



**HAL**  
open science

# Évolution des températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau DCE nationaux

J. Prats, P.A. Danis

► **To cite this version:**

J. Prats, P.A. Danis. Évolution des températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau DCE nationaux. [Rapport de recherche] irstea. 2017, pp.34. hal-02607210

**HAL Id: hal-02607210**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02607210>**

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 Biodiversité, État et fonctionnement des écosystèmes  
aquatiques - Action n° 13**



# **Évolutions des températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau DCE nationaux**

**Rapport intermédiaire**

**Jordi PRATS RODRÍGUEZ (Iristea)**

**Pierre- Alain DANIS (AFB)**

**Décembre 2017**



- **AUTEURS**

**Jordi PRATS RODRÍGUEZ**, ingénieur de recherche (Irstea, UR RECOVER, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), [jordi.prats@irstea.fr](mailto: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](mailto: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](mailto:pierre-alain.danis@afbiodiversite.fr)

**Irstea : Martin DAUFRESNE**, chargé de recherche (Irstea, UR RECOVER, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), [martin.daufresne@irstea.fr](mailto:martin.daufresne@irstea.fr)

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

**Florentina MOATAR**, professeur (Université François-Rabelais, Département Géosciences environnement, Laboratoire GÉHCO), [florentina.moatar@univ-tours.fr](mailto:florentina.moatar@univ-tours.fr)

**Thierry POINT**, ingénieur d'études (Irstea, UR RECOVER, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), [thierry.point@irstea.fr](mailto:thierry.point@irstea.fr)

**Nathalie REYNAUD**, ingénieure d'études (Irstea, UR RECOVER, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), [nathalie.reynaud@irstea.fr](mailto:nathalie.reynaud@irstea.fr)

**Vincent ROUBEIX**, ingénieur de recherche (Irstea, UR RECOVER, équipe FRESHCO, Pôle de Recherche & Développement AFB-Irstea « Hydroécologie des plans d'eau »), [vincent.roubeix@irstea.fr](mailto:vincent.roubeix@irstea.fr)

**Droits d'usage** : Accès libre

**Niveau géographique** : National

**Couverture géographique** : France métropolitaine

**Niveau de lecture** : Professionnels, experts



**Évolution des  
températures de  
l'épilimnion et de  
l'hypolimnion des plans  
d'eau DCE nationaux**

**Rapport intermédiaire**

J. Prats-Rodríguez, P.-A.  
Danis

**AGENCE FRANÇAISE  
POUR LA BIODIVERSITÉ**

*Établissement public du ministère de l'Environnement*

- **RÉSUMÉ**

La température de l'eau est une des variables physiques les plus importantes pour les organismes des écosystèmes d'eau douce. Sa distribution verticale dans les plans d'eau, en plus, donne lieu à des gradients physico-chimiques, affectant d'autres variables tout aussi importantes comme la concentration en oxygène dissous. Par ailleurs, la température de l'eau et la concentration en oxygène dissous sont 2 des 6 paramètres physico-chimiques soutenant les paramètres biologiques dans la Directive Cadre européenne sur l'Eau et doivent être prises en compte dans l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau. L'action de l'AFB 2016-2018 numéro 13, vise à la détermination des valeurs-seuils et des conditions de référence pour la température de l'eau et l'oxygène dissous.

La détermination des valeurs-seuil et conditions de référence pour la température de l'eau doit prendre en compte les variabilités interannuelle et intra-annuelle d'origine naturelle, et, s'il y a lieu, les contraintes techniques obligatoires dérivées de la gestion des plans d'eau. Cette analyse doit être fondée sur les données disponibles et sur les connaissances du fonctionnement physique des écosystèmes lacustres. Pour optimiser l'utilisation des données disponibles (généralement rares et discrètes temporellement à l'échelle des plans d'eau DCE) et l'exploitation des connaissances actuelles en limnologie physique, la solution envisagée est l'utilisation de modèles hydrodynamiques à base physique, en particulier du modèle GLM : General Lake Model.

Les modèles hydrodynamiques sont des outils qui permettent de simuler le comportement thermique et hydrodynamique d'un plan d'eau à partir des données météorologiques, hydrologiques, hydromorphologiques et de transparence de l'eau. Mais les modèles sont des approximations de la réalité et donc limités. Ses limitations dérivent soit des données d'entrée (biais, erreurs des mesures, fréquence des mesures, etc.) soit du modèle en lui-même (implémentation du modèle, bugs non détectés, paramétrisation des phénomènes physiques...). Et l'incertitude due à ces limitations doit être prise en compte dans l'interprétation de leurs prédictions.

Ce rapport présente l'application du modèle GLM à la simulation du comportement hydrodynamique de l'ensemble de plans d'eau DCE. D'abord, les options de configuration choisies sont présentées, ainsi que les modèles utilisés pour estimer la température des tributaires et la courbe hypsométrique des plans d'eau. Ensuite, des résultats préliminaires, sans calibration du modèle, sont présentés. L'effet de l'utilisation de données hypsométriques estimées au lieu des bathymétries mesurées est aussi analysé.

- **MOTS CLÉS (THÉMATIQUE ET GÉOGRAPHIQUE)**

GLM ; Modélisation ; Plans d'eau ; Température de l'eau



- **EVOLUTION OF EPILIMNION AND HYPOLIMNION TEMPERATURES OF FRENCH WFD WATER BODIES**

- **ABSTRACT**

Water temperature is one of the most important physical variables for freshwater ecosystem organisms. Its vertical distribution in water bodies also gives rise to physicochemical gradients, affecting other equally important variables such as dissolved oxygen concentration. Furthermore, water temperature and dissolved oxygen concentration are 2 of the 6 physicochemical parameters supporting the biological parameters in the European Water Framework Directive and must be taken into account in the assessment of the state of water bodies. The 2016-2018 number CK Onema action, aims at the determination of the threshold values and the reference conditions for water temperature and dissolved oxygen.

The determination of threshold values and reference conditions for water temperature must take into account the interannual and intra-annual variability of natural origin and, where appropriate, the mandatory technical constraints derived from the management of water bodies. This analysis should be based on available data and knowledge of the physical functioning of lake ecosystems. To optimize the use of available data (generally rare and at discrete times for WFD water bodies) and the exploitation of existing knowledge in physical limnology, the proposed solution is the use of hydrodynamic models physically based, especially GLM: General Lake Model.

Hydrodynamic models are tools that simulate the thermal and hydrodynamic behavior of a water body using meteorological, hydrological, hydromorphological and water transparency data. But models are approximations of reality and therefore limited. Their limitations derive either from the input data (bias, measurement errors, measurement frequency, etc.) or from the model itself (model implementation, undetected bugs, parametrization of physical phenomena, etc.). And the uncertainty due to these limitations must be taken into account when interpreting their predictions.

This report presents the application of the model GLM to the simulation of the hydrodynamic behaviour of the overall set of WFD water bodies. First, the configuration options are presented, as well as the models used to estimate the inflow temperature and hypsometric curve. Then, preliminary results, without calibration of the model, are presented. The effect of the use of estimated hypsometric data instead of measured bathymetries is also analysed.

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

GLM; Inland water bodies; Modelling; Water temperature



• **SOMMAIRE**

<b>1. Introduction</b>	8
<b>2. Aire d'étude</b>	9
<b>3. La modélisation avec GLM</b>	10
3.1. Le modèle GLM	10
3.2. Configuration de GLM	10
3.3. Bathymétrie	11
3.4. Forçage du modèle GLM	12
3.4.1. Données météorologiques	12
3.4.2. Débits d'entrée	12
3.4.3. Température de l'eau des tributaires	12
3.4.4. Débits de sortie	14
3.4.5. Transparence	14
3.4.6. Conditions initiales	15
<b>4. Évaluation de la qualité des simulations avec GLM</b>	15
4.1. Profils du réseau RCS-RCO	15
4.2. Données du jeu de données LakeSST	15
<b>5. Résultats et Discussion</b>	16
5.1. Qualité des simulations de GLM sous la configuration de base	16
5.2. Effet de la courbe hypsométrique	19
5.3. Effet de la température des tributaires	20
<b>6. Conclusion</b>	21
<b>7. Sigles &amp; Abréviations</b>	22
<b>8. Bibliographie</b>	23
<b>9. Table des illustrations</b>	25
<b>10. Annexe 1 : Exemple de fichier de configuration de GLM pour le lac d'Annecy (ANN74)</b>	26

- **ÉVOLUTIONS DES TEMPÉRATURES DE L'ÉPILIMNION ET DE L'HYPOLIMNION DES PLANS D'EAU DCE NATIONAUX**

## 1. Introduction

La température de l'eau et l'oxygène dissous sont deux 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 (dont le taux d'oxygénation) de l'eau. Ces variables font 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.

