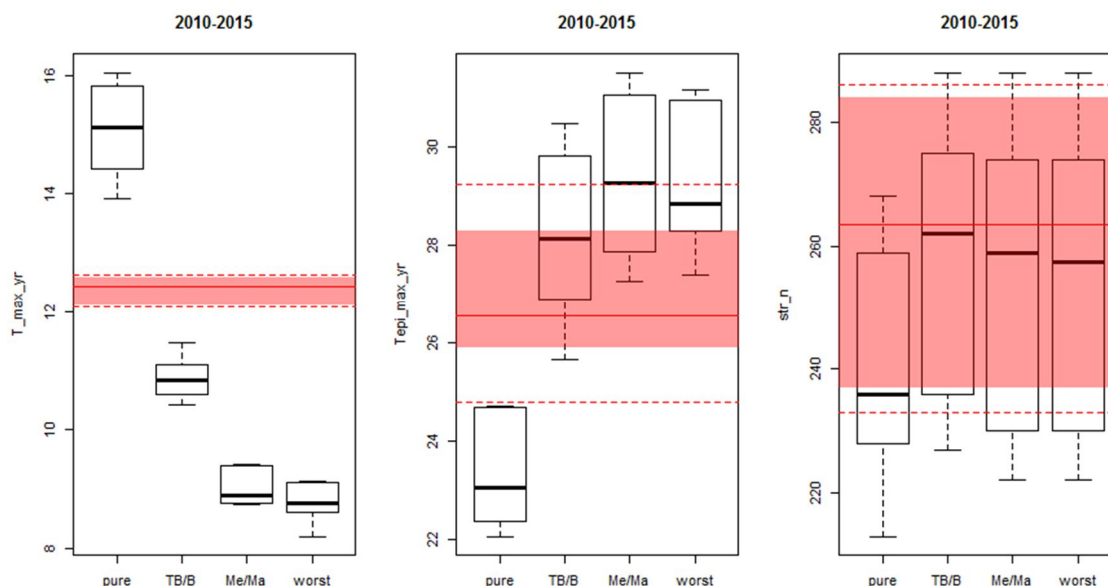


Figure 31 : Distribution (boîtes à moustache) d'après les simulations avec GLM des valeurs de trois indicateurs pour le plan de gestion 2010-2015 pour le lac Gérardmer pour les cas « pure » et « pire » (worst), et pour les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) : température maximale annuelle de la colonne d'eau (T_{max_yr}), température maximale annuelle de l'épilimnion ($Tepi_max_yr$) et nombre de jours de stratification directe (str_n). En couleur est indiquée la distribution de valeurs pour la simulation de base : médiane (ligne rouge), rang interquartile (zone rose) et point le plus extrême $\leq 1,5$ (ligne rouge à tirets, équivalent des moustaches des boîtes à moustache).

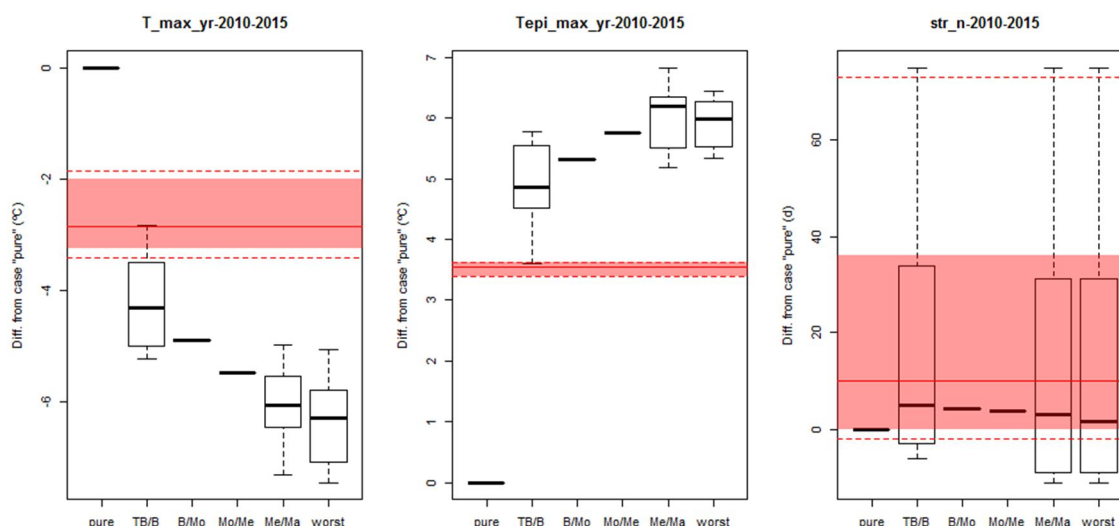


Figure 32 : Distribution (boîtes à moustache) d'après les simulations avec GLM pour le lac Gérardmer des écarts de trois indicateurs par rapport au cas « pure » pour le plan de gestion 2010-2015 pour les cas « pure » et « pire » (worst), et pour les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) : température maximale annuelle de la colonne d'eau (T_{max_yr}), température maximale annuelle de l'épilimnion ($Tepi_max_yr$) et nombre de jours de stratification directe (str_n). Valeurs-seuils calculés pour les seuils Bon/Moyen (B/Mo) et Moyen/Médiocre (Mo/Me). En couleur est indiquée la distribution de valeurs pour la simulation de base : médiane (ligne rouge), rang interquartile (zone rose) et point le plus extrême $\leq 1,5$ (ligne rouge à tirets, équivalent des moustaches des boîtes à moustache).

