



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI.

Les évolutions thermiques des lacs français face au changement climatique : surveillance et prédiction

Rosalie BRUEL^{1,2,5}, Najwa SHARAF^{3,5}, Olivia DESGUE-ITIER^{2,5}, Jordi PRATS⁴, Nathalie REYNAUD^{3,5}, Tiphaine PEROUX^{3,5}, Thierry TORMOS^{1,3,5}, Pierre-Alain DANIS^{1,5}, Jean-Philippe JENNY^{2,5}

¹ OFB, Direction de la Recherche et de l'Appui Scientifique, Service EcoAqua, Thonon-les-Bains, France.

² Université Savoie Mont Blanc, INRAE, CARRTEL, 75 bis avenue de Corzent, 74203 Thonon-les-Bains, France.

³ Aix-Marseille Univ., INRAE, RECOVER, Aix-en-Provence, France.

⁴ SEGULA Technologies, Ctra. de l'Hospitalet 147-149, 08940 Cornellà de Llobregat, Espagne.

⁵ Pôle R&D ECLA, France.

Correspondance : Rosalie BRUEL, rosalie.bruel@ofb.gouv.fr

Le réchauffement climatique transforme nos lacs : moins de glace en hiver, eaux de surface qui se réchauffent (parfois plus vite que l'air), perte d'oxygène en profondeur. Ces évolutions menacent la biodiversité et les usages. Pour anticiper ces bouleversements, le pôle R&D ECLA (Pôle Recherche et Développement Écosystèmes Lacustres) combine mesures de terrain, observations satellitaires et modélisation afin de comprendre la trajectoire thermique des plans d'eau et de guider leur gestion durable, un enjeu écologique et de gestion primordial aujourd'hui.

Introduction

Le réchauffement climatique influence profondément l'état et le fonctionnement des plans d'eau. À l'échelle globale, les plans d'eau présentent un réchauffement moyen de leur température de surface estivale de 0,34 °C par décennie, un taux équivalent voire supérieur à celui observé dans l'atmosphère (O'Reilly *et al.*, 2015). Parallèlement, la durée annuelle de prise en glace diminue significativement et certains plans d'eau qui gelaient historiquement ne connaissent plus de phase de gel saisonnier (Woolway *et al.*, 2020). Ces modifications s'accompagnent souvent d'autres forçages (apports en nutriments, présence d'espèces exotiques envahissantes) et peuvent en exacerber l'occurrence ou les impacts. Ainsi, le réchauffement peut favoriser l'établissement d'espèces exotiques envahissantes (Roy *et al.*, 2024) ou, couplé à l'enrichissement en nutriments, favoriser les efflorescences algales (Moss *et al.*, 2011).

Les observatoires long-terme jouent un rôle clé pour comprendre les effets du réchauffement climatique. En France, seuls trois lacs péri-alpins (Léman, Bourget et Annecy) contribuent régulièrement aux synthèses scientifiques globales car ils font l'objet d'un suivi multi-

paramètres long-terme et régulier dont les données sont validées et bancarisées dans le SI OLA¹ (Rimet *et al.*, 2020). La bancarisation désigne l'archivage structuré de données dans une base pérenne, documentée et interrogeable, permettant leur consultation, leur extraction et leur réutilisation. Les données du SI OLA (voir l'encadré « En savoir plus ») ont ainsi contribué à mettre en évidence le réchauffement généralisé de la surface des lacs (O'Reilly *et al.*, 2015), l'hétérogénéité forte des réponses thermiques des couches profondes (Pilla *et al.*, 2020), la tendance générale à la désoxygénation des couches profondes (Jane *et al.*, 2021) et la réponse du phytoplancton aux orages (Tran-Khac *et al.*, 2025). Toutefois, ces résultats concernent un échantillon non représentatif de la diversité des plans d'eau français en termes de morphométrie (superficie, profondeur, volume), de climat (océanique, montagnard, méditerranéen) et d'enjeux (biodiversité, usages).

En parallèle, le réseau réglementaire de la directive cadre européenne sur l'eau (DCE 2000/60/CE) fournit un suivi homogène plus étendu pour tous les plans d'eau de plus de cinquante hectares du territoire hexagonal, mais les données recueillies sont ponctuelles et ne permettent pas de suivre finement les évolutions saisonnières.

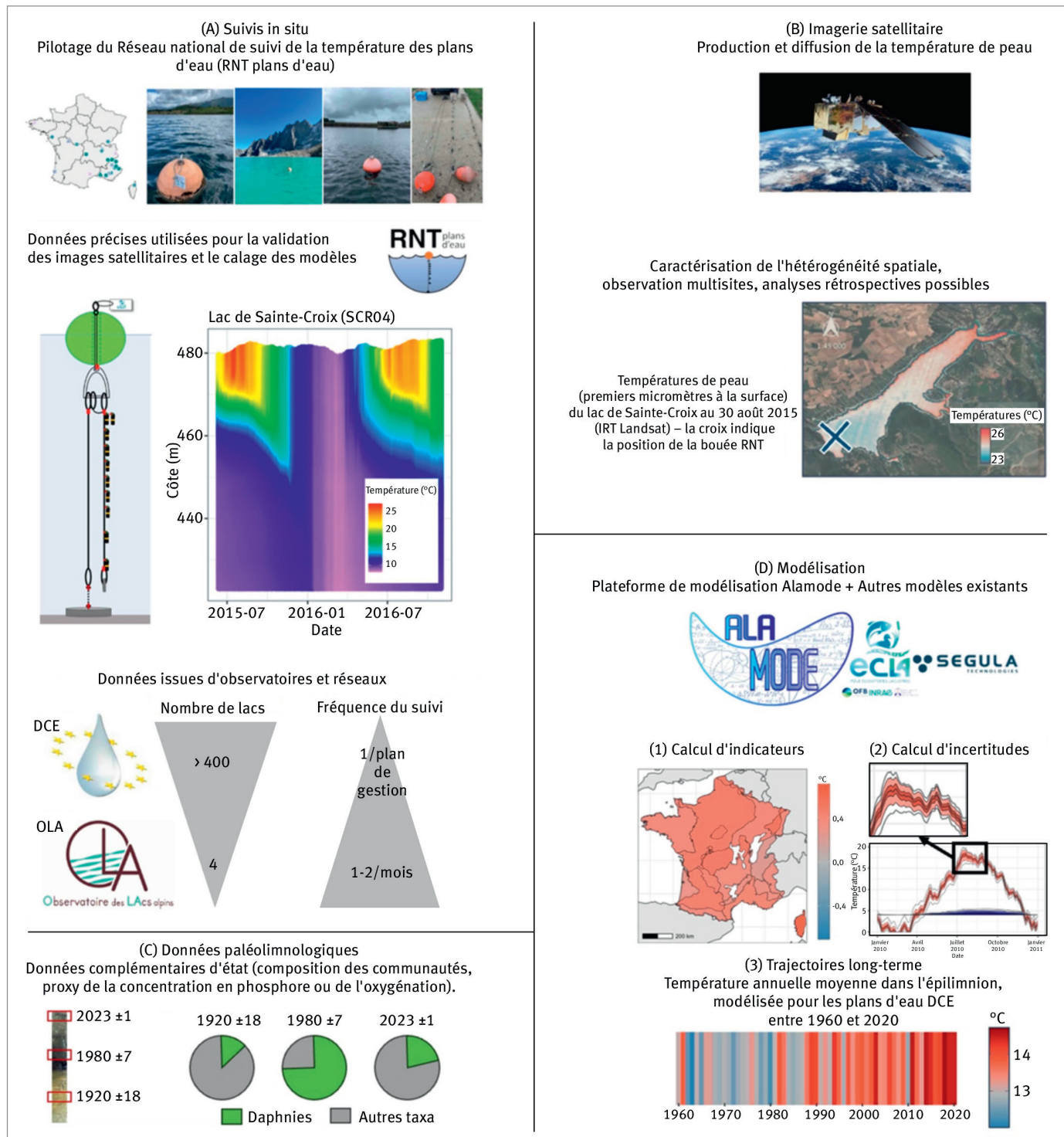
1. Système d'information de l'Observatoire des lacs : <https://si-ola.inrae.fr/>