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, non seulement d'origines naturelles, i.e. en réponses aux forçages externes hydro-climatiques, mais des variabilités 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. a 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 renseignent 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, 2015; 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. En effet, Read et al. (2014) ont montré récemment que le modèle mécaniste GLM peut être appliqué à large échelle avec une erreur d'estimation acceptable (RMSE = 1.74 °C) des températures en surface. Par contre, pour le modèle semi-empirique FLake, une

calibration a été nécessaire pour avoir des résultats acceptables pour une application à l'échelle mondiale (Layden, MacCallum et Merchant, 2016).

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 et d'oxygène dissous. 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).

Le premier rapport (Prats Rodríguez et Danis, 2016) de l'action AFB n° 13 2016-2018 présentait le modèle General Lake Model (GLM) ainsi que l'évaluation de la performance du modèle sur plusieurs hypothèses sur trois sites pilotes. Dans ce deuxième rapport, l'évaluation de la performance du modèle est réalisée sur l'ensemble des plans d'eau DCE en utilisant des options de configuration homogènes pour tous les plans d'eau.

## 2. Aire d'étude

L'action n° 13 de l'AFB porte sur la définition des valeurs-seuils et conditions de référence par rapport à la température et la concentration en oxygène des plans d'eau français classés DCE et situés en France métropolitaine. Les plans d'eau DCE correspondent aux plans d'eau de plus de  $\sim 0,5 \text{ km}^2$ , pour lesquels une évaluation de l'état est obligatoire en accord avec les dispositions nationales de la Directive Cadre européenne sur l'Eau 2000/60/CE. Ce projet porte sur un total de 475 plans d'eau dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 1.

*Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et environnementales des plans d'eau français classés DCE. Source des données : Base de données PLAN\_DEAU.*

VARIABLE	UNITÉ	MINIMUM	MÉDIANE	MAXIMUM
Altitude	m	0,0	239,5	2841,0
Latitude	°	41,47	46,25	50,87
Longitude	°	-4,24	2,33	9,48
Profondeur maximale	m	0,8	15,0	309,7
Surface maximale	$\text{m}^2$	$6,0 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^8$
Volume maximale	$\text{m}^3$	$1,2 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^6$	$8,9 \cdot 10^{10}$
Continentalité	km	0,01	238,25	618,05
Marnage théorique	m	0,0	4,0	135,0
Périmètre	m	1197	7544	187501
Temps de séjour	années	0,003	0,203	13,959

### 3. La modélisation avec GLM

Le modèle GLM a été utilisé pour simuler le comportement thermique de tous les plans d'eau classés DCE pour la période 1999-2016. Cette partie présente le modèle et les données nécessaires à la modélisation. Une description détaillée est disponible dans le rapport de Prats Rodríguez et Danis (2016).

#### 3.1. 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 2.4 a été publiée en novembre 2017 (Hipsey et al., 2017). 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; Snorheim et al., 2017; Yao et al., 2014).

Une des limitations de la présente version 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.

#### 3.2. Configuration de GLM

Un exemple de fichier de configuration utilisé pour le lac d'Annecy est reproduit dans l'Annexe 1 dont les principales options de configuration choisies sont :

- La période de simulation est comprise entre le 1 janvier 1999 (`start = '1999-01-01 00:00:00'`) et le 31 juillet 2008 (`stop = '2008-07-31 23:00:00'`), avec un pas de temps d'une heure (`dt = 3600`). La date finale est limitée par la disponibilité des données de débit (v. section 3.4).
- 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`).
- 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.`).

### 3.3. Bathymétrie

Le modèle GLM nécessite des données de bathymétrie du plan d'eau simulée par une courbe hypsométrique (profondeur-surface de la lame d'eau). Pour la plupart des plans d'eau étudiés ces données ne sont pas disponibles, mais seulement des données de profondeur, surface et volume maximales. Plusieurs méthodes ont été proposées pour estimer la courbe hypsométrique à partir des données de profondeur, surface et volume maximale (Johansson, Brolin et Håkanson, 2007; Junge, 1966). Nous avons comparé les estimations de plusieurs de ces méthodes avec les courbes hypsométriques de 181 plans d'eau tirées de relevés bathymétriques et disponibles dans la base PLAN\_DEAU. Les méthodes sont décrites dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Formules pour estimer les courbes hypsométriques des plans d'eau, avec

$$z' = z / z_{\max} \text{ et } V_d = \frac{3V_{\max}}{S_{\max} z_{\max}}.$$

ÉQ. NUMBER	ÉQUATION	REFERENCE
B1	$S(z') = pz'^2 + (1-p)z'$ $p = 2V_d$	Junge (1966)
B2	$S(z) = S_{\max} \left[ \frac{z_{\max} - z}{z_{\max} + z \exp(3 - V_d^{1.5})} \right]^{\frac{0.5}{V_d}}$	Johansson et al. (2007)
B3	$S(z) = S_{\max} \left( \frac{H_d^{-z/z_{\max}} - H_d^{-1}}{1 - H_d^{-1}} \right)^2$ $H_d(b) = 10^{(1.6b^4 - 2.1b^3 - 1.2b^2 - 3.92b)}$ <p style="text-align: center;">pour <math>0.20 \leq V_d \leq 0.55</math></p> $H_d(b) = 10^{(-34b^5 - 18b^4 - 6.3b^3 - 1.9b^2 - 4b)}$ <p style="text-align: center;">pour <math>0.55 \leq V_d \leq 1.85</math></p> $H_d(b) = 10^{(-1926b^5 + 2717b^4 - 1550b^3 + 44326b^2 - 639.51b + 36.442)}$ <p style="text-align: center;">pour <math>1.85 \leq V_d \leq 2.40</math></p> $H_d(b) = 10^{(-307764b^5 + 602898b^4 - 472871.45b^3 + 18557296b^2 - 36432944b + 286194)}$ <p style="text-align: center;">pour <math>2.40 \leq V_d \leq 2.70</math></p> $b = \log(V_d)$	Johansson et al. (2007)
B4	$S(z) = S_{\max} \left[ (1 - z') \left( 1 + z' \sin \sqrt{z'} \right) \right]^{f(V_d)}$ $f(V_d) = 1.7V_d^{-1} + 2.5 - 2.4V_d + 0.23V_d^3$	Johansson et al. (2007)

Les résultats des tests montrent que ce sont les bathymétries estimées avec la méthode B3 qui s'approchent le plus des bathymétries relevées sur le terrain. Ces estimations sont obtenues à partir de la profondeur ( $z_{max}$ ), surface ( $S_{max}$ ) et volume ( $V_{max}$ ) maximales des bathymétries mesurées. Par contre, l'analyse montre aussi qu'il y a des grandes différences entre les valeurs de  $z_{max}$ ,  $S_{max}$  et  $V_{max}$  des bathymétries et les valeurs de la base PLAN\_DEAU. Des différences importantes avaient déjà remarquées entre les surfaces et volumes de la base PLAN-DEAU et leur valeur dans la base SIOUH (Prats Rodríguez et Danis, 2016). L'effet de ces incohérences sur les simulations hydrodynamiques sera analysé en comparant les résultats de simulations faites en utilisant des bathymétries mesurées et les résultats de simulations faites en appliquant la méthode B3 aux données de  $z_{max}$ ,  $S_{max}$  et  $V_{max}$  de la base PLAN\_DEAU.

### 3.4. Forçage du modèle GLM

#### 3.4.1. Données météorologiques

Les données météorologiques de forçage utilisées sont celles des réanalyses 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 sur la période du 1 août 1958 au 31 juillet 2016. Une correction adiabatique de  $-0,0065$  °C/m a été appliquée à la température de l'air pour ajuster la température de l'air entre l'altitude de la grille SAFRAN la plus proche et l'altitude des lacs.

#### 3.4.2. Débits d'entrée

Il avait été prévu d'utiliser les données de débit calculées avec le modèle de Garcia (2016). Or comme ces données ne sont finalement pas disponibles, les données calculées par le modèle Loieau ont été utilisées. Par contre, les données Loieau ne sont disponibles que jusqu'au 31 juillet 2008. Quand les données du modèle de Garcia (2016) seront disponibles elles seront incorporées au forçage de GLM, ce qui permettra de prolonger la période de calcul jusqu'à 2016.

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.