Les indicateurs de température ont un caractère non linéaire. Les figures 31-32 montrent que dans les conditions de référence (entre le cas eau pure et le seuil TB/B) il y a les modifications de température les plus importantes. Ces résultats sont consistants avec les résultats des sections 7.1 et 7.2 (différences de comportement thermique entre les cas extrêmes beaucoup plus importantes que entre les seuils TB/B et Me/Ma). C'est aussi cohérent avec les études (e.g. Henderson-Sellers, 1988) qui montrent que les modèles hydrodynamiques sont sensibles au coefficient d'extinction de la lumière principalement pour des eaux claires ($LEC < 0.6 \text{ m}^{-1}$). Dans d'autres cas (e.g. le nombre de jours de stratification directe), la valeur de l'indicateur ne varie pas monotonement avec la qualité, ce qui empêche l'utilisation de ces indicateurs pour évaluer l'état d'un plan d'eau.

Par ailleurs, il faut noter que dans de nombreux cas, la différence de température entre les seuils TB/B et Me/Ma est petite (i.e. $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ en moyenne pour la température maximale annuelle de l'épilimnion pour les plans d'eau de profondeur supérieure à 4 m, Figure 33) et la variabilité interannuelle dans une même classe d'état est élevée (Figure 32), en particulier pour certains indicateurs (e.g. le nombre de jours de stratification directe). Par conséquent, on peut s'attendre une grande incertitude de classification sur la base d'un tel indicateur thermique pluriannuel. En perspective, une réflexion pourra être menée à une échelle annuelle pour la construction d'un indicateur plus précis.

Pour l'indicateur température maximale annuelle de la colonne d'eau il y a des écarts encore plus importants de température entre les seuils TB/B et /Me/Ma pour certains plans d'eau, en particulier ceux de profondeur entre 10 m et 45 m (Figure 34).

Pour l'indicateur nombre de jours de stratification directe, par contre, les écarts entre les seuils TB/B et Me/Ma sont importants seulement pour les plans d'eau de profondeur entre $\sim 2 \text{ m}$ et $\sim 15 \text{ m}$.

Cette dépendance des écarts entre les seuils TB/B et Me/Ma se traduit en différentes distributions des écarts pour différents types de plans d'eau. Ces écarts pour la température maximale annuelle de la colonne d'eau et de l'épilimnion sont plus importants pour les lacs naturels et retenues, qui sont plus profonds que gravières et étangs (Figure 33D, 34D). Par contre, les écarts entre les seuils ne semblent pas dépendre de la qualité des simulations de GLM (Figure 33C, 34C, 35C).

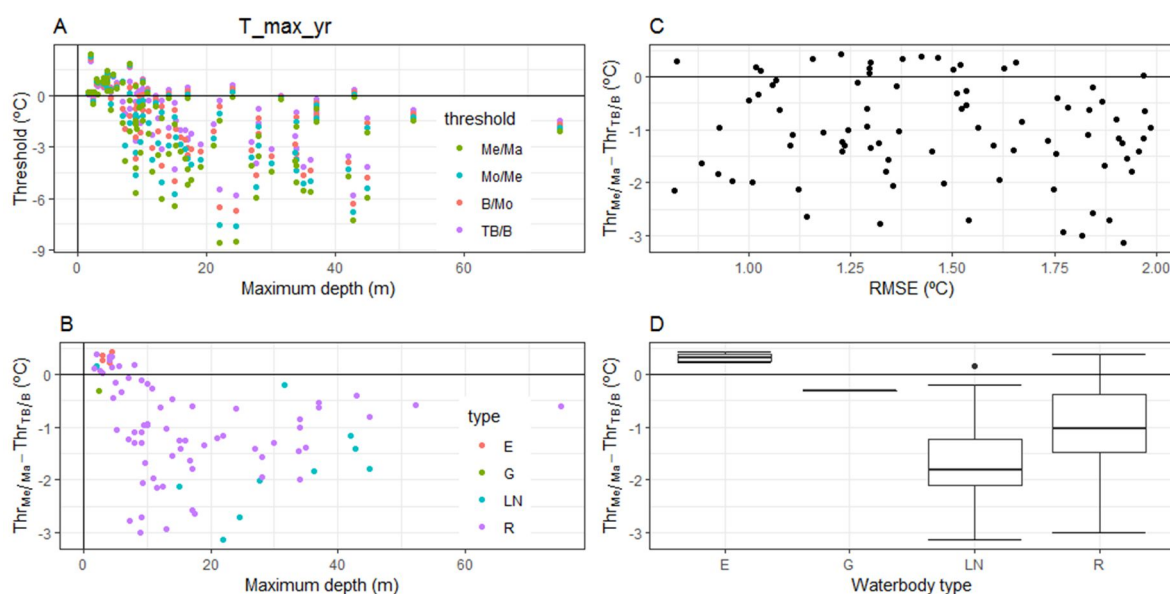


Figure 33 : Seuils de température pour la température maximale annuelle de colonne d'eau en fonction de la profondeur du plan d'eau (A) ; et différence de température entre les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) en fonction de la profondeur du plan d'eau (B), du RMSE (C) et du type de plan d'eau (D). Résultats d'après les simulations avec GLM sur la période 2010-2015. Les types de plans d'eau sont lac naturel (LN), retenue (R), étang (E) et gravière (G).