2. <https://poleecla.fr>

Face au manque de données haute-fréquence et avec une couverture géographique suffisante, le pôle R&D ECLA² (Pôle Recherche et Développement Écosystèmes Lacustres) développe depuis sa création des approches complémentaires, associant observations *in situ*, télé-

détection et modélisation pour mieux caractériser les trajectoires thermiques des lacs français (figure 1). La température de l'eau n'est qu'un paramètre parmi ceux susceptibles d'être impactés par le réchauffement climatique mais il s'agit d'un paramètre central, permettant de

Figure 1 – Synergies d'approches pour la caractérisation des trajectoires thermiques et des conditions écologiques des plans d'eau de France. (A) Suivis *in situ* à haute-fréquence de la température (schéma du dispositif et carte de chaleur illustrant précisément les variations journalières de la température et du niveau d'eau pour le lac de Sainte-Croix) et données issues de réseaux et observatoires. (B) Production et diffusion de la température de peau (premiers micromètres à la surface d'un plan d'eau). (C) Données paléolimnologiques fournissant des proxys supplémentaires sur l'état chimique et écologique des plans d'eau sur des temps longs. Ces différentes données permettent de calibrer les modèles. (D) L'approche de modélisation a été structurée autour de la plateforme ALAMODE pour faciliter (1) le calcul d'indicateurs, (2) le calcul d'incertitudes, permettant à terme de (3) calculer les trajectoires long terme.



caractériser l'habitat et le fonctionnement thermo-hydro-dynamique, ainsi que de contextualiser les données chimiques et biologiques (encadré 1). L'article présente les avancées de cette surveillance grâce aux programmes menés par le Pôle entre 2019 et 2024.

Surveillance de la température des plans d'eau

Surveillance *in situ* : le Réseau national de suivi de la température des plans d'eau

Le développement des technologies d'acquisition autonome et la réduction de leur prix permet depuis les années 2000 de déployer des dispositifs de mesure *in situ* offrant une donnée dite « haute-fréquence » (par exemple, horaire). Ces dispositifs, constitués de capteurs (autonomes avec ou sans télétransmission des données) et/ou de préleveurs installés en continu dans les plans d'eau, bouleversent les possibilités (Marcé *et al.*, 2016). Ainsi, des dispositifs peuvent au fil de l'année enregistrer précisément les dates de débâcle ou de brassage de sites éloignés de toute infrastructure, ou enregistrer l'impact d'orages ou d'autres événements brefs difficiles à capter par les suivis ponctuels (e.g., Perga *et al.*, 2018). Les dernières technologies permettent même de suivre des compartiments biologiques plusieurs fois dans la journée (e.g. le plancton, Eyring *et al.*, 2025).

Dès 2009, l'Office français de la biodiversité (OFB à l'époque l'Onema) a initié un Réseau national de suivi de la température des cours d'eau et des plans d'eau. Le volet plans d'eau du réseau a été porté dès ses débuts par le Pôle R&D ECLA (à l'époque, pôle Hydroécologie des plans d'eau Onema-Irstea) et a permis de proposer à partir de 2013 :

- un protocole de construction et de déploiement de dispositif de suivi de la température répondant aux contraintes propres aux plans d'eau (marnage, vandalisme, vent, esthétique) (Rebiere *et al.*, 2015),
- sur la base d'un questionnaire, une priorisation des sites à équiper selon leurs enjeux environnementaux et socio-économiques (Rebiere et Danis, 2015),
- une base de données pour rassembler, homogénéiser et sécuriser les données³,

Le cycle du pôle 2019-2024 a permis de poursuivre les travaux liés au réseau avec notamment :

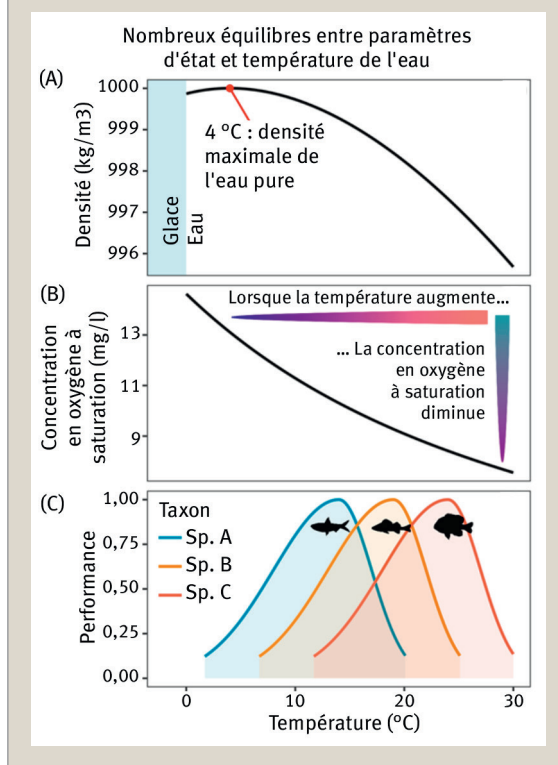
- la mise en ligne d'un tableau de bord d'exploration des données⁴,
- le début de développement d'une application de validation des données, étape cruciale avant la bancarisation,
- l'équipement de nouveaux plans d'eau.