#### 3.4.3. Température de l'eau des tributaires

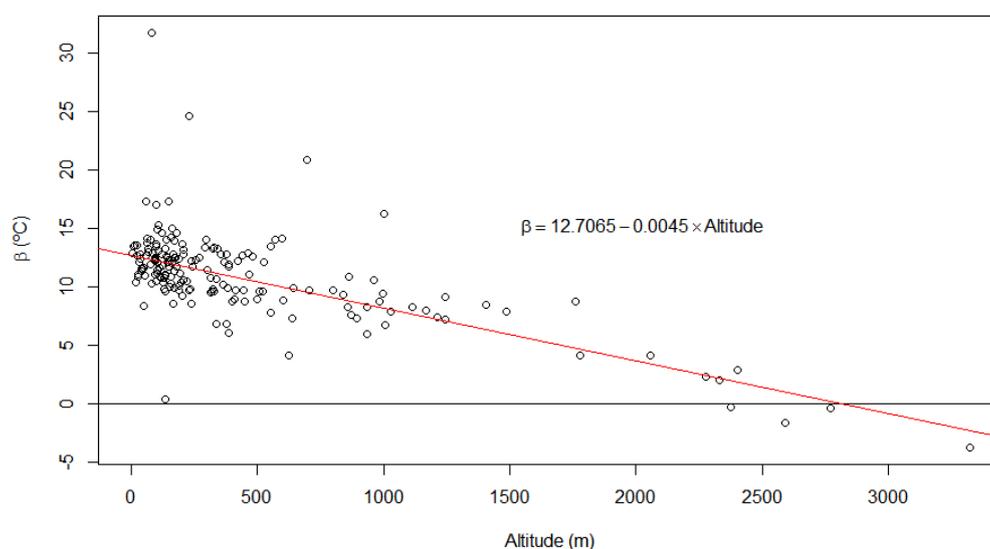
La température des tributaires a potentiellement un effet important sur le comportement thermique et hydrodynamique d'un plan d'eau (Råman Vinnå, Wüest, Zappa, Fink et Bouffard, 2018). Malheureusement, rares sont les plans d'eau avec des mesures de température des tributaires suffisamment proches. Cette situation nous oblige donc à modéliser la température des tributaires.

La température de l'eau des tributaires à un plan d'eau dépend de la température à l'amont et des conditions climatiques locales. L'influence relative de chaque facteur est conditionnée par le débit : à plus hauts débits, l'influence de la température à l'amont est plus importante. Comme une simulation mécaniste de la température des tributaires des plans d'eau n'est pas simple, nous avons essayé un modèle de régression sigmoïde (Mohseni, Stefan et Erickson, 1998) :

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

où  $T_e$  est la température de l'eau,  $T_a$  est la température de l'air et  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\mu$  sont des paramètres de calage.

Nous avons essayé de régionaliser le modèle sigmoïde en utilisant les données du Réseau National de suivi des Températures (RNT), qui mesure la température de nombreux cours d'eau français en continu. Pour cela, nous avons cherché des corrélations entre les valeurs des paramètres de calage et des variables environnementales (e.g. altitude, latitude, température de l'air, humidité relative, précipitation liquide, précipitation solide, vitesse du vent, rayonnement solaire). Le paramètre  $\beta$  est le seul qui est bien corrélé avec des variables environnementales. En particulier, il y a une corrélation négative entre l'altitude et le paramètre  $\beta$  (Figure 1). Les autres paramètres sont bien corrélés entre eux, mais pas avec les variables environnementales, raison pour laquelle nous avons pris des valeurs constantes pour ces paramètres :  $\alpha = 20.86$ ,  $\gamma = 0.1968$  et  $\mu = 3.512$ .

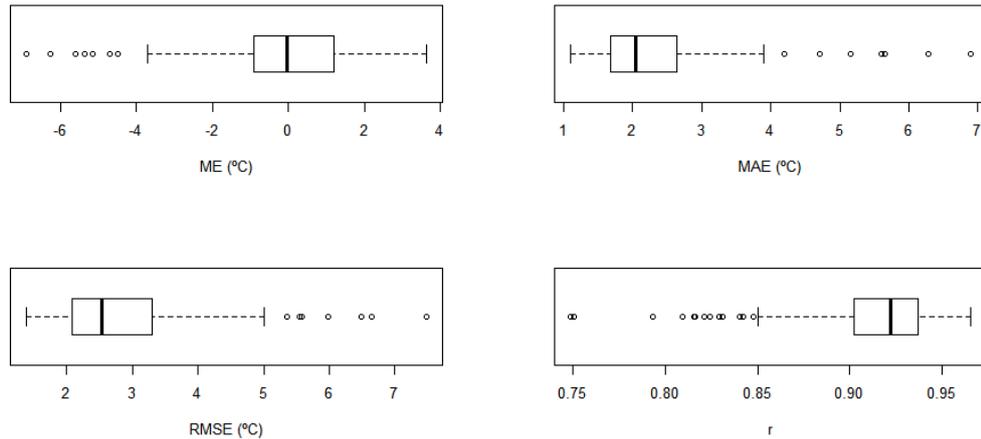


© Irstea

Figure 1 : Corrélation entre altitude et le paramètre de calage  $\beta$  du modèle de Mohseni et al. (1998).

Source des données : AFB et Irstea

En général la qualité des simulations de ce simple modèle sont raisonnable (Figure 2), avec des hauts coefficients de corrélation et des RMSE inférieurs à 3 °C la plupart de cas. Il est peut-être possible d'améliorer la régionalisation en utilisant d'autres variables environnementales comme par exemple la distance à la source, l'utilisation du sol ou la présence d'altérations thermiques à l'amont.



© Irstea

Figure 2 : Indicateurs de performance du modèle de prédiction de la température de l'eau des cours d'eau sur 182 stations du réseau RNT (ME : erreur moyenne ; MAE : erreur absolue moyenne ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne ; r : coefficient de corrélation).

Source des données : AFB et Irstea

### 3.4.4. Débits de sortie

Pour les retenues, on suppose 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.

### 3.4.5. Transparence

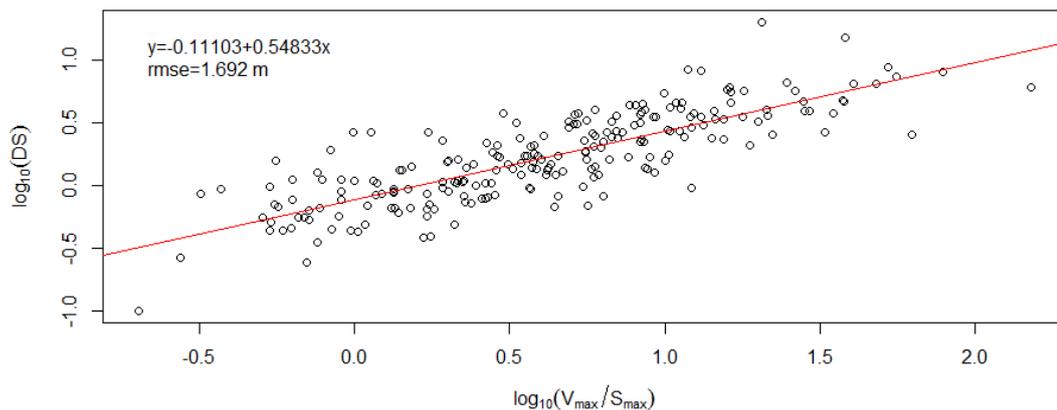
Initialement il était prévu d'utiliser données de transparence obtenues à partir d'images satellites. Or ces données ne sont pas encore disponibles. On a calculé la transparence à partir de mesures du disque de Secchi ( $DS$ ) comme :

$$\eta = 1.7 / DS$$

On a utilisé une valeur constante de transparence, 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) (Figure 3).



© Irstea

Figure 3 : Régression de la profondeur du disque de Secchi ( $DS$ ) en fonction de la profondeur moyenne du plan d'eau ( $V_{max}/S_{max}$ ).

Source des données : AFB et Irstea

### 3.4.6. Conditions initiales

On suppose un profil initial de température homogène hivernal de longueur égale à  $Z_{max}$  et de température moyenne des mois de Décembre et Janvier estimée à partir de la régression des données d'images satellitaires thermiques (Prats et Danis, 2015) :

$$T_{Dec-Jan} = -0.359Lat - 0.00215Alt - 0.00510Cont + 0.367 \ln(S_{max}) + 17.2$$

où  $Lat$  est la latitude ( $^{\circ}$  N),  $Alt$  est l'altitude (m) et  $Cont$  est la continentalité (km) du plan d'eau.

## 4. Évaluation de la qualité des simulations avec GLM

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.

### 4.1. Profils du réseau RCS-RCO

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.