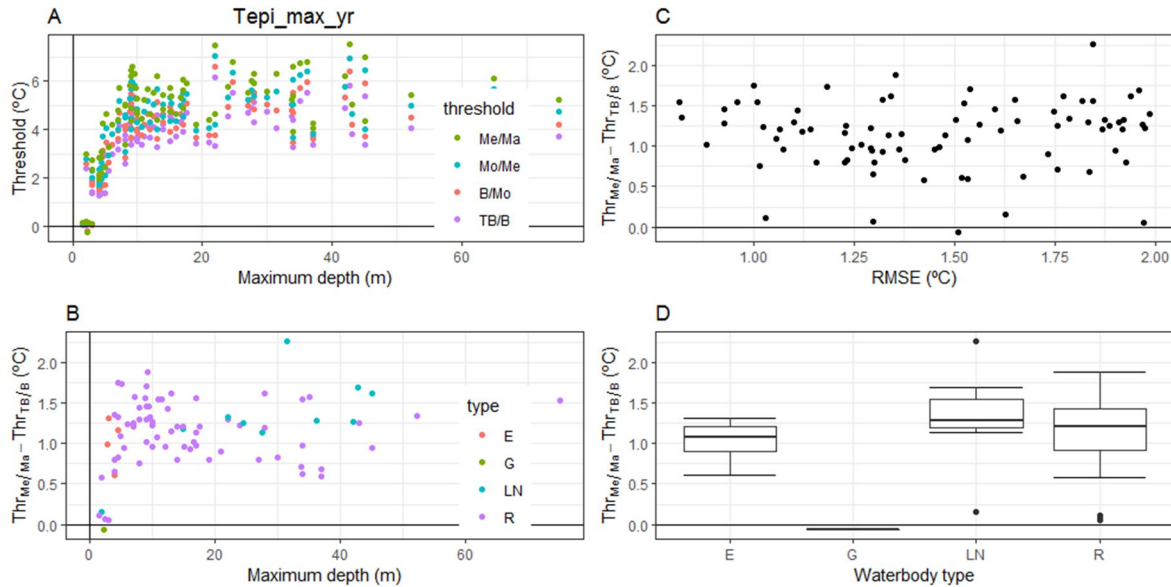


Figure 34 : Seuils de température pour la température maximale annuelle de l'épilimnion en fonction de la profondeur du plan d'eau (A) ; et différence de température entre les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) en fonction de la profondeur du plan d'eau (B), du RMSE (C) et du type de plan d'eau (D). Résultats d'après les simulations avec GLM sur la période 2010-2015. Les types de plans d'eau sont lac naturel (LN), retenue (R), étang (E) et gravière (G).

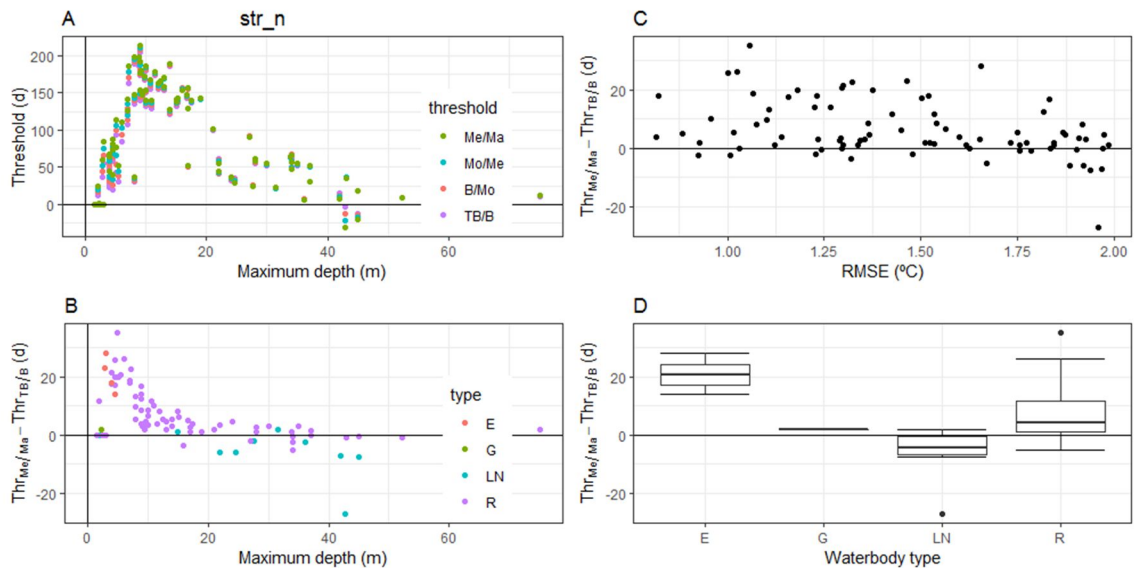


Figure 35 : Seuils pour le nombre de jours de stratification en fonction de la profondeur du plan d'eau (A) ; et différence de température entre les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) en fonction de la profondeur du plan d'eau (B), du RMSE (C) et du type de plan d'eau (D). Résultats d'après les simulations avec GLM sur la période 2010-2015. Les types de plans d'eau sont lac naturel (LN), retenue (R), étang (E) et gravière (G).

9. Conclusions et perspectives

Ce rapport présente les travaux réalisés de 2016 à 2018 sur la recherche d'un indicateur thermique d'état des plans d'eau français. L'analyse de données in situ montre l'effet de la profondeur des plans d'eau et de la profondeur des exutoires sur la structuration thermique de la colonne d'eau. Ces résultats sont cohérents et complètent les résultats obtenus dans le rapport de Prats & Danis (2015).