Surveillance *ex situ* : contributions de la télédétection

La télédétection constitue un outil particulièrement performant pour compléter les mesures *in situ* à moindre coût et renforcer l'évaluation de l'état écologique des plans d'eau, spécifiquement dans un contexte où le suivi régulier de nombreux sites n'est pas envisageable (Papanthanasopoulou *et al.*, 2019). Depuis 1982, les satellites

Encadré 1 – Pourquoi la température ?

Parmi les multiples indicateurs des effets du réchauffement climatique sur les plans d'eau, la température revêt un statut particulier, car il s'agit d'un paramètre clé de leur fonctionnement et de la distribution des communautés qu'ils hébergent. Il existe une relation empirique entre la température et de nombreuses variables d'état de l'écosystème : densité de l'eau (A), ce qui conditionne notamment le brassage ou la stratification thermique des plans d'eau, solubilité de l'oxygène (B), métabolisme et performance des individus (C), distribution des espèces ou encore toxicité de certains polluants. Être capable de caractériser les fluctuations saisonnières et les tendances interannuelles des températures des plans d'eau constitue un premier pas pour anticiper leur état futur et donc les services écosystémiques rendus.



Landsat fournissent une série temporelle quasi continue d'images en infrarouge thermique (IRT) permettant d'estimer la température de surface des eaux continentales avec une résolution spatiale entre 60 et 120 m selon le capteur et une fréquence d'acquisition de seize jours par satellite. Grâce à un travail de calibration (Prats *et al.*, 2018), le Pôle R&D ECLA produit et diffuse *via* la plateforme dataecla.fr⁵ des cartographies actualisées de température satellitaire couvrant l'ensemble des surfaces en eau de l'hexagone et ultramarines d'une surface suffisante (la surface minimale dépend du satellite). Pour plus d'information sur les suivis satellitaires et les développements récents, consultez l'article « La surveillance des lacs vue de l'espace : une nouvelle source d'information sur le territoire national » (Tormos *et al.*, 2026) de ce même numéro ainsi que la synthèse proposée par Tormos *et al.* (2021).

3. <https://dataecla.fr/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/15881d2b-2310-4ea2-b80e-cbf8a48e1869>

4. <https://dataecla.fr/dashboards/thermie/>

5. <https://dataecla.fr/>

Modélisation de la température des plans d'eau

La modélisation constitue un outil essentiel pour compléter les chroniques de données et mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, notamment en l'absence d'informations historiques. La modélisation permet d'explorer les trajectoires passées et/ou futures probables des écosystèmes, d'évaluer l'impact de différents facteurs (par exemple, la transparence de l'eau, la température et les débits des affluents) et de tester des scénarios de gestion (par exemple : le pompage ou la gestion du marnage).

La modélisation thermodynamique des plans d'eau repose sur différents domaines numériques : modèles en boîte (0D), unidimensionnel (1D), bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D). À mesure que la dimensionnalité augmente, le nombre de paramètres à caler, la complexité du modèle et le temps de calcul augmentent également. Ainsi, les modèles 3D sont particulièrement adaptés aux études de la variabilité spatiale au sein d'un lac, des courants et des gradients thermiques. De telles informations sont utiles pour prédire notamment la distribution des particules mais nécessitent des données spatialisées pour initialiser la modélisation. En revanche, les modèles plus simples (0D, 1D) sont des approximations de la réalité mais permettent de synthétiser la réponse globale d'un système lorsque les processus verticaux de transfert thermique sont plus déterminants que les horizontaux.

Exercice de simplification pour la modélisation simultanée des 401 plans d'eau du réseau DCE

Parmi les avancées majeures de la dernière décennie pour le pôle R&D ECLA figure la publication du modèle semi-empirique OKPLM (*Ottosson-Kettle-Prats Lake Model*, Prats et Danis, 2019) et du code associé pour estimer les incertitudes (voir l'encadré « En savoir plus »). Celui-ci permet de simuler les températures des eaux de l'épilimnion et de l'hypolimnion⁶ des plans d'eau à partir d'un nombre limité de données d'entrée (latitude, altitude, profondeur maximale, surface et volume) et de forçage (température de l'air et irradiance solaire) avec deux options de calibration : par défaut (sans injection de données supplémentaires) ou calibré (à partir de données de température *in situ* permettant de réduire les incertitudes (encadré 2)). Cette simplification permet ainsi de produire des chroniques de températures pour des lacs avec peu ou pas d'observations *in situ* (Sharaf *et al.*, 2023).

Capitaliser sur les outils existants

En parallèle, le modèle hydrodynamique 1D *General Lake Model* (GLM, Hipsey *et al.*, 2019) a été assimilé dans la boîte à outils du Pôle R&D ECLA, notamment dans le cadre de travaux de modélisation sur les grands lacs péri-alpins. GLM est un modèle de bilan hydrique et de stratification thermique des lacs. Il est adapté à une grande variété de lacs naturels ou artificiels, peu profonds ou stratifiés. Il s'agit d'un projet open source dont le code est accessible et personnalisable pour des applications spécifiques. L'une des forces du modèle, hormis

Encadré 2 – Pourquoi développer un suivi *in situ* quand on peut utiliser des outils de télédétection, ou modéliser les conditions à partir de variables météo ?

Les données *in situ* sont essentielles pour valider les mesures issues de l'imagerie satellitaire. Par ailleurs, les satellites ne mesurent la température que sur les premiers micromètres à la surface : celle-ci est donc insuffisante pour représenter l'état thermique vertical complet des lacs, particulièrement pour les lacs les plus profonds.