### 4.2. Données du jeu de données LakeSST

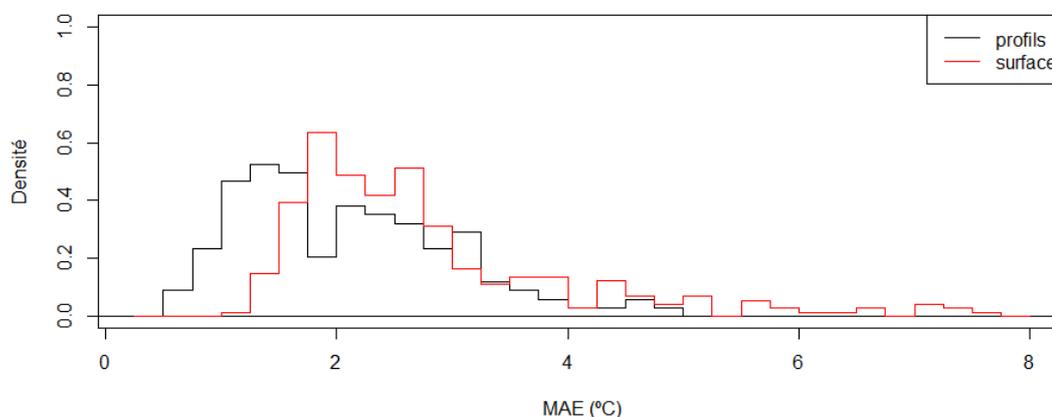
Les mesures de température superficielle du jeu de données LakeSST (Prats et al.,

2017) 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. En accord avec les résultats de l'analyse de qualité des données (Prats et al., 2017), seules les données des jours où l'index de transparence atmosphérique était supérieur à 0,6 ont été utilisées pour éviter des erreurs dues à la présence de nuages.

## 5. Résultats et Discussion

### 5.1. Qualité des simulations de GLM sous la configuration de base

Sous la configuration de base définie dans la section 3, les simulations ont une qualité acceptable dans une grande partie des cas. Dans 95% des plans d'eau l'erreur absolue moyenne (MAE) des simulations est inférieure à 3,5 °C pour les profils et est inférieure à 5,3 °C pour les températures de surface satellitaires (Figure 4). L'erreur est plus importante pour l'estimation des températures de surface que pour les profils verticaux. La MAE médiane est 1,7 °C pour les profils et 2,2 °C pour les températures de surface. Bien que 13% plans d'eau ont des MAE des températures de surface supérieures à 4 °C, les résultats sont prometteurs compte tenu des limitations des données de forçage et que ces simulations ont été réalisées sans aucun type de calage.

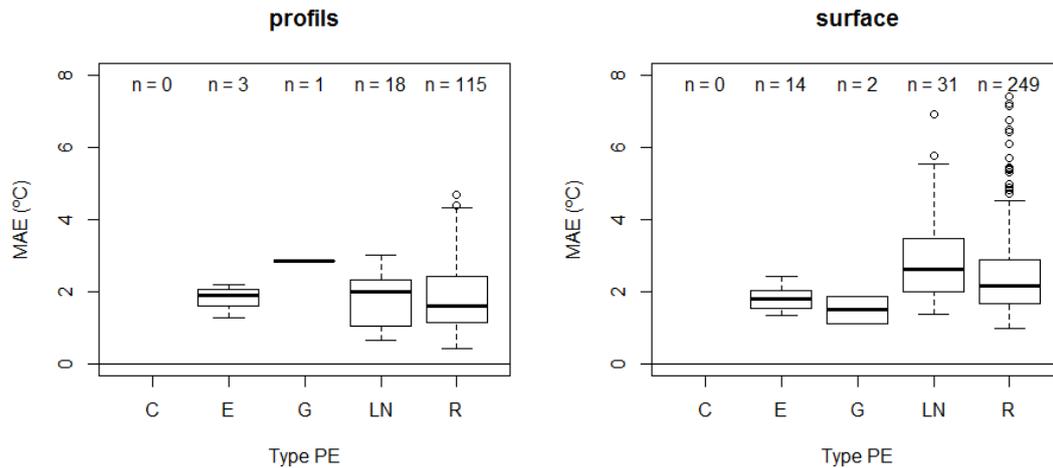


© Irstea

Figure 4 : Performance du modèle GLM par rapport aux profils mesurés (en noir) et aux températures de surface mesurées (en rouge).

Source des données : AFB et Irstea

Une analyse de l'erreur par type de plan d'eau (Figure 5) ne montre pas de différences statistiquement significatives entre les types pour la MAE des profils. Mais il y a des différences significatives entre les types pour la MAE des températures de surface satellitaires.

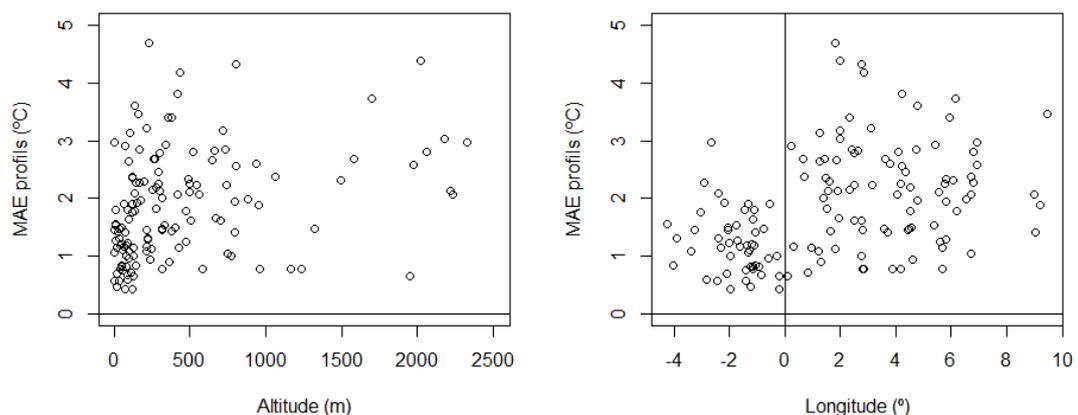


© Irstea

Figure 5 : Performance du modèle GLM par type de plan d'eau par rapport aux profils mesurés (à gauche) et aux températures de surface satellitaires (à droite).

Source des données : AFB et Irstea

Dans le cas des profils, la MAE est corrélée avec l'altitude ( $\tau$  de Kendall = 0,278,  $p$ -valeur =  $1,5 \cdot 10^{-6}$ ) et la longitude ( $\tau$  de Kendall = 0,272,  $p$ -valeur =  $2,5 \cdot 10^{-6}$ ) (Figure 6). La corrélation de la MAE des profils simulés avec l'altitude est due en grande partie à une agglomération de plans d'eau avec une basse erreur (< 2 °C) à basses altitudes (< 200 m). Par rapport à la longitude, on observe une différence entre la MAE à l'est et à l'ouest du méridien de Greenwich, avec des erreurs plus importantes à l'est. C'est un reflet de la relation antérieure, puisque la plupart des plans d'eau situés à l'ouest du méridien 0 sont à basse altitude.



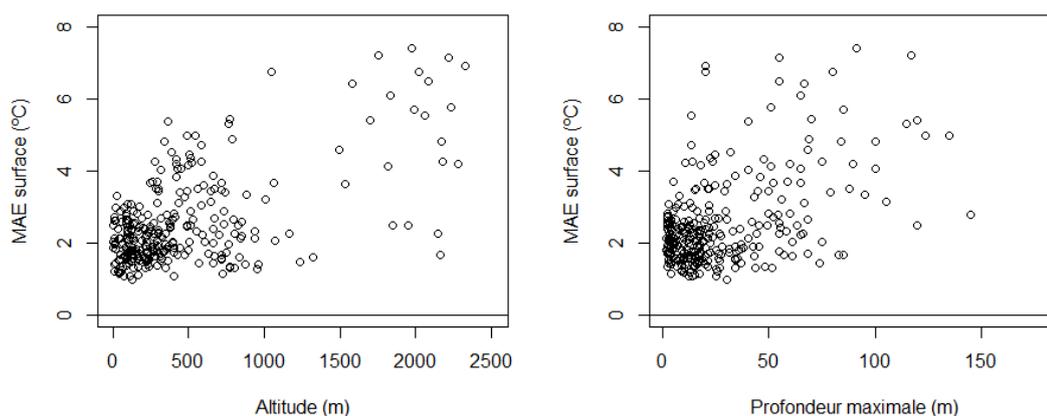
© Irstea

Figure 6 : MAE des profils simulés en fonction de l'altitude (à gauche) et de la longitude (à droite) du plan d'eau.

Source des données : AFB et Irstea

On retrouve une relation de la MAE avec l'altitude pour les températures de surface ( $\tau$  de Kendall = 0,261,  $p$ -valeur =  $2,6 \cdot 10^{-11}$ ) (Figure 7). On voit plus clairement dans ce cas une erreur plus grande pour les plans d'eau d'altitude plus élevée. Il y a aussi une

relation de la MAE avec la profondeur maximale ( $\tau$  de Kendall = 0,213,  $p$ -valeur =  $5,4 \cdot 10^{-8}$ ), avec des erreurs plus importantes pour des plans d'eau plus profonds. Mais il faut rappeler que l'altitude et la profondeur sont aussi corrélées entre elles ( $\tau$  de Kendall = 0,422,  $p$ -valeur  $< 2,2 \cdot 10^{-16}$ ) : les plans d'eau les plus profonds se trouvant à hautes altitudes, et à basses altitudes les plans d'eau sont peu profonds. Excepté pour les plans d'eau moins profonds/à basse altitude (*i.e.*  $Z_{max} < 40$  m et altitude  $< 500$  msnm), les simulations de GLM tendent à donner des températures de la surface trop élevées et l'effet est plus important pour les plans d'eau plus profonds/à altitudes plus élevées (*i.e.*  $Z_{max} > 40$  m et altitude  $> 500$  msnm).