Les simulations du comportement thermique avec le modèle hydrodynamique GLM sont d'une qualité acceptable ($RMSE \leq 2$ °C) pour un 46% des plans d'eau simulés mais le modèle tend à surestimer la température de l'épilimnion. Pour expliquer ce résultat, il faut prendre en considération que le modèle n'a pas été calé et que les données de forçage disponibles sont limitées. Les résultats montrent que l'erreur augmente avec l'altitude pour les plans d'eau à plus de 1000 m d'altitude. Ceci est probablement dû à une mauvaise caractérisation de la température des tributaires. En effet, à hautes altitudes l'effet de la fonte des glaciers est plus importante et le modèle de température de l'eau des tributaires ne prend pas en compte ce facteur. De plus, la variabilité temporelle de la transparence (initialement prévue pour ce projet) n'a pas été prise en compte à cause du retard pris sur le traitement des données satellitaires. Enfin, les conditions climatiques à l'échelle locale diffèrent des données SAFRAN utilisées ici, i.e. à une résolution de 8 km.

Pour les plans d'eau qui ne sont pas des retenues, les résultats de GLM sont en accord avec la qualité espérée des simulations (§6.1). Par contre, les simulations des retenues présentent des erreurs beaucoup plus importantes. En effet, pour des réservoirs à moins de 1000 m d'altitude, le modèle surestime la température du plan d'eau de 0,6 °C en moyenne et la RMSE moyenne est de 3,8 °C. Or, la profondeur de sortie influence l'intensité de la stratification et la profondeur de la thermocline, ce qui résulte en une grande variabilité de la structure verticale de la colonne d'eau. Ces résultats montrent la nécessité de bien prendre en compte la profondeur d'extraction de l'eau et la gestion hydraulique pour la simulation du comportement thermique des retenues.

L'amélioration de la qualité des simulations, nécessaire pour une bonne détermination des conditions de référence et des valeurs-seuils, passe par l'utilisation de données de plus fines résolutions spatiale et temporelle : données météorologiques à une échelle plus fine ou in situ, données de transparence variables, etc. De plus, l'analyse des résultats a montré l'importance de disposer de données sur la gestion hydraulique (débits, profondeur des exutoires), spécialement dans le cas de retenues, et des bonnes estimations de la température des tributaires pour les plans d'eau d'altitude. De plus, le calage du modèle pour des plans d'eau individuels peut améliorer encore plus la qualité des simulations. Par contre, il n'est pas conseillé de caler le modèle avant de disposer de données de meilleure qualité au risque de compenser artificiellement des problèmes dus aux manques des données.

Étant des points chauds de biodiversité, les petits plans d'eau méritent une attention particulière. D'après les résultats du rapport de Prats et Danis (2016), les petits plans d'eau ont une haute sensibilité aux données de forçage et à la configuration du modèle à cause de leur volume réduit. La plus grande sensibilité aux conditions climatiques fait qu'ils ont une amplitude thermique annuelle plus importante (Figure 5), d'où les températures d'été plus élevées (Figure 7) ainsi que le risque de températures extrêmes potentiellement nuisibles. De plus, le suivi satellitaire de la température des petits plans d'eau est plus difficile (ou impossible), à cause de leur petite surface à la limite des capacités de résolution du capteur infrarouge Landsat, d'où l'importance accrue d'avoir de données in situ et des modélisations de qualité pour ces plans d'eau.

Les simulations hydrodynamiques avec GLM ont permis de calculer plusieurs indicateurs thermiques dans la période 1970-2015. La valeur des indicateurs est variable dans le temps : il y a une importante variabilité interannuelle et une tendance à long terme. Les variations du comportement thermique des plans d'eau français ont été plus rapides en 1980-1995 et beaucoup plus lentes en 1970-1980 et 1995-2015. Mais compte tenue de la variabilité interannuelle, les indicateurs peuvent être considérés stables sur le court terme, comme sur un plan de gestion de 6 ans. Par contre, la grande variabilité interannuelle fait que des indicateurs pluriannuels (comme dans ce rapport) sont d'application limitée à cause de l'incertitude qui en résulterait. Il serait donc préférable de rechercher à l'avenir des indicateurs à une échelle annuelle.

Le rapport de Prats et Danis (2015b) montrait des évidences d'une influence de la transparence sur la stratification des plans d'eau français. Ici, l'effet de la transparence de l'eau sur le comportement thermique des plans d'eau français est détaillé à travers les valeurs des indicateurs thermiques dans les scénarios correspondants à des conditions diverses de qualité d'eau. La diminution de la transparence de l'eau (générée par une détérioration de la qualité de l'eau) produit une augmentation de la température de l'épilimnion et une diminution de la profondeur de la thermocline. Par conséquent, le transfert de chaleur vers le fond est réduit, la température de l'hypolimnion diminue, le gradient vertical de température s'intensifie et la stratification dure plus longtemps. Ceci peut induire une diminution de la concentration en oxygène dans l'hypolimnion et à des conditions plus anoxiques. De plus, la réduction du volume de l'épilimnion et la diminution de la température de l'hypolimnion résultent aussi en une diminution de la température moyenne de la colonne d'eau. Par conséquent, la quantité de chaleur stockée dans le plan d'eau est moindre, car de la chaleur a été libérée dans l'atmosphère par une augmentation de la perte de chaleur par évaporation, conduction et émission de rayonnement à grande longueur d'onde.