Les modèles, eux, ont été développés pour représenter la structure verticale des plans d'eau. Les données *in situ* permettent toutefois d'initialiser les simulations et d'en valider les résultats.

sa capacité à modéliser aussi bien les petits étangs que les plus grands lacs, est la possibilité d'un couplage à une bibliothèque écologique (*Aquatic Eco-Dynamics* ou AED) pour simuler la qualité de l'eau et les processus écosystémiques.

Reproductibilité

Les différents outils de modélisations sont rassemblés dans la plateforme ALAMODE (*A LAKE MODElling project*, figure 2) pour la modélisation des plans d'eau et de leurs affluents. Cette plateforme inclut les codes et fonctions nécessaires pour assembler les fichiers de configuration des modèles, les données de forçage et les données de calage, ainsi que les codes et fonctions pour le traitement des données requises au fonctionnement des modèles. Cette structuration vise à faciliter la production des simulations et à garantir la reproductibilité des résultats.

Qu'avons-nous appris des trajectoires thermiques des plans d'eau ?

Des simulations sur soixante ans pour caractériser le réchauffement des plans d'eau français

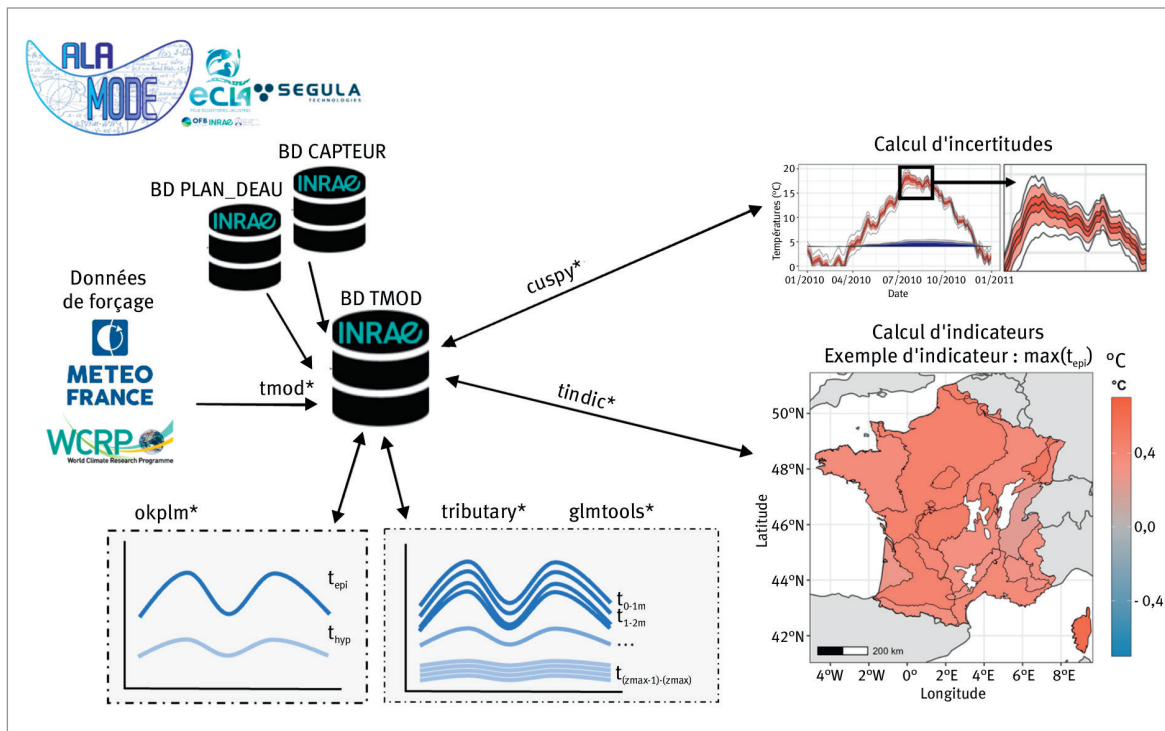
Le modèle OKPLM a été appliqué à 401 plans d'eau pour simuler les températures journalières de l'épi- et de l'hypolimnion entre 1959 et 2020 (Sharaf *et al.*, 2023). Ces simulations, accompagnées des informations sur leurs incertitudes, ont été mises à disposition sous forme de jeux de données, LakeTSim (*Lake Temperature Simulations*).

À partir de ces simulations, plusieurs indicateurs thermiques ont été calculés. Parmi eux, le taux de réchauffement de la température annuelle de l'épilimnion montre une augmentation moyenne de 0,29°C par décennie entre 1980 et 2019 pour 267 lacs naturels et artificiels. Des tendances significatives à la hausse ont été détectées pour 91 % de ces plans d'eau. Cet indicateur, combiné à d'autres (température annuelle moyenne, nombre de jours avec température de l'épilimnion supérieure à 20°C ou inférieure à 4°C), fait partie d'un indicateur pour l'Observatoire national de la biodiversité : évolution de la température de surface des lacs en France hexagonale (Sharaf *et al.*, 2024).

6. La stratification des lacs désigne leur tendance à former des couches d'eau distinctes sous l'effet de la température. On distingue généralement trois couches : l'épilimnion (couche supérieure), le métalimnion ou thermocline (couche intermédiaire, dont la profondeur et l'épaisseur varient au cours de l'année et où la température décroît rapidement avec la profondeur), et l'hypolimnion (couche profonde, s'étendant jusqu'au fond). En été, l'épilimnion est plus chaud que l'hypolimnion ; en hiver, lors de périodes très froides, cette relation peut s'inverser.

Figure 2 – Plateforme ALAMODE pour la modélisation des plans d'eau.

La plateforme ALAMODE (Pôle R&D ECLA/SEGULA Technologies) permet de mettre en lien les différents paquets développés (cf. astérisques). Les paquets okplm, tributary et glmtools sont des paquets de modélisation, le paquet tmod permet de gérer la base de données tmod et de faciliter la réalisation et consultation des simulations, le paquet cuspy permet d'estimer les paramètres des modèles et la réalisation d'analyses d'incertitudes et de sensibilités et le paquet tindic permet de calculer une suite d'indicateurs (annuels, saisonniers, mensuels) à partir des sorties des modèles. Le paquet alaproduct (non illustré dans la figure), réunit les fonctions pour lancer les simulations.