© Irstea

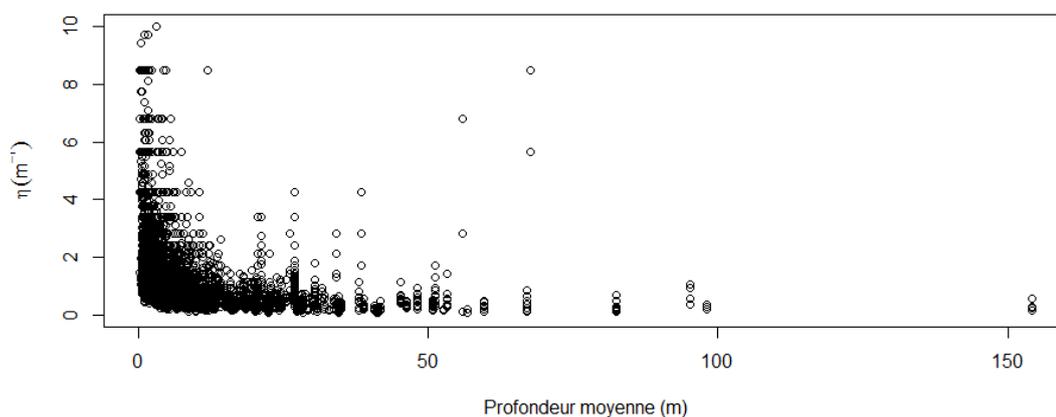
Figure 7 : MAE des températures de surface simulées en fonction de l'altitude (à gauche) et de la profondeur maximale (à droite) du plan d'eau.

Source des données : AFB et Irstea

Il est pour l'instant difficile de préciser la cause des relations observées entre l'erreur des simulations et l'altitude ou la profondeur maximale, mais il est possible de signaler plusieurs hypothèses à explorer par la suite :

- Prats et Danis (2015) montraient déjà, avec plusieurs modèles différents, que l'erreur des simulations tendait à augmenter avec la profondeur du plan d'eau. Pour les plans d'eau peu profonds il n'y a pas de stratification ou elle est faible, et la dynamique du système est plus simple. Pour les plans d'eau profonds, la stratification rend le fonctionnement du système plus complexe à modéliser comme par la répartition de l'énergie sur la verticale.
- Le modèle GLM utilise une pression atmosphérique constante de 1013 hPa. Par contre, la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Dans GLM, la pression atmosphérique est utilisée pour calculer la densité de l'air et dans le calcul de l'évaporation. Ainsi, une surestimation de la pression atmosphérique a un effet immédiat sur le calcul de la chaleur latente et sensible échangée entre la surface de l'eau et l'atmosphère. Ça pourrait expliquer le réchauffement de la surface des plans d'eau en altitude.
- Il pourrait y avoir des biais dans les données de forçage utilisées. Par exemple, il y a des biais positifs importants de la température estimée par SAFRAN dans le sud des Alpes (Quintana-Seguí et al., 2008).
- Les modèles hydrodynamiques sont très sensibles à la valeur du coefficient

d'extinction de la lumière  $\eta$  quand celui-ci prend des valeurs basses ( $\eta < 0,5 \text{ m}^{-1}$ , eaux claires) (Heiskanen et al., 2015; Henderson-Sellers, 1988). Le coefficient  $\eta$  diminue avec la profondeur du plan d'eau (les eaux sont plus claires pour les plans d'eau les plus profonds, *Figure 8*). On espère donc que les effets des erreurs dans l'estimation du disque de Secchi soient plus importants pour les plans d'eau plus profonds.



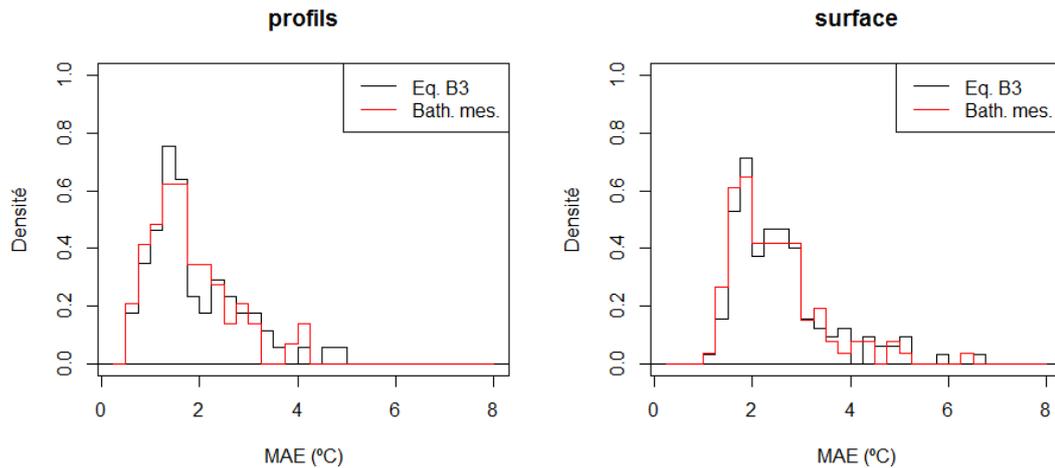
© Irstea

Figure 8 : Index d'extinction de la lumière ( $\eta$ ) en fonction de la profondeur moyenne du plan d'eau. La limite supérieure de l'axe des ordonnées a été limitée à  $10 \text{ m}^{-1}$  pour faciliter la visualisation des patrons.

Source des données : AFB et Irstea

## 5.2. Effet de la courbe hypsométrique

Dans cette section, on compare les simulations réalisées en utilisant la courbe hypsométrique estimée avec 1) le modèle B3 et les données de  $S_{max}$  et  $V_{max}$  de la base PLAN\_DEAU (cf. section 3.3) ou avec 2) les bathymétries mesurées. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences importantes entre les deux cas (*Figure 9*). Pour les profils, la MAE médiane est  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  quand on utilise les courbes hypsométriques estimées avec  $S_{max}$  et  $V_{max}$  de la base et la MAE médiane est  $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$  quand on utilise les courbes hypsométriques issues des bathymétries. Pour les températures de surface, la MAE médiane est  $2.1 \text{ }^\circ\text{C}$  quand on utilise les courbes hypsométriques estimées avec  $S_{max}$  et  $V_{max}$  de la base et la MAE médiane est  $2.0 \text{ }^\circ\text{C}$  quand on utilise les courbes hypsométriques issues des bathymétries.



© Irstea

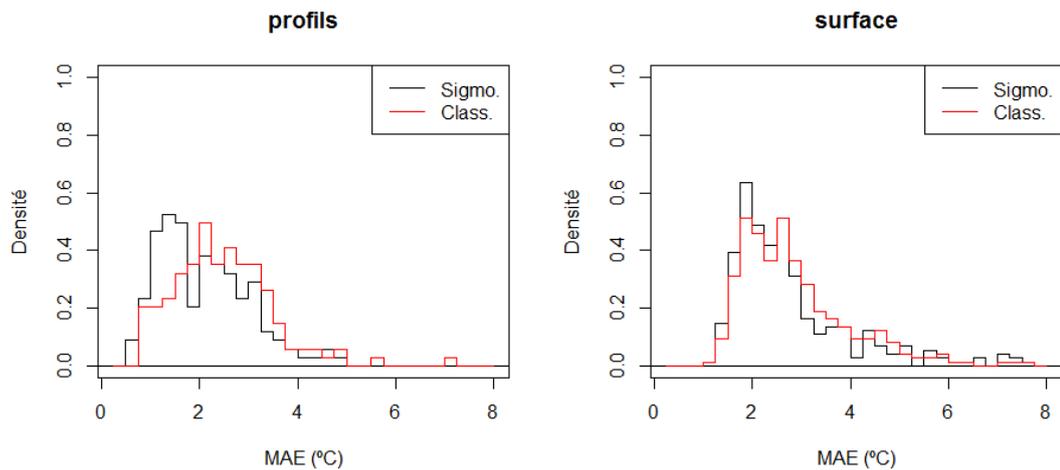
Figure 9 : MAE des températures de surface simulées en fonction du type de courbe hypsométrique utilisées : estimées avec  $S_{max}$  et  $V_{max}$  de la base (Eq. B3) ou mesurées (Bath. mes.).

Source des données : AFB et Irstea

Ces résultats indiquent qu'il y a d'autres variables qui affectent la qualité des simulations et qui ont un effet plus important que la bathymétrie.

