



École des Ponts
ParisTech

leesu
laboratoire eau environnement systèmes urbains

THÈSE DE DOCTORAT
de l'École des Ponts ParisTech

**Lake ecosystems in a changing climate: strategy
for coupled hydrodynamic and biogeochemical
modelling**

École doctorale, Science Ingénierie et Environnement

Spécialité du doctorat : Sciences et Techniques de l'Environnement

Thèse préparée au sein du Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains

Thèse soutenue le 14 septembre 2021, par :
Francesco PICCIONI

Composition du jury :

Marieke Anna, FRASSL Researcher, Bundesanstalt für Gewässerkunde	Rapporteur
Tom, SHATWELL Researcher, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung	Rapporteur
Damien, BOUFFARD Directeur de recherche, EAWAG	Examinateur
Delphine, LATOUR Maitre de conférence, Université Clermont-Auvergne	Examinateuse
Pierre-Alain, DANIS Chargé de recherché, Office Français de la Biodiversité	Examinateur
Magali, JODEAU Ingénieur de recherche, EDF R&D, LHSV	Examinateuse
Céline, CASENAVE Chargée de recherche, UMR MISTEA - INRAE	Co-Directrice de thèse
Brigitte, VINÇON-LEITE Directrice de recherche, LEESU – ENPC	Directrice de thèse

Abstract

The ecological state of freshwater ecosystems worldwide has deteriorated along the past decades. Anthropogenic pressures have altered their physical and biogeochemical dynamics, acting both within their watershed and on the climatic conditions. Eutrophication and climate change contributed to the increase of algal blooms, and in particular of toxic cyanobacteria blooms, which currently constitute one of the main concern in the management of water resources.

With the advance of urbanization, an increasing number of lakes are located in metropolitan areas. The high loads of nutrients and pollutants coming from the watershed often lead urban lakes to eutrophic conditions and cyanobacteria blooms, which cause bathing bans and restrictions for aquatic sports. Responsive surveys and long-term climate change impact studies are essential for the management of such sites, but rarely addressed.

In this respect, modelling tools are of central importance to better understand the functioning of aquatic ecosystems, the factors triggering harmful algal blooms, and to support the management of water resources. However, aquatic ecological models are often complex and highly parametrized, and their implementation and calibration are challenging. Automated strategies for parameters calibration are available but are rarely applied. Furthermore, data from traditional periodical limnological survey do not allow to test the models on dynamics quicker than the span between two successive campaigns, and to thoroughly assess the uncertainty of their outcomes.

In this context, this PhD thesis focuses on the use of deterministic models to reproduce the thermal dynamics and phytoplankton dynamics, notably cyanobacteria, in a small and shallow urban lake on different time-scales. To do so, two coupled hydrodynamic and biogeochemical three-dimensional (3D) models are implemented and analysed. The models used here are the FLOW and BLOOM modules from the Delft3D modelling suite, and the biogeochemical library Aquatic EcoDynamics coupled with the hydrodynamic model TELEMAC3D. The models are applied on Lake Champs-sur-Marne, an urban lake located in the East of Paris that suffers from strong cyanobacterial blooms and for which an extensive data set is available.

This work aims to address in detail three strategic elements in lake ecosystem modelling:

- (i) The impact of climate change on the thermal regime of small and shallow lakes, and its relation to cyanobacterial growth. This is assessed through long-term 3D hydrodynamic simulations that allowed to hindcast the evolution of the study site during the past six decades.

- (ii) The applicability and the benefits of automated calibration for complex biogeochemical models. This is done through an innovative methodology for parameter estimation: Approximate Bayesian Computation (ABC), tested here for the first time on a complex, highly-parametrized model.
- (iii) The coupling and the feedbacks between hydrodynamic and biogeochemical models focusing on different time scales, and the importance of an extensive data set, that includes continuous high-frequency observations.

The results show that the impact of climate change on small and shallow lakes can be severe, with consequences on the stratification dynamics and that thermal conditions increasingly favourable for cyanobacterial growth have established over time in the study site. This suggests that cyanobacteria dominance could become a widespread issue in the near future, if such trends are confirmed. Furthermore, this work proves that automated calibration strategies, and ABC in particular, can be profitably applied to complex physically-based biogeochemical models in order to improve their results over the period chosen for calibration. Eventually, this work also highlights the importance of an extensive data set to set-up a coupled 3D hydrodynamic / biogeochemical model, and analyse and exploit its results over different time scales.

Key words: *Lake, Hydrodynamics, Ecological Modelling, Phytoplankton, Cyanobacteria, Climate change, Automated calibration, Approximate Bayesian computation*

Résumé

L'état écologique des écosystèmes d'eau douce s'est détérioré au cours des dernières décennies. Les pressions anthropiques ont modifié leurs dynamiques physiques et biogéochimiques en agissant à la fois au sein de leur bassin versant et sur les conditions climatiques. L'eutrophisation et le changement climatique ont contribué à l'augmentation des proliférations phytoplanctoniques, notamment des cyanobactéries, qui constituent aujourd'hui une préoccupation majeure pour la gestion des ressources en eau.

Avec l'avancée de l'urbanisation, un nombre croissant de lacs se trouve dans des zones métropolitaines, où les apports élevés de nutriments et de polluants en provenance du bassin versant peuvent favoriser les proliférations de cyanobactéries. Des systèmes de mesure en temps réel peuvent faciliter la surveillance à court terme de ces milieux. Pour une gestion durable à long terme, des études d'impact du changement climatique sont indispensables.

Les modèles déterministes sont essentiels pour améliorer la compréhension du fonctionnement des écosystèmes aquatiques, des facteurs de contrôle des efflorescences phytoplanctoniques et pour optimiser la gestion des ressources en eau. Cependant, les modèles écologiques aquatiques sont souvent complexes et hautement paramétrés. Leur mise en œuvre et leur calage sont des tâches complexes, rarement automatisées. De plus, les données issues des suivis limnologiques traditionnels, basés sur des campagnes de mesure périodiques, ne permettent pas de tester les modèles sur des dynamiques rapides, ni d'évaluer de manière approfondie l'incertitude de leurs résultats.

Dans ce contexte, cette thèse porte sur l'utilisation de modèles déterministes pour reproduire le fonctionnement thermique et la dynamique du phytoplancton, notamment des cyanobactéries, d'un lac urbain peu profond. Pour ce faire, deux modèles couplés hydrodynamique et biogéochimique tridimensionnels (3D) sont mis en œuvre et leurs résultats analysés : les modules FLOW et BLOOM de la suite Delft3D, et la librairie biogéochimique Aquatic EcoDynamics couplée au modèle hydrodynamique TELEMAC3D. Le site d'étude est le lac de Champs-sur-Marne, un lac urbain situé à l'est de Paris caractérisé par de fortes proliférations de cyanobactéries et pour lequel un grand jeu de données est disponible.

Ce travail vise à analyser trois éléments stratégiques pour la modélisation des écosystèmes lacustres :

- (i) L'impact du changement climatique sur le régime thermique des lacs et ses conséquences sur le développement des cyanobactéries, au travers de simulations hydrodynamiques 3D et la reconstitution de l'évolution thermique du site d'étude au cours des six dernières décennies.

- (ii) Les bénéfices du calage automatique pour des modèles biogéochimiques complexes, par l'application d'une méthodologie innovante pour l'estimation des paramètres: Approximate Bayesian Computation (ABC).
- (iii) Les effets de différentes approches de modélisation et de couplage entre modèles hydrodynamiques et biogéochimiques, et les avantages des observations en continu en haute fréquence pour les évaluer sur différentes échelles temporelles.

Les résultats de ce travail montrent que l'impact du changement climatique sur les lacs urbains sont importants, avec de fortes conséquences sur la dynamique de stratification et des conditions thermiques de plus en plus favorables aux cyanobactéries. Si de telles tendances se confirment, le problème posé par la dominance des cyanobactéries, pourrait encore s'aggraver dans un proche avenir. En outre, ce travail illustre l'intérêt de méthodes de calage automatique, l'ABC en particulier, pour améliorer les résultats de modèles biogéochimiques déterministes complexes sur la période choisie pour le calage. Enfin, ce travail met également en évidence l'importance d'un jeu de données étendu pour mettre en oeuvre un modèle couplé hydrodynamique/biogéochimique 3D et analyser ses résultats à différentes échelles de temps et d'espace.

Key words: *Lac, Hydrodynamique, Modélisation écologique, Phytoplancton, Cyanobactéries, Changements climatiques, Calage automatique, Approximate Bayesian computation*