Les indicateurs thermiques ont également permis de déterminer les régimes de brassage (alternance entre stratification et mélange des eaux) annuels de 170 lacs. Les résultats montrent que 6% d'entre eux sont passés d'un régime dimictique (deux mélanges par an) entre 1959-1980 à un régime chaud monomictique (un seul mélange hivernal) entre 1989-2019 (Sharaf *et al.*, 2026). Ce changement signale que certains lacs qui présentaient une stratification dite inverse (surface plus froide que la température du fond) ne se refroidissent plus suffisamment en hiver.

Ces chroniques de température contribuent par ailleurs à alimenter des projets sur les assemblages biologiques sous contrainte du réchauffement climatique (voir article « Utiliser les réseaux trophiques comme indicateur fonctionnel du changement global » (Sentis *et al.*, 2026) dans ce même numéro).

Taux de réchauffement récents et prédiction de la température à l'horizon 2100 des quatre grands lacs péri-alpins

L'un des atouts de la modélisation est la possibilité de faire des projections sur les trajectoires thermiques futures, et ceci selon plusieurs scénarios climatiques. Une étude a été menée sur les quatre grands lacs alpins (Annecy, Bourget, Léman et Aiguebelette) afin de prédire les conditions thermiques à l'horizon 2100 (Desgué-Itier *et al.*, 2023) comme cela avait été exploré pour le Lac d'Annecy deux décennies plus tôt (Danis *et al.*, 2004).

Dans un premier temps, les performances de cinq modèles 1D ont été testées. Les modèles ont été forcés en intégrant l'évolution à long terme du rayonnement solaire incident et de la température de l'air, tout en prenant en compte des tendances saisonnières réalistes pour les autres variables météorologiques. Les résultats obtenus ont été confrontés aux observations *in situ* de l'Observatoire des lacs (OLA) afin de tester la robustesse des prédictions. Les simulations ont montré que le meilleur modèle permettait de reproduire de manière fiable les variations du régime thermique, avec une erreur moyenne de 1,14 °C. Selon ces résultats, les températures de l'eau ont augmenté au cours des trente dernières années de 0,46 °C par décennie dans l'épilimnion et de 0,33 °C par décennie dans l'hypolimnion. Les projections climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ont ensuite permis de simuler l'évolution future de la température dans ces lacs. D'ici 2100, les résultats indiquent une élévation moyenne de +3,8 °C dans les lacs péri-alpins selon le scénario intermédiaire (SSP3 7.0).

La température comme porte d'entrée vers d'autres processus

Les modèles permettent non seulement de simuler les températures mais également d'autres variables d'état, comme l'oxygène, grâce aux modules complémentaires. Deux études prospectives ont permis de tester

des approches prometteuses pour la reconstruction et la prédiction de l'état d'oxygénation et de l'état écologique pour deux grands lacs.

Deux cent cinquante ans d'oxygénation du Léman

Une étude spécifique sur le Léman a reconstruit l'évolution des conditions d'oxygénation depuis 1850 grâce à une approche combinant modélisation 1D (GLM-AED) et paléolimnologie (figure 1C), puis a modélisé les conditions de température et d'oxygénation à l'horizon 2100. Deux variables clés complémentaires ont été inférées des archives sédimentaires : (1) les concentrations de phosphore total à partir de l'abondance des daphnies, et (2) les événements d'anoxie à partir de la présence de varves saisonnières (couche de sédiment reflétant l'alternance de conditions oxiques et anoxiques). Ces proxys ont été utilisés pour contraindre et valider les simulations. Cette approche intégrée lève en partie les limites temporelles de la paléolimnologie (données de résolution annuelle) en exploitant la modélisation pour générer des résultats journaliers ou mensuels. Elle a notam-

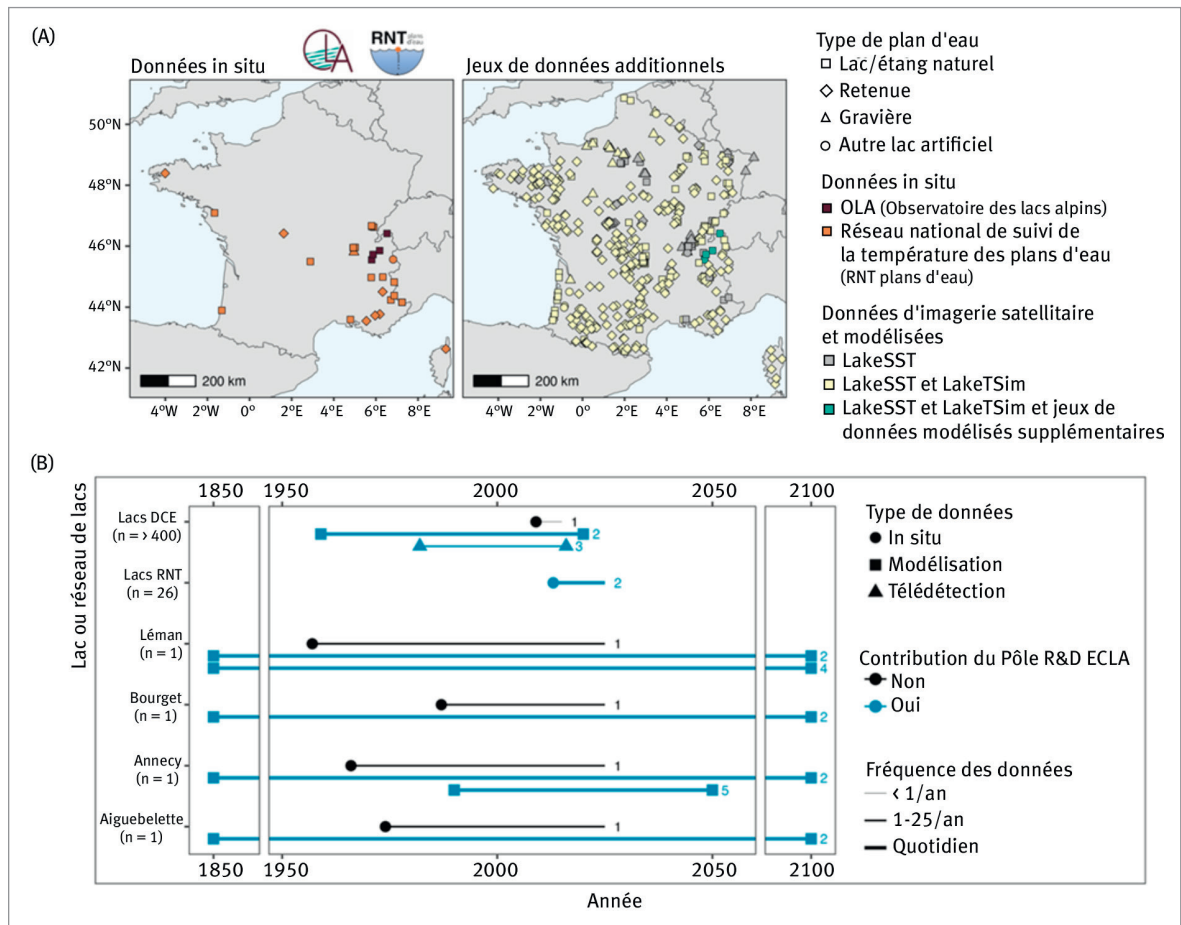
ment révélé la présence d'épisodes d'hypoxie de courte durée avant le vingtième siècle, ainsi qu'une transition majeure en 1976, marquant le passage d'épisodes brefs à des hypoxies sévères et persistantes (Soares *et al.*, 2024).