### 5.3. Effet de la température des tributaires

On analyse ici l'effet du type d'estimation de la température des tributaires, en comparant les simulations faites avec les températures des tributaires estimées avec le modèle sigmoïde de Mohseni et al. (1998) régionalisé (section 3.4.3) et les simulations faites selon la classification de Maheu, Poff et St-Hilaire (2016) (Figure 10). Les résultats montrent des différences statistiquement significatives entre les deux cas pour la MAE des profils ( $p$ -valeur =  $3,9 \cdot 10^{-9}$ ) et la MAE de la température de surface ( $p$ -valeur =  $8,3 \cdot 10^{-6}$ ), d'après le test de Wilcoxon par paires. Le modèle sigmoïde est celui qui permet d'arriver à de meilleurs résultats : pour les profils, la MAE médiane est 1.7 °C quand on utilise le modèle sigmoïde et la MAE médiane est 2.2 °C quand on utilise le modèle de classification ; pour les températures de surface, la MAE médiane est 2.2 °C quand on utilise le modèle sigmoïde et la MAE médiane est 2.4 °C quand on utilise le modèle de classification. Les différences entre méthodes sont plus importantes pour la MAE des profils (différence de 0.38 °C en moyenne) que pour la MAE de la température de surface (différence de 0.08 °C en moyenne), ce qui indique que la température des tributaires a plus d'effet sur la distribution verticale de températures que sur la température de surface.



© Irstea

Figure 10 : MAE des températures de surface simulées en fonction du modèle utilisé pour estimer la température des tributaires : modèle sigmoïdal (Sigmo.) ou le modèle de classification de Maheu et al. (2016) (Class.).

Source des données : AFB et Irstea

## 6. Conclusion

Bien que pour un nombre considérable des cas les simulations de GLM donnent des erreurs importantes, pour une grande partie des cas les simulations donnent des résultats assez raisonnables, surtout pour des plans d'eau à basse altitude/peu profonds. Les relations observées de l'erreur avec l'altitude et/ou la profondeur donnent des pistes à creuser pour essayer d'améliorer la qualité des simulations, avant une possible calibration du modèle. Il peut être aussi intéressant d'utiliser des données de forçage plus appropriées quand ça sera possible (e.g. une meilleure estimation des températures des tributaires, mesures de transparence par satellite). Enfin, la calibration du modèle peut améliorer encore la qualité des simulations.

## 7. Sigles & Abréviations

**DCE** : Directive cadre de l'eau

**GLM** : General lake model

**ME** : Erreur moyenne

**MAE** : Erreur absolue moyenne

**RMSE** : Racine de l'erreur quadratique moyenne

**r** : coefficient de corrélation

**RNT** : Réseau National de suivi des Températures

**SAFRAN** : Système d'analyse fournissant des renseignements adaptés à la nivologie

## 8. Bibliographie

- Garcia, F. (2016). *Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage*. (PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie).
- Heiskanen, J. J., Mammarella, I., Ojala, A., Stepanenko, V., Erkkilä, K.-M., Miettinen, H., . . . Nordbo, A. (2015). Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(15), 7412-7428. doi: 10.1002/2014JD022938
- Henderson-Sellers, B. (1988). Sensitivity of thermal stratification models to changing boundary conditions. *Applied Mathematical Modelling*, 12(1), 31-43. doi: 10.1016/0307-904X(88)90021-2
- Hipsey, M. R., Bruce, L. C., Boon, C., Busch, B., Carey, C. C., Hamilton, D. P., . . . Winslow, L. A. (2017). A General Lake Model (GLM 2.4) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2017, 1-60. doi: 10.5194/gmd-2017-257
- Hipsey, M. R., Bruce, L. C. et Hamilton, D. P. (2013). Aquatic Ecodynamics (AED) Model Library. Science Manual (p. 34). Crawley, Western Australia: The University of Western Australia.
- Hipsey, M. R., Bruce, L. C. et Hamilton, D. P. (2014). GLM - General Lake Model: Model overview and user information. (p. 42). Perth, Australia: The University of Western Australia.
- Johansson, H., Brodin, A. A. et Håkanson, L. (2007). New Approaches to the Modelling of Lake Basin Morphometry. *Environmental Modeling & Assessment*, 12(3), 213-228. doi: 10.1007/s10666-006-9069-z
- Junge, C. O. (1966). Depth distributions for quadratic surfaces and other configurations. Dans Academia (dir.), *Hydrobiological Studies* (Vol. 1, p. 257-265). Prague.
- Layden, A., MacCallum, S. N. et Merchant, C. J. (2016). Determining lake surface water temperatures worldwide using a tuned one-dimensional lake model (FLake, v1). *Geosci. Model Dev.*, 9(6), 2167-2189. doi: 10.5194/gmd-9-2167-2016
- Mohseni, O., Stefan, H. G. et Erickson, T. R. (1998). A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research*, 34(10), 2685-2692. doi: 10.1029/98wr01877
- Patten, B. C., Egloff, D. A. et 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. et Danis, P.-A. (2015). Optimisation du réseau national de suivi pérenne in situ de la température des plans d'eau : apport de la modélisation et des données satellitaires. Rapport final. (p. 94). Aix-en-Provence: Onema.
- Prats, J., Reynaud, N., Rebière, D., Peroux, T., Tormos, T. et Danis, P. A. (2017). LakeSST: Lake Skin Surface Temperatures in French inland water bodies for 1999–2016 from Landsat archives. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 2017, 1-33. doi: 10.5194/essd-2017-133
- Prats Rodríguez, J. et 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 (p. 68). Aix-En-Provence: Agence Française pour la Biodiversité.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., . . . Morel, S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 92-107. doi: 10.1175/2007jamc1636.1

- Råman Vinnå, L., Wüest, A., Zappa, M., Fink, G. et Bouffard, D. (2018). Tributaries affect the thermal response of lakes to climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 31-51. doi: 10.5194/hess-22-31-2018
- Read, J. S., Winslow, L. A., Hansen, G. J. A., Van Den Hoek, J., Hanson, P. C., Bruce, L. C. et Markfort, C. D. (2014). Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology. *Ecological Modelling*, 291, 142-150. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.07.029
- Rose, K. C., Winslow, L. A., Read, J. S. et Hansen, G. J. A. (2016). Climate-induced warming of lakes can be either amplified or suppressed by trends in water clarity. *Limnology and Oceanography Letters*, 1(1), 44-53. doi: 10.1002/lol2.10027
- Roubeix, V. et Danis, P.-A. (2016). Relations entre paramètres physico-chimiques des plans d'eau et occupation du bassin versant. Estimation des conditions de référence (p. 26). Aix-en-Provence: Onema.
- Simon, R. N., Tormos, T. et 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. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30(0), 247-250. doi: 10.1016/j.jag.2014.01.005
- Snorheim, C. A., Hanson, P. C., McMahon, K. D., Read, J. S., Carey, C. C. et Dugan, H. A. (2017). Meteorological drivers of hypolimnetic anoxia in a eutrophic, north temperate lake. *Ecological Modelling*, 343, 39-53. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.014
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. et Soubeyrou, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644. doi: 10.1002/joc.2003
- Woolway, R. I., Dokulil, M. T., Marszelewski, W., Schmid, M., Bouffard, D. et Merchant, C. J. (2017). Warming of Central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Climatic Change*, 142(3), 505-520. doi: 10.1007/s10584-017-1966-4
- Yao, H., Samal, N. R., Joehnk, K. D., Fang, X., Bruce, L. C., Pierson, D. C., . . . James, A. (2014). Comparing ice and temperature simulations by four dynamic lake models in Harp Lake: past performance and future predictions. *Hydrological Processes*, 28(16), 4587-4601. doi: 10.1002/hyp.10180

## 9. Table des illustrations

Figure 1 : Corrélation entre altitude et le paramètre de calage $\beta$ du modèle de Mohseni et al. (1998).	13
Figure 2 : Indicateurs de performance du modèle de prédiction de la température de l'eau des cours d'eau sur 182 stations du réseau RNT (ME : erreur moyenne ; MAE : erreur absolue moyenne ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne ; r : coefficient de corrélation).....	14
Figure 3 : Régression de la profondeur du disque de Secchi (DS) en fonction de la profondeur moyenne du plan d'eau ( $V_{\max}/S_{\max}$ ).....	15
Figure 4 : Performance du modèle GLM par rapport aux profils mesurés (en noir) et aux températures de surface mesurées (en rouge). .....	16
Figure 5 : Performance du modèle GLM par type de plan d'eau par rapport aux profils mesurés (à gauche) et aux températures de surface satellitaires (à droite). .....	17
Figure 6 : MAE des profils simulés en fonction de l'altitude (à gauche) et de la longitude (à droite) du plan d'eau.....	17
Figure 7 : MAE des températures de surface simulées en fonction de l'altitude (à gauche) et de la profondeur maximale (à droite) du plan d'eau.....	18
Figure 8 : Index d'extinction de la lumière ( $\eta$ ) en fonction de la profondeur moyenne du plan d'eau. La limite supérieure de l'axe des ordonnées a été limitée à $10 \text{ m}^{-1}$ pour faciliter la visualisation des patrons. ....	19
Figure 9 : MAE des températures de surface simulées en fonction du type de courbe hypsométrique utilisées : estimées avec $S_{\max}$ et $V_{\max}$ de la base (Eq. B3) ou mesurées (Bath. mes.).....	20
Figure 10 : MAE des températures de surface simulées en fonction du modèle utilisé pour estimer la température des tributaires : modèle sigmoïdal (Sigmo.) ou le modèle de classification de Maheu et al. (2016) (Class.).....	21
Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et environnementales des plans d'eau français classés DCE. Source des données : Base de données PLAN_DEAU.....	9
Tableau 2 : Formules pour estimer les courbes hypsométriques des plans d'eau, avec $z' = z / z_{\max}$ et $V_d = \frac{3V_{\max}}{S_{\max} z_{\max}}$ .....	11