Cet effet est très conditionné par la profondeur du plan d'eau. Les comportements thermiques des plans d'eau moins profonds (moins de ~2 m) ne sont presque pas affectés par la transparence. En effet, la colonne d'eau reste mélangée à cause de la faible profondeur. Pour les plans d'eau plus profonds (> 40-50 m), l'effet plus important est l'augmentation de la température de la couche de surface, mais la durée de la stratification n'est pas très affectée. Ce sont les plans d'eau de profondeurs intermédiaires qui sont affectés le plus par le changement de la transparence et qui sont susceptibles de subir un changement de régime thermomictique, de polymictique à monomictique, et d'une intensification et d'un rallongement de la période de stratification.

Pour finir, ces résultats sont intéressants pour améliorer l'outil développé par Rondel, Daufresne et Danis (2012) et modifié par Prats et Danis (2015b), et qui sert à classer les plans d'eau selon la typologie de Lewis (1983). En effet, cet outil utilise trois indicateurs thermiques pour classer les plans d'eau, mais ne prend pas en considération la transparence. Ce fait peut expliquer la difficulté à bien déterminer la limite des seuils entre types. L'utilisation des résultats de GLM pour différents niveaux de transparence pourrait donc aider à préciser les limites entre les types thermomictiques.

10. Bibliographie

- Bouleau, G. and Pont, D., 2014. Les conditions de référence de la directive cadre européenne sur l'eau face à la dynamique des hydrosystèmes et des usages. *Nat. Sci. Soc.* 22, 3-14.
- Bouleau, G. and Pont, D., 2015. Did you say reference conditions? Ecological and socio-economic perspectives on the European Water Framework Directive. *Environ. Sci. Policy* 47, 32-41.
- Bruce, L.C., Frassl, M.A., Arhonditsis, G.B., Gal, G., Hamilton, D.P., Hanson, P.C., Hetherington, A.L., Melack, J.M., Read, J.S., Rinke, K., Rigosi, A., Trolle, D., Winslow, L., Adrian, R., Ayala, A.I., Bocaniov, S.A., Bohrer, B., Boon, C., Brookes, J.D., Bueche, T., Busch, B.D., Copetti, D., Cortés, A., de Eyto, E., Elliott, A., Gallina, N., Gilboa, Y., Guyennon, N., Huang, L., Kerimoglu, O., Lenters, D., MacIntyre, S., Makler-Pick, V., McBride, C.G., Moreira, S., Özkunakci, D., Pilotti, M., Rueda, F.J., Rusak, J.A., Samal, N.R., Schmid, M., Shatwell, T., Snorheim, C., Soullignac, F., Valerio, G., van der Linden, L., Vetter, M., Vinçon-Leite, B., Wang, J., Weber, M., Wickramaratne, C., Woolway, R.I., Yao, H., Hipsey, M.R. 2018. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM): Stress-testing across a global observatory network. *Environ. Modell. Soft.* 102, 274-291.
- Danis, P.-A., von Grafenstein, U., Masson-Delmotte, V., Planton, S., Gerdeaux, D. and Moisselin, J.M., 2004. Vulnerability of two European lakes in response to future climatic changes. *Geophys. Res. Lett.* 31, L21507.
- Danis, P.-A. et V. Roubeix. 2014. Physico-chimie soutenant la biologie des plans d'eau nationaux : Principes et méthodes de définition des valeurs-seuils & Amélioration des connaissances par la télédétection. Pôle Onema-Irstea "Hydroécologie des Plans d'eau", Aix-en-Provence. p. 81.
- Fink, G., Schmid, M. and Wüest, A., 2014. Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. *Water Resour. Res.* 50, 7285-7301.
- Fink, G., Wessels, M. and Wüest, A., 2016. Flood frequency matters: Why climate change degrades deep-water quality of peri-alpine lakes. *J. Hydrol.* 540, 457-468.
- Gaudard, A., Weber, C., Alexander, T.J., Hunziker, S. and Schmid, M., 2018. Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 5, e1295.
- Han, B.-P., Armengol, J., Garcia, J.C., Comerma, M., Roura, M., Dolz, J. and Straskraba, M., 2000. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecol. Model.* 125, 109-122.