Indicateurs de qualité pour le lac d'Annecy à l'horizon 2100

Des travaux exploratoires sur le Lac d'Annecy reposant sur des modules de modélisation écologiques (AED) complémentaires de GLM ont permis de simuler d'autres variables clés en plus de la température (chlorophylle-a, nutriments, carbone organique total, coefficient d'extinction de la lumière). Cent une métriques ont été calculées et regroupées selon trois grands types d'usages du lac : qualité esthétique et écologique, approvisionnement en eau potable et maintien des stocks des salmonidés (Soares *et al.*, 2025). La déviation de chaque métrique par rapport à un état de référence historique ou par rapport à l'objectif réglementaire de la DCE a permis d'évaluer le maintien des services écosystémiques selon les scénarios climatiques et de gestion (Soares *et al.*, 2025).

Figure 3 – Les travaux du pôle ont permis de produire des données supplémentaires par rapport à celles disponibles jusqu'alors.

(A) Lacs suivis en France par l'Observatoire des lacs et le RNT plans d'eau (état des lieux en août 2025), et lacs DCE pour lesquels des données issues de l'imagerie satellitaire ou de modélisations sont disponibles. (B) La figure illustre par lac ou réseaux de lacs le début et la fin des chroniques disponibles (en noir), et celles produites par les équipes du Pôle R&D ECLA (en bleu). Le type de point illustre le type de données : *in situ* (point), modélisées (carrés) ou proxy de l'imagerie satellitaire (triangle). L'épaisseur des segments reflète la fréquence des données (de ponctuelle à journalière). Le type de données est précisé par les numéros à droite de la fin de chaque segment : 1. température et suite de paramètres, 2. température seule, 3. température (+ transparence, couleur de l'eau), 4. température + oxygène, 5. 101 indicateurs (dont la température).



Les résultats révèlent que la hausse progressive des températures de l'eau entraînera une réduction des habitats favorables à la reproduction des salmonidés. Le seuil de tolérance sera atteint d'ici 2050 rendant nécessaire d'adapter la gestion des ressources. L'approvisionnement en eau potable devrait être maintenu jusqu'en 2100, à condition que les apports en nutriments et les niveaux de pollution restent stables. Cette approche constitue un outil de prévision des impacts du réchauffement climatique sur les lacs permettant aux décideurs d'anticiper les mesures nécessaires pour garantir les bénéfices écologiques et sociétaux à long terme.

Conclusions et perspectives

L'approche intégrée déployée au Pôle R&D ECLA – combinant mesures *in situ*, imagerie satellitaire et modélisation – est indispensable pour suivre de manière fiable et à l'échelle nationale l'évolution thermique des plans d'eau (figure 3). Les données de terrain, précises mais localisées, permettent de valider les observations satellitaires, qui offrent quant à elles une couverture spatiale étendue. La modélisation complète ces chroniques, fournit des trajectoires de température sur plusieurs décennies et des indicateurs essentiels pour évaluer l'impact du réchauffement, comprendre le fonctionnement écologique des lacs (voir article « Utiliser les réseaux trophiques comme indicateur fonctionnel du changement global » (Sentis *et al.*, 2026) dans ce même numéro) et orienter les mesures de gestion.

Les développements à venir visent à améliorer la représentation des trajectoires thermiques des lacs dans les modèles. Une priorité est de tester l'impact sur les résultats de l'intégration de nouvelles variables motrices, comme le coefficient d'extinction de la lumière (Kd), aujourd'hui souvent fixé de manière constante dans GLM. L'exploitation des données satellitaires Sentinel-2 permettra de mieux prendre en compte ses variations saisonnières et interannuelles (Danis *et al.*, 2003). Par

ailleurs, les satellites de nouvelle génération et les nouveaux algorithmes ouvrent la voie à l'intégration d'autres variables de forçage, telles que les fluctuations de niveau d'eau, essentielles pour mieux représenter les flux de chaleur dans les plans d'eau marnants. Les possibilités des modules écologiques de GLM pourront être davantage exploitées, en déployant la méthode de calcul d'indicateurs de qualité développée sur le Lac d'Annecy à un plus grand nombre de plans d'eau. Enfin, la structure de GLM permet également d'y greffer de nouveaux modules qui peuvent estimer d'autres processus clés, tels que les flux de gaz à effet de serre.

Ces avancées reposent sur la disponibilité de données *in situ* fiables et sur leur mutualisation : plus exigeant que le modèle OKPLM déjà appliqué à 401 lacs, GLM reste conditionné par la qualité et l'accessibilité des séries d'entrée. La mise en réseau des observatoires et l'interopérabilité des bases de données (par ex., intégration en 2024 du réseau Lacs sentinelles dans la base capteurs du Pôle R&D ECLA) offrent une opportunité de consolider les chroniques thermiques et la connaissance des plans d'eau plus largement. Enfin, alors que les données *in situ* s'incrémentent, de nouvelles analyses de ces données pourront également être réalisées. ■

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires du Réseau national de suivi de la température des plans d'eau (partenaires au 16/09/2025 : Parc national des Écrins, Parc national du Mercantour, EDF, Syndicat mixte d'aménagement et de développement de Serre-Ponçon, Réserve naturelle nationale du Lac de Grand-Lieu, Réserve naturelle nationale de Pinail, Réserve naturelle du Courant d'Huchet, le Syndicat de bassin de l'Elorn, le Département des Bouches du Rhône) ainsi que Guillaume P. Morin pour son travail sur l'estimation des coefficients d'atténuation de la lumière à partir des données Sentinel-2. Ce travail a été rendu possible grâce au financement des projets RNT, IMPEC, SECCELA et AED *via* la convention de coopération du Pôle R&D ECLA, ainsi que *via* le contrat R&D n°4092 établi entre l'Office français de la biodiversité et SEGULA Technologies pour le projet «ALAMODE» : A LAke MODElling project.