## 10. Annexe 1 : Exemple de fichier de configuration de GLM pour le lac d'Annecy (ANN74)

```
!-----
! general model setup
!-----
!
! sim_name      [string]  title of simulation
! max_layers    [integer] maximum number of layers
! min_layer_vol [real]    minimum layer volume (m3 * 1000)
! min_layer_thick [real]  minimum layer thickness (m)
! max_layer_thick [real]  maximum layer thickness (m)
! Kw            [real]    background light attenuation (m**(-1))
! coef_mix_conv [real]    mixing efficiency - convective overturn
! coef_wind_stir [real]   mixing efficiency - wind stirring
! coef_mix_turb [real]    mixing efficiency - unsteady turbulence
! effects
! coef_mix_shear [real]   mixing efficiency - shear production
! coef_mix_KH   [real]   mixing efficiency - hypolimnetic
! Kelvin-Helmholtz turbulent billows
! coef_mix_hyp [real]    mixing efficiency - hypolimnetic
! turbulence
! deep_mixing   [bool]    flag to disable deep-mixing
!
!-----
&glm_setup
  sim_name = 'GLM simulation ANN74'
  max_layers = 300
  min_layer_vol = 0.025
  min_layer_thick = 0.500
  max_layer_thick = 3.000
  !-- Light Parameters
  Kw = 0.50
  !-- Mixing Parameters
  coef_mix_conv = 0.125
  coef_wind_stir = 0.230
  coef_mix_shear = 0.200
  coef_mix_turb = 0.510
  coef_mix_KH = 0.300
  coef_mix_hyp = 0.500
! non_avg = .true.
! deep_mixing = .true.
/

!-----
! lake details
!-----
!
! name          [string]
!              name of the lake
! latitude      [float, minimum = -90, maximum = 90, unit = deg
! North]
!              latitude
! longitude     [float, minimum = -360, maximum = 360, unit = deg
! East]
```

```

!           longitude
! bsn_len   [float]
!           basin length at crest (m)
! bsn_wid   [float]
!           basin width at crest (m)
! bsn_vals  [integer]
!           number of depth points on height-area
! relationship
! H          [float]
!           elevations (m)      (comma separated list,
! len=bsn_vals)
! A          [float]
!           area (m2) (comma separated list, len=bsn_vals)
!
!-----
&morphometry
  lake_name = 'ANN74'
  latitude  = 45.8550
  longitude = 6.1780
  bsn_len   = 9730
  bsn_wid   = 2707.78
  bsn_vals  = 131
  !   H(m)  A(m2 * 1000) V(m3 * 1000)
  H = 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7,
7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5, 12, 12.5, 13, 13.5, 14,
14.5, 15, 15.5, 16, 16.5, 17, 17.5, 18, 18.5, 19, 19.5, 20, 20.5,
21, 21.5, 22, 22.5, 23, 23.5, 24, 24.5, 25, 25.5, 26, 26.5, 27,
27.5, 28, 28.5, 29, 29.5, 30, 30.5, 31, 31.5, 32, 32.5, 33, 33.5,
34, 34.5, 35, 35.5, 36, 36.5, 37, 37.5, 38, 38.5, 39, 39.5, 40,
40.5, 41, 41.5, 42, 42.5, 43, 43.5, 44, 44.5, 45, 45.5, 46, 46.5,
47, 47.5, 48, 48.5, 49, 49.5, 50, 50.5, 51, 51.5, 52, 52.5, 53,
53.5, 54, 54.5, 55, 55.5, 56, 56.5, 57, 57.5, 58, 58.5, 59, 59.5,
60, 60.5, 61, 61.5, 62, 62.5, 63, 63.5, 64, 64.5, 65
  A = 0, 22429, 87177.7, 190627, 329395, 500327, 700476, 927094,
1.17762e+06, 1.44967e+06, 1.74101e+06, 2.04958e+06, 2.37346e+06,
2.71085e+06, 3.06008e+06, 3.41962e+06, 3.78804e+06, 4.16401e+06,
4.54629e+06, 4.93375e+06, 5.32535e+06, 5.72011e+06, 6.11713e+06,
6.51559e+06, 6.91474e+06, 7.31388e+06, 7.71237e+06, 8.10962e+06,
8.50511e+06, 8.89834e+06, 9.28888e+06, 9.67632e+06, 1.00603e+07,
1.04405e+07, 1.08166e+07, 1.11884e+07, 1.15556e+07, 1.1918e+07,
1.22754e+07, 1.26277e+07, 1.29747e+07, 1.33164e+07, 1.36526e+07,
1.39832e+07, 1.43081e+07, 1.46274e+07, 1.4941e+07, 1.52488e+07,
1.55508e+07, 1.58471e+07, 1.61376e+07, 1.64224e+07, 1.67014e+07,
1.69747e+07, 1.72424e+07, 1.75044e+07, 1.77609e+07, 1.80118e+07,
1.82573e+07, 1.84974e+07, 1.87321e+07, 1.89616e+07, 1.91858e+07,
1.9405e+07, 1.96191e+07, 1.98282e+07, 2.00324e+07, 2.02318e+07,
2.04264e+07, 2.06164e+07, 2.08018e+07, 2.09828e+07, 2.11593e+07,
2.13315e+07, 2.14995e+07, 2.16633e+07, 2.1823e+07, 2.19788e+07,
2.21306e+07, 2.22787e+07, 2.24229e+07, 2.25635e+07, 2.27006e+07,
2.28341e+07, 2.29642e+07, 2.30909e+07, 2.32143e+07, 2.33346e+07,
2.34517e+07, 2.35658e+07, 2.36768e+07, 2.3785e+07, 2.38903e+07,
2.39929e+07, 2.40927e+07, 2.41899e+07, 2.42845e+07, 2.43766e+07,
2.44662e+07, 2.45534e+07, 2.46383e+07, 2.47209e+07, 2.48013e+07,
2.48795e+07, 2.49556e+07, 2.50297e+07, 2.51017e+07, 2.51718e+07,
2.524e+07, 2.53063e+07, 2.53709e+07, 2.54336e+07, 2.54947e+07,
2.55541e+07, 2.56118e+07, 2.5668e+07, 2.57227e+07, 2.57758e+07,
2.58275e+07, 2.58777e+07, 2.59266e+07, 2.59741e+07, 2.60203e+07,
2.60652e+07, 2.61089e+07, 2.61514e+07, 2.61927e+07, 2.62328e+07,
2.62718e+07, 2.63098e+07, 2.63467e+07

```

```

/
!-----
! duration of run
!-----
!
! timefmt [integer]
!         method to specify start and duration of model run
!         1: duration computed from number of time steps, MaxN
!(bogus start
!         date used) [no longer implemented!!]
!         2: duration computed from given start and stop dates
!(number of time
!         steps MaxN computed)
!         3: duration computed from number of time steps, MaxN
!(start date as
!         specified, stop date computed)
! start   [string, format = "yyyy-mm-dd hh:mm:ss"]
!         nominal start date
!         This variable is used only if timefmt != 1
! stop    [string, format = "yyyy-mm-dd hh:mm:ss"]
!         nominal stop date
!         This variable is used only if timefmt = 2
! dt      [float, minimum = 0.001, maximum = 86400, unit = s]
!         Time step for integration
! numb_days [number of days to run the simulation ]
!         This variable is used only if timefmt != 2
!
!-----
&time
    timefmt = 2
    start = '1999-01-01 00:00:00'
    stop = '2008-07-31 23:00:00'
    dt = 3600
    timezone = 1
/
!-----
! format for output and filename(s)
!-----
!
! out_dir      [string]
!              path to output directory (set permissions)
! out_fn       [string]
!              name of output netcdf file
! nsave        [integer, minimum = 1, maximum = 86400]
!              save results every 'nsave' timesteps
! csv_lake_fname [string]
!              name of lake.csv lake simulation daily summary
!information
! csv_point_nlevs [integer]
!              number of depths at which to dump a csv time-
!series file
! csv_point_at   [real]
!              height from bottom for point csv file(s)
!(comma separated list)
! csv_point_fname [string]
!              name of csv output file(s) (comma separated
!list)