- He, W., Lian, J., Yao, Y., Wu, M. and Ma, C., 2017. Modeling the effect of temperature-control curtain on the thermal structure in a deep stratified reservoir. *J. Environ. Manage.* 202, 106-116.
- Heiskanen, J.J., Mammarella, I., Ojala, A., Stepanenko, V., Erkkilä, K.-M., Miettinen, H., Sandström, H., Eugster, W., Leppäranta, M., Järvinen, H., Vesala, T. and Nordbo, A., 2015. Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 120, 7412-7428.
- Henderson-Sellers, B., 1988. Sensitivity of thermal stratification models to changing boundary conditions. *Appl. Math. Model.* 12, 31-43.
- Hipsey, M.R., Bruce, L.C., Hamilton, D.P. 2014. General Lake Model. Model Overview and User Information. The University of Western Australia, 42 p.
- Hipsey, M.R., L.C. Bruce et D.P. Hamilton. 2013. Aquatic Ecodynamics (AED) Model Library. Science Manual. Crawley, Western Australia: The University of Western Australia. p. 34.
- Howington, S.E., 1990. Simultaneous, multiple-level withdrawal from a density stratified reservoir. Hydraulics Laboratory, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 73.
- Hunziker, S. and Wüest, A., 2011. Anthropogene Temperaturveränderungen in Flüssen und Seen - eine Literaturanalyse. Eawag, Kastanienbaum, Switzerland, 48.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Cristóbal, J., Sobrino, J.A., Soria, G., Ninyerola, M. and Pons, X., 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE T. Geosci. Remote* 47, 339-349.
- Johansson, H., Brolin, A.A., Håkanson, L. 2007. New Approaches to the Modelling of Lake Basin Morphometry. *Environ. Model. Assess* 12, 213-228.
- Kirillin, G. and Shatwell, T., 2016. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes. *Earth-Sci Rev.* 161, 179-190.
- Kirillin, G., Shatwell, T. and Kasprzak, P., 2013. Consequences of thermal pollution from a nuclear plant on lake temperature and mixing regime. *J. Hydrol.* 496, 47-56.
- Lewis, W.M., 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40, 1779-1787.
- Livingstone, D.M., 2003. Impact of Secular Climate Change on the Thermal Structure of a Large Temperate Central European Lake. *Climatic Change* 57, 205-225.
- Lorenzen, C.J., 1972. Extinction of Light in the Ocean by Phytoplankton. *ICES J. Mar. Sci.* 34, 262-267.
- Ma, S., Kassinos, S.C., Fatta Kassinos, D. and Akylas, E., 2008. Effects of selective water withdrawal schemes on thermal stratification in Kouris Dam in Cyprus. *Lakes Res. Res. Manag.* 13, 51-61.
- Marcé, R., Moreno-Ostos, E., García-Barcina, J.M. and Armengol, J., 2010. Tailoring dam structures to water quality predictions in new reservoir projects: Assisting decision-making using numerical modeling. *J. Environ. Manage.* 91, 1255-1267.
- Mohseni, O., Stefan, H.G., Erickson, T.R. 1998. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resour. Res.* 34, 2685-2692.
- Moreno-Ostos, E., Marce, R., Ordóñez, J., Dolz Ripolles, J. and Armengol, J., 2008. Hydraulic management drives heat budgets and temperature trends in a Mediterranean reservoir. *Int. Rev. Hydrobiol.*, 131-147.
- O'Reilly, C.M., Sharma, S., Gray, D.K., Hampton, S.E., Read, J.S., Rowley, R.J., Schneider, P., Lenters, J.D., McIntyre, P.B., Kraemer, B.M., Weyhenmeyer, G.A., Straille, D., Dong, B., Adrian, R., Allan, M.G., Anneville, O., Arvola, L., Austin, J., Bailey, J.L., Baron, J.S., Brookes, J.D., de Eyto, E., Dokulil, M.T., Hamilton, D.P., Havens, K., Hetherington, A.L., Higgins, S.N., Hook, S., Izmet'eva, L.R., Joehnk, K.D., Kangur, K., Kasprzak, P., Kumagai, M., Kuusisto, E., Leshkevich, G., Livingstone, D.M., MacIntyre, S., May, L., Melack, J.M., Mueller-Navarra, D.C., Naumenko, M., Noges, P., Noges, T., North, R.P., Plisnier, P.-D., Rigosi, A., Rimmer, A., Rogora, M., Rudstam, L.G., Rusak, J.A., Salmaso, N., Samal, N.R., Schindler, D.E., Schladow, S.G., Schmid, M., Schmidt, S.R., Silow, E., Soyulu, M.E., Teubner, K., Verburg, P., Voutilainen, A., Watkinson, A., Williamson, C.E. and Zhang, G., 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys. Res. Lett.* 42, 10773-10781.
- Patten, B.C., Eglhoff, D.A., Richardson, D.H. 1975. Total ecosystem model for a cove in Lake Texocoma. Dans B.C. Patten (dir.), *Systems Analysis and Simulation in Ecology* (Vol. 3, p. 206-423). New York : Academic Press.
- Prats, J. and Danis, P.-A., 2015a. Predicting climate change effects in a Mediterranean reservoir under different climate scenarios and management options. *Our Common Future under Climate Change*, Paris, France, 578-579.
- Prats, J. et P.-A. Danis. 2015b. Optimisation du réseau national de suivi pérenne in situ de la température des plans d'eau : apport de la modélisation et des données satellitaires. Pôle Onema-Irstea "Hydroécologie des plans d'eau". p. 93.
- Prats Rodríguez, J., Danis, P.-A. 2016. Estimation des évolutions hebdomadaires des températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion par type de plan d'eau. Potentialités et limites des données spatialisées (Loieau et SAFRAN) et des outils de modélisation. Rapport convention Onema/Irstea 2016. Irstea, UR HYAX, Pôle Onema/Irstea, Aix-en-Provence. 68 p.
- Prats Rodríguez, J., Danis, P.-A. 2017. Évolutions des températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau DCE nationaux. Rapport convention Onema/Irstea 2016. Irstea, UR HYAX, Pôle AFB/Irstea, Aix-en-Provence. 34 p.