Encadré 3 – En savoir plus – Liens vers les paquets de modélisation et les jeux de données disponibles.

Paquets de la plateforme ALAMODE

Paquet de modélisation : Prats-Rodríguez et Danis (2023) : <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7585615>

Paquet cuspy (calcul d'incertitudes) : Prats-Rodríguez et Danis (2023) : <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7585606>

Accéder aux données

Températures simulées (épilimnion et hypolimnion) entre 1959 et 2020 pour 401 plans d'eau : Sharaf *et al.* (2023). LakeTSim (Lake Temperature Simulations) [Dataset]. Recherche Data Gouv : <https://doi.org/10.57745/OF9WXR>

Températures simulées (profils verticaux) entre 1850 et 2100 pour les lacs d'Annecy, du Bourget, d'Aiguebelette et le Léman : Desgue *et al.* (2022). Simulated daily water temperature time series data (full water profile) for lakes Geneva, Annecy, Bourget and Aiguebelette over the period 1850-2100, based on IPCC ssp126, ssp370 and ssp585 scenarios. [Dataset]. Recherche Data Gouv, V : <https://doi.org/10.57745/PA13OK>

Oxygène simulé (profils verticaux) entre 1850 et 2100 pour le Léman : Soares *et al.* (2024). Simulated daily water oxygen time series data (full water profile) for lake Geneva over the period 1850-2100, based on IPCC ssp126, ssp370 and ssp585 scenarios. [Dataset]. Recherche Data Gouv : <https://doi.org/10.57745/L4RABJ>

Données de température de peau entre 1999 et 2016 pour 446 plans d'eau : Prats *et al.* (2018). LakeSST: Lake Skin Surface Temperatures in French inland water bodies (Version 1.2) [Dataset]. Zenodo : <https://doi.org/10.5281/zenodo.1193745>

Données du Réseau national de suivi de la température des plans d'eau :

<http://geocatalogue.ecla.inrae.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/15881d2b-2310-4ea2-b80e-cbf8a48e1869>

SI OLA (Observatoire des lacs) : https://si-ola.inrae.fr/si_lacs/login.jsf

Pages des réseaux *in situ*

Réseau national de suivi de la température des plans d'eau : <https://poleecla.fr/reseau/thermie>

Réseau Lacs sentinelles : <https://www.lacs-sentinelles.org/>

RÉFÉRENCES

- Danis, P. A., von Grafenstein, U., & Masson-Delmotte, V. (2003). Sensitivity of deep lake temperature to past and future climatic changes: A modeling study for Lac d'Annecy, France, and Ammersee, Germany. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D19). <https://doi.org/10.1029/2003JD003595>
- Danis, P. A., von Grafenstein, U., Masson-Delmotte, V., Planton, S., Gerdeaux, D., & Moisselin, J. M. (2004). Vulnerability of two European lakes in response to future climatic changes. *Geophysical Research Letters*, 31(21). <https://doi.org/10.1029/2004GL020833>
- Desgué-Itier, O., Melo Vieira Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P. A., Domaizon, I., Guillard, J., Mazure, T., Sharaf, N., Soullignac, F., Tran-Khac, V., Vinçon-Leite, B., & Jenny, J. P. (2023). Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(3), 837-859. <https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
- Eyring, S., Reyes, M., Merz, E., Baity-Jesi, M., Ntetsika, P., Ebi, C., Dennis, S., & Pomati, F. (2025). Five years of high-frequency data of phytoplankton zooplankton and limnology from a temperate eutrophic lake. *Scientific Data*, 12(1), 653. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04988-9>
- Hipsey, M. R., Bruce, L. C., Boon, C., Busch, B., Carey, C. C., Hamilton, D. P., Hanson, P. C., Read, J. S., de Sousa, E., Weber, M., & Winslow, L. A. (2019). A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geoscientific Model Development*, 12(1), 473-523. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-473-2019>
- Jane, S. F., Hansen, G. J. A., Kraemer, B. M., Leavitt, P. R., Mincer, J. L., North, R. L., Pilla, R. M., Stetler, J. T., Williamson, C. E., Woolway, R. I., Arvola, L., Chandra, S., DeGasperi, C. L., Diemer, L., Dunalska, J., Erina, O., Flaim, G., Grossart, H. P., Hambright, K. D., ... Rose, K. C. (2021). Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 594(7861), 66-70. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
- Marcé, R., George, G., Buscarinu, P., Deidda, M., Dunalska, J., De Eyto, E., Flaim, G., Grossart, H. P., Istvanovics, V., Lenhardt, M., Moreno-Ostos, E., Obrador, B., Ostrovsky, I., Pierson, D. C., Potužák, J., Poikane, S., Rinke, K., Rodríguez-Mozaz, S., Staehr, P. A., ... Jennings, E. (2016). Automatic High Frequency Monitoring for Improved Lake and Reservoir Management. *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10780-10794. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01604>
- Moss, B., Kosten, S., Meerhoff, M., Battarbee, R. W., Jeppesen, E., Mazzeo, N., Havens, K. E., Lacerot, G., Liu, Z., De Meester, L., Paerl, H., & Scheffer, M. (2011). Allied attack: Climate change and eutrophication. *Inland Waters*, 1(2), 101-105. <https://doi.org/10.5268/IW-1.2.359>
- 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., Straile, D., Dong, B., Adrian, R., Allan, M. G., Anneville, O., Arvola, L., Austin, J., Bailey, J. L., ... Zhang, G. (2015). Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe: Global lake surface warming. *Geophysical Research Letters*, 42(24), 10,773-10,781. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- Papathanasopoulou, E., Simis, S., Alikas, K., Ansper, A., Saku Anttila, Attila, J., Anne-Laure Barillé, Barillé, L., Brando, V., Bresciani, M., Bučas, M., Gernez, P., Giardino, C., Harin, N., Hommersom, A., Kangro, K., Kaupilla, P., Koponen, S., Laanen, M., ... Zoffoli, M. L. (2019). Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive (Version 1.0). *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3463051>
- Perga, M. E., Bruel, R., Rodriguez, L., Guénand, Y., & Bouffard, D. (2018). Storm impacts on alpine lakes: Antecedent weather conditions matter more than the event intensity. *Global Change Biology*, 24(10), 5004-5016. <https://doi.org/10.1111/gcb.14384>
- Pilla, R. M., Williamson, C. E., Adamovich, B. V., Adrian, R., Anneville, O., Chandra, S., Colom-Montero, W., Devlin, S. P., Dix, M. A., Dokulil, M. T., Gaiser, E. E., Girdner, S. F., Hambright, K. D., Hamilton, D. P., Havens, K., Hessen, D. O., Higgins, S. N., Huttula, T. H., Huuskonen, H., ... Zadereev, E. (2020). Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. *Scientific Reports*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76873-x>
- Prats, J., & Danis, P. A. (2019). An epilimnion and hypolimnion temperature model based on air temperature and lake characteristics. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 420, 8. <https://doi.org/10.1051/kmae/2019001>
- Prats, J., Reynaud, N., Rebière, D., Peroux, T., Tormos, T., & Danis, P. A. (2018). LakeSST: Lake Skin Surface Temperature in French inland water bodies for 1999-2016 from Landsat archives. *Earth System Science Data*, 10(2), 727-743. <https://doi.org/10.5194/essd-10-727-2018>
- Rebiere, D., & Danis, P. A. (2015). Réseau de suivi pérenne de la température des plans d'eau à l'échelle nationale. Rapport Irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02602603>
- Rebiere, D., Peroux, T., Dublon, J., & Danis, P. A. (2015). Guide méthodologique: Protocole pour la réalisation de dispositifs de suivi pérenne de la température en plans d'eau. ONEMA.
- Rimet, F., Anneville, O., Barbet, D., Chardon, C., Crépin, L., Domaizon, I., Dorioz, J. M., Espinat, L., Frossard, V., Guillard, J., Goulon, C., Hamelet, V., Hustache, J. C., Jacquet, S., Lainé, L., Montuelle, B., Perney, P., Quetin, P., Rasconi, S., ... Monet, G. (2020). The Observatory on LAkes (OLA) database: Sixty years of environmental data accessible to the public: The Observatory on LAkes (OLA) database. *Journal of Limnology*. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2020.1944>
- Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P. J., Renard Truong, T., Meyerson, L. A., Bacher, S., Galil, B. S., Hulme, P. E., Ikeda, T., Kavileveetil, S., McGeoch, M. A., Nuñez, M. A., Ordonez, A., Rahlao, S. J., Schwindt, E., Seebens, H., Sheppard, A. W., Vandvik, V., Aleksanyan, A., ... Ziller, S. R. (2024). Curbing the major and growing threats from invasive alien species is urgent and achievable. *Nature Ecology & Evolution*, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02412-w>
- Sentis, A., Leclerc, C., Sharaf, N., Bruel, R., Reynaud, N., & Frossard, V. (2026). Utiliser les réseaux trophiques comme indicateur fonctionnel du changement global. *Sciences Eaux & Territoires*, (51), article 10055. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.51.10055>
- Sharaf, N., Prats, J., Reynaud, N., Tormos, T., Bruel, R., Peroux, T., & Danis, P. A. (2023). A long-term dataset of simulated epilimnion and hypolimnion temperatures in 401 French lakes (1959-2020). *Earth System Science Data*, 15(12), 5631-5650. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5631-2023>
- Sharaf, N., Reynaud, N., Tormos, T., & Bruel, R. (2024). Évolution de la température de surface des lacs en France hexagonale. <https://naturefrance.fr/indicateurs/evolution-de-la-temperature-de-surface-des-lacs-en-france-hexagonale>

RÉFÉRENCES

- Sharaf, N., Prats, J., Danis, P. A., Baudoin, J. M., Morin, G. P., Reynaud, N., Tormos, T., & Bruel, R. (2026). Increasing prevalence of warm monomictic lakes in France over six decades under climate change. *Climatic Change*, 179(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-04095-z>
- Soares, L. M. V., Desgué-Itier, O., Barouillet, C., Casenave, C., Domaizon, I., Frossard, V., Hairston Jr., N. G., Lami, A., Lemaire, B. J., Saulnier, G.-M., Soullignac, F., Vinçon-Leite, B., & Jenny, J. P. (2024). Unraveling Lake Geneva's hypoxia crisis in the Anthropocene. *Limnology and Oceanography Letters*, 10(1). <https://doi.org/10.1002/lol2.10435>
- Soares, L. M. V., Thouillot, M., Frossard, V., Desgué-Itier, O., Barouillet, C., Baulaz, Y., Clément, J. C., Domaizon, I., Dorioz, J. M., Goulon, C., Guillard, J., Jacquet, S., Réalis, E., Tran Khac, V., & Jenny, J. P. (2025). Expanding the European water Framework Directive indicators to address long-term climate change impacts on lakes using mechanistic lake models. *Ecological Indicators*, 172, 113220. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113220>
- Tormos, T., Lavergne, E., Pena Luque, S., Reynaud, N., Gasnier, N., Picot, N., Puissant, A., Gouteyron, P., Kosuth, P. (2026).. La surveillance des lacs vue de l'espace : une nouvelle source d'information sur le territoire national. *Sciences Eaux & Territoires*, (51), article 9928. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2026.51.9928>
- Tormos, T., Reynaud, N., Danis, P. A., Harmel, T., Morin, G., Martinez, J. M., Andral, A., Coque, A., Peroux, T., & Baudoin, J. M. (2021). *Quand la surveillance des plans d'eau prendra de la hauteur*. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2021.4.21>
- Tran-Khac, V., Doubek, J. P., Patil, V., Stockwell, J. D., Adrian, R., Chang, C. W., Dur, G., Lewandowska, A., Rusak, J. A., Salmaso, N., Straile, D., Thackeray, S. J., Venail, P., Bhattacharya, R., Brentrup, J., Bruel, R., Feuchtmayr, H., Gessner, M. O., Grossart, H.-P., ... Anneville, O. (2025). Using Long-Term Ecological Datasets to Unravel the Impacts of Short-Term Meteorological Disturbances on Phytoplankton Communities. *Freshwater Biology*, 70(5), e70023. <https://doi.org/10.1111/fwb.70023>
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M., & Sharma, S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), 388-403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>