```

```

! csv_point_nvars    [integer]
!                   number of variables to output into csv
! csv_point_vars     [string]
!                   list of names of variables to output, - order
!IS important
! csv_outlet_allinone [bool]
!                   put all outflow data into the same csv file
! csv_outlet_fname   [string]
!                   name of csv output file(s) (comma separated
!list)
! csv_outlet_nvars   [integer]
!                   number of variables to output into outlet csv
! csv_outlet_vars    [string]
!                   list of names of variables to output
! csv_ovrflw_fname   [string]
!                   name of csv file to record amount and quality
!of overflow
!
!-----
&output
  out_dir = '.'
  out_fn = 'output'
  nsave = 24

  csv_point_nlevs = 1
  csv_point_at = 0
  csv_point_fname = 'WQ_'
  csv_point_nvars = 1
  csv_point_vars = 'temp'

  csv_lake_fname = 'ANN74'
  csv_outlet_allinone = .false.
  csv_outlet_fname = 'outlet_'
  csv_outlet_nvars = 3
  csv_outlet_vars = 'flow', 'temp', 'salt'
  csv_ovrflw_fname = 'overflow'
/

!-----
! initial condition profiles
!-----
!
!   lake_depth      [float]   initial lake depth (m)
!   num_depths      [integer]  number of depths provided for initial
!profiles
!   the_depths      [float]    the depths of the initial profile
!points (m)
!   the_temps       [float]    the temperature of the initial profile
!points (C)
!   the_sals        [float]    the salinity of the initial profile
!points (psu)
!   num_wq_vars     [integer]  number of non GLM (ie FABM) vars to be
!initialised
!   wq_names        [string]   names of non GLM (ie FABM) vars to be
!initialised
!   wq_init_vals    [float]    array of FABM vars (rows = vars; cols =
!depths)
!
!-----

```

```

&init_profiles
  lake_depth = 65
  num_depths = 6
  the_depths = 0, 13, 26, 39, 52, 65
  ! GLM
  the_temps = 4.24807, 4.24807, 4.24807, 4.24807, 4.24807,
4.24807
  the_sals = 0, 0, 0, 0, 0, 0
/

!-----
! meteorology
!-----
!
! met_sw [bool] switch to include surface meteorological
!forcing
! lw_type [string] type of longwave data supplied
!(LW_IN/LW_CC/LW_NET)
! rain_sw [bool] include rainfall nutrient composition
! snow_sw [bool] include snowfall (m/d)
! atm_stab [bool] account for non-neutral atmospheric
!stability
! catchrain [bool] flag that enables runoff from exposed
!banks of lake area
! rad_mode [integer] short and long wave radation model
!configuration (see manual)
! albedo_mode [integer] shortwave albedo calculation method
! cloud_mode [integer] atmospheric emmisivity calculation
!method
!
! meteo_fl [string] name of file with meteorology input data
! wind_factor [float] wind multiplication factor (-)
! wind_factor [float] wind multiplication factor (-)
! rain_factor [float] wind multiplication factor (-)
! sw_factor [float] wind multiplication factor (-)
! lw_factor [float] wind multiplication factor (-)
! at_factor [float] wind multiplication factor (-)
! rh_factor [float] wind multiplication factor (-)
!
! ce [float] bulk aerodynamic coefficient for latent
!heat transfer
! ch [float] bulk aerodynamic coefficient for
!sensible heat transfer
! cd [float] bulk aerodynamic coefficient for
!transfer of momentum
! rain_threshold [float] rainfall amount (m) required before
!runoff from exposed banks
! runoff_coef [float] conversion of rainfall to runoff in
!exposed lake banks
!
!-----
&meteorology
  met_sw = .true.
  lw_type = 'LW_IN'
  rain_sw = .false.
  atm_stab = .false.
  catchrain = .false.
  rad_mode = 2
  albedo_mode = 1

```

```

cloud_mode = 1
!-- BC file details
meteo_fl = 'meteo.csv'
subdaily = .false.
wind_factor = 1
sw_factor = 1
lw_factor = 1
at_factor = 1
rh_factor = 1
rain_factor = 1
cd = 0.0013
ce = 0.0013
ch = 0.0013
rain_threshold = 0.01
runoff_coef = 0.3
! time_fmt = 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss'
/

```

```

!-----
! snowice
!-----
!
! snow_albedo_factor [float] snow albedo multiplication
!factor (-)
! snow_rho_max [float] maximum snow density
! snow_rho_min [float] minimum snow density
!
!-----
&snowice
snow_albedo_factor = 1.000000
snow_rho_max = 300.000000
snow_rho_min = 50.000000
/

```

```

!-----
! inflows
!-----
!
! num_inflows [integer] number of inflowing streams (0+)
! names_of_strms [string] names of streams (comma separated
!list)
! strm_hf_angle [float] stream half angle (degrees)
! strmbd_slope [float] streambed slope (degrees)
! strmbd_drag [float] streambed drag coefficient (-)
! inflow_factor [float] inflow flow rate multiplier (-)
! inflow_fl [string] inflow data filename(s) (comma
!separated list)
! inflow_varnum [integer] number of columns (excluding date)
!to be read
! inflow_vars [string] variable names of inflow file
!columns
!
! This should be a comma separated
!list, and must
!
! include FLOW, SALT & TEMP (for
!GLM), and
!
! optionally can include FABM var
!names.
! coef_inf_entrain [real] entrainment coefficient for inflows
!
```

```

!-----
&inflow
  num_inflows      = 15
  names_of_strms  = '609003861', '609003198', '609003636',
'609003231', '609002481', '609003070', 'rest_of_bv', '650009018',
'609003675', '609003102', '609003817', '609003007', '609003382',
'609003342', '609003668'
  subm_flag       = .false., .false., .false., .false., .false., .false.,
.false., .false., .false., .false., .false., .false., .false.,
.false., .false.
  strm_hf_angle   = 70.047, 70.7608, 58.4974, 63.5995, 66.7723,
68.4524, 68.7703, 61.699, 74.956, 75.4273, 78.4097, 67.1189,
64.4646, 68.9363, 73.6428
  strmbd_slope    = 0.046, 0.054, 0.02, 0.036, 0.122, 0.022,
0.0447143, 0.128, 0.018, 0.02, 0.002, 0.07, 0.04, 0.032, 0.016
  strmbd_drag     = 0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015,
0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015, 0.015
  inflow_factor   = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
  inflow_fl       = 'inflow_609003861.csv', 'inflow_609003198.csv',
'inflow_609003636.csv', 'inflow_609003231.csv',
'inflow_609002481.csv', 'inflow_609003070.csv',
'inflow_rest_of_bv.csv', 'inflow_650009018.csv',
'inflow_609003675.csv', 'inflow_609003102.csv',
'inflow_609003817.csv', 'inflow_609003007.csv',
'inflow_609003382.csv', 'inflow_609003342.csv',
'inflow_609003668.csv'
  inflow_varnum   = 3,
  inflow_vars     = 'FLOW',
                  'TEMP',
                  'SALT'
  coef_inf_entrain = 0
! time_fmt = 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss'
/

```

```

!-----
! outflows
!-----
!
! num_outlet      [integer] no. of outlets
! flt_off_sw     [bool] floating offtake switches
! outl_elvs      [float] outlet elevations (comma separated
!list)
! bsn_len_outl   [float] basin length at outlets (m)
! bsn_wid_outl   [float] basin width at outlets (m)
! outflow_fl     [string] outflow data file
! outflow_factor [float] outflow flow rate multiplier (-)
! seepage        [bool] do seepage processing [default is off
!- ie no seepage]
! seepage_rate   [float] seepage rate of water (m/day) from
!bottom layer
!
!-----

```

```

&outflow
  num_outlet      = 1
  flt_off_sw     = .true.
  outl_elvs      = 0
  bsn_len_outl   = 5489.56
  bsn_wid_outl   = 1527.7
  outflow_fl     = 'outflow1.csv'

```

```
    outflow_factor = 1
!   time_fmt = 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss'
    seepage = .false.
    seepage_rate = 0
/
```

```
!-----
! var_lec
! if this block is read (and there are no WQ calculations) a
! variable light
! extinction coefficient will be used
!-----
&var_lec
    lec_fl = 'lec.txt'
!   time_fmt = 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss'
/
```

**Irstea**

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

**01 40 96 61 21**

[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)

**Agence Française pour la  
Biodiversité**

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

**01 45 14 36 00**

[www.afbiodiversite.fr](http://www.afbiodiversite.fr)