- Prats, J., Reynaud, N., Rebière, D., Peroux, T., Tormos, T., Danis, P.-A. 2018a. LakeSST: Lake Skin Surface Temperature in French inland water bodies for 1999–2016 from Landsat archives. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 727-743.
- Prats Rodríguez, J., Roubéix, V., Danis, P.-A., Reynaud, N., Tormos, T. 2018b. Thermal characteristics of French water bodies : from small ponds to Lake Léman. *European Large Lakes Symposium*, September 23-28, Évian (France).
- Prats, J., Danis, P.-A. En presse. An epilimnion and hypolimnion temperature model based on air temperature and lake characteristics. *Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst.*
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteorol.* 47, 92-107.
- Råman Vinnå, L., Wüest, A. and Bouffard, D., 2017. Physical effects of thermal pollution in lakes. *Water Resour. Res.* 53, 3968-3987.
- Råman Vinnå, L., Wüest, A., Zappa, M., Fink, G. and Bouffard, D., 2018. Tributaries affect the thermal response of lakes to climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 22, 31-51.
- Read, J.S., Winslow, L.A., Hansen, G.J.A., Van Den Hoek, J., Hanson, P.C., Bruce, L.C., Markfort, C.D. 2014. Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology. *Ecol. Model.* 291, 142-150.
- Rimmer, A., Gal, G., Opher, T., Lechinsky, Y. and Yacobi, Y.Z., 2011. Mechanisms of long-term variations in the thermal structure of a warm lake. *Limnol. Oceanogr.* 56, 974-988.
- Rondel, C., Danis, P.-A., Daufresne, M., 2012. Typologie thermo-mictique. Application à une classification des lacs français. Pôle Onema-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau », Aix-en-Provence. 62 p.
- Rose, K.C., Winslow, L.A., Read, J.S., Hansen, G.J.A. 2016. Climate-induced warming of lakes can be either amplified or suppressed by trends in water clarity. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 1, 44-53.
- Roubéix, V., Danis, P.-A. 2016. Relations entre paramètres physico-chimiques des plans d'eau et occupation du bassin versant - Estimation des conditions de référence. Rapport convention Onema/Irstea 2016. Irstea, UR HYAX, Pôle Onema/Irstea, Aix-en-Provence. 26 p.
- Sahu, A., Yadav, N. and Sudhakar, K., 2016. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 66, 815-824.
- Simon, R.N., Tormos, T., Danis, P.A. 2014. Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 30, 247-250.
- Snorheim, C.A, Hanson, P.C., McMahon, K.D., Read, J.S., Carey, C.C., Dugan, H.A. 2017. Meteorological drivers of hypolimnetic anoxia in a eutrophic, north temperate lake. *Ecol. Model.* 343, 39-53.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyrou, J.-M. 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.* 30, 1627-1644.
- Wang, S., Qian, X., Han, B.-P., Luo, L.-C. and Hamilton, D.P., 2012. Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China. *Water Research* 46, 2591-2604.
- Winslow, L., Read, J., Woolway, R., Brentrup, J., Leach, T. and Zwart, J., 2016. rLakeAnalyzer: Lake Physics Tools. R package version 1.8.3.
- Woolway, R.I., Dokulil, M.T., Marszelewski, W., Schmid, M., Bouffard, D. and Merchant, C.J., 2017. Warming of Central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Climatic Change* 142, 505-520.
- Yao, H., Samal, N.R., Joehnk, K.D., Fang, X., Bruce, L.C., Pierson, D.C., Rusak, J.A., James, A. 2014. comparing ice and temperature simulations by four dynamic lake models in Harp Lake : past performance and future predictions. *Hydrol. Process.* 28, 4587-4601.

11. Liste des illustrations

Figure 1 : Distribution du nombre de profils mesurés par plan d'eau.....	7
Figure 2 : Distribution du nombre de mesures exploitables par année dans le jeu de données LakeSST.....	8
Figure 3 : Caractéristiques d'un cycle annuel de température de surface résumé par 3 variables : la température moyenne (T_m), l'amplitude du cycle annuel (A) et la phase du cycle annuel (φ).....	9
Figure 4 : Diagrammes de régression partielle de la MAET en fonction, de gauche à droite, de l'altitude, la latitude et la surface.....	9
Figure 5 : Diagrammes de régression partielle de l'amplitude du cycle thermique annuel de surface en fonction de l'altitude et le volume.....	10
Figure 6 : Diagrammes de régression partielle de la phase en fonction, de gauche à droite, de l'altitude, le volume et la profondeur maximale.....	10
Figure 7 : Température de l'épilimnion, de l'hypolimnion et différence de températures entre épilimnion et hypolimnion en été. La ligne bleue indique le lissage LOWESS des données pour les lacs naturels.	11

