



HAL
open science

First real-time monitoring system of fresh-water phytoplanktonic microorganisms: the PROLIPHYC system - Application to Grangent reservoir on the Loire river (France) - Le premier système de surveillance en temps réel des micro-organismes phytoplanktoniques en eaux douces : le système PROLIPHYC - Application à la retenue de Grangent sur la Loire (France)

Catherine Freissinet, Agnès Cabal, Aurélien Perrin, Stéphane Duflo, Jean-François Humbert, Bruno Tassin, Brigitte Vinçon-Leite, Bruno J. Lemaire, Briac Le Vu, Catherine Quiblier, et al.

HAL Id: hal-00817820

<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00817820>

Submitted on 30 Apr 2013

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.

► **To cite this version:**

Catherine Freissinet, Agnès Cabal, Aurélien Perrin, Stéphane Duflo, Jean-François Humbert, et al.. First real-time monitoring system of fresh-water phytoplanktonic microorganisms: the PROLIPHYC system - Application to Grangent reservoir on the Loire river (France) - Le premier système de surveillance en temps réel des micro-organismes phytoplanktoniques en eaux douces: le système PROLIPHYC - Application à la retenue de Grangent sur la Loire (France). International Symposium on Dams for A Changing World (ICOLD 2012 Kyoto), International