Figure 8 : Profondeur de la thermocline en été. La ligne bleue indique le lissage LOWESS des données pour les lacs naturels.	11
Figure 9 : Température de surface du Lac Léman le 19 août 2000.	12
Figure 10 : Médiane de l'écart type de la température superficielle des plans d'eau DCE français.	13
Figure 11 : Médiane d'amplitude de température de surface de chaque image de température superficielle des plans d'eau DCE français. Un point représente un seul plan d'eau.	13
Figure 12 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température moyenne de la colonne d'eau simulée avec GLM pour le cas de base.	21
Figure 13 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température moyenne de la colonne d'eau simulée avec GLM pour le cas de base, pour les plans d'eau de type retenue et pour le reste de types de plan d'eau.	22
Figure 14 : Erreur moyenne (ME), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation de la température de l'épilimnion et de l'hypolimnion simulées avec GLM pour le cas de base.	22
Figure 15 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température de l'épilimnion et de l'hypolimnion simulées avec GLM pour le cas de base par type de plan d'eau.	23
Figure 16 : Erreur moyenne (ME) et erreur quadratique moyenne (RMSE) de la température de l'épilimnion simulée avec GLM pour le cas de base par type de plan d'eau. Validation avec des données satellite.	24
Figure 17 : Température moyenne annuelle de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau français d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C).	Erreur ! Signet non défini.
Figure 18 : Degrés-jours au-dessus de 12 °C des plans d'eau français d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). La ligne noire représente la moyenne pour l'ensemble de plans d'eau.	25
Figure 19 : Température moyenne de la colonne d'eau des plans d'eau français par saison d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C).	25
Figure 20 : Différence de température entre l'épilimnion et l'hypolimnion des plans d'eau français pendant les semaines la plus chaude et la plus froide, d'après les simulations de base avec GLM (68 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C).	26
Figure 21 : Indicateurs de stratification des plans d'eau français, d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). La ligne noire représente la moyenne pour l'ensemble de plans d'eau.	26
Figure 22 : Profondeur de la thermocline des plans d'eau français par jour de l'année, d'après les simulations de base avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). La ligne noire représente la moyenne pour l'ensemble de plans d'eau.	27
Figure 23 : Différence de température maximale annuelle entre l'état "pure" et l'état "pire" pour tous les 87 plans d'eau où $RMSE < 2$ °C, d'après les simulations avec GLM. Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.	28
Figure 24 : Différence sur le nombre de jours de stratification directe entre le cas "pure" et l'état "pire", d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.	29
Figure 25 : Différence sur la profondeur de la thermocline entre le cas "pure" et l'état "pire", d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.	29
Figure 26 : Différence de température maximale entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.	30
Figure 27 : Différence du numéro de jours avec stratification positive entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.	31
Figure 28 : Différence de température maximale de l'épilimnion entre les seuils Très Bon/Bon et Médiocre/Mauvais, d'après les simulations avec GLM (87 plans d'eau avec $RMSE \leq 2$ °C). Chaque point indique une valeur par année et plan d'eau.	31
Figure 29 : Température de l'épilimnion (Tepi_GLM) et de l'hypolimnion (Thyp_GLM) simulée à l'échelle journalière par GLM et mesures in situ du réseau RCS-RCO (Tepi_field, Thyp_field) sur la période 1970-2015 pour le lac Gérardmer (GER88).	32
Figure 30 : Indicateurs de température maximale annuelle (T_max_yr), température maximale de l'épilimnion (Tepi_max_yr) et nombre annuel de jours de stratification directe (str_n) sur la période 1970-2015 pour le lac Gérardmer pour les cas « pure » et « pire » (worst), et pour les seuils Très Bon/Bon (TBB) et Médiocre/Mauvais (MeMa).	33
Figure 31 : Distribution (boîtes à moustache) d'après les simulations avec GLM des valeurs de trois indicateurs pour le plan de gestion 2010-2015 pour le lac Gérardmer pour les cas « pure » et « pire » (worst), et pour les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) : température maximale annuelle de la colonne d'eau (T_max_yr), température maximale annuelle de l'épilimnion (Tepi_max_yr) et nombre de jours de stratification directe (str_n), En couleur est indiquée la distribution de valeurs pour la simulation de base : médiane (ligne rouge), rang interquartile (zone rose) et point le plus extrême $\leq 1,5$ (ligne rouge à tirets,	

équivalent des moustaches des boîtes à moustache).....	34
Figure 32 : Distribution (boîtes à moustache) d'après les simulations avec GLM pour le lac Gérardmer des écarts de trois indicateurs par rapport au cas « pure » pour le plan de gestion 2010-2015 pour les cas « pure » et « pire » (worst), et pour les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) : température maximale annuelle de la colonne d'eau (T_max_yr), température maximale annuelle de l'épilimnion (Tepi_max_yr) et nombre de jours de stratification directe (str_n), Valeurs-seuils calculés pour les seuils Bon/Moyen (B/Mo) et Moyen/Médiocre (Mo/Me). En couleur est indiquée la distribution de valeurs pour la simulation de base : médiane (ligne rouge), rang interquartile (zone rose) et point le plus extrême $\leq 1,5$ (ligne rouge à tirets, équivalent des moustaches des boîtes à moustache).....	34
Figure 33 : Seuils de température pour la température maximale annuelle de colonne d'eau en fonction de la profondeur du plan d'eau (A) ; et différence de température entre les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) en fonction de la profondeur du plan d'eau (B), du RMSE (C) et du type de plan d'eau (D). Résultats d'après les simulations avec GLM sur la période 2010-2015. Les types de plans d'eau sont lac naturel (LN), retenue (R), étang (E) et gravière (G).....	35
Figure 34 : Seuils de température pour la température maximale annuelle de l'épilimnion en fonction de la profondeur du plan d'eau (A) ; et différence de température entre les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) en fonction de la profondeur du plan d'eau (B), du RMSE (C) et du type de plan d'eau (D). Résultats d'après les simulations avec GLM sur la période 2010-2015. Les types de plans d'eau sont lac naturel (LN), retenue (R), étang (E) et gravière (G).....	36
Figure 35 : Seuils pour le nombre de jours de stratification en fonction de la profondeur du plan d'eau (A) ; et différence de température entre les seuils Très Bon/Bon (TB/B) et Médiocre/Mauvais (Me/Ma) en fonction de la profondeur du plan d'eau (B), du RMSE (C) et du type de plan d'eau (D). Résultats d'après les simulations avec GLM sur la période 2010-2015. Les types de plans d'eau sont lac naturel (LN), retenue (R), étang (E) et gravière (G).....	36

AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ

Établissement public du ministère de l'Environnement



Agence Française pour la Biodiversité

Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.afbiodiversite.fr

Irstea

1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex

01 40 96 61 21

www.irstea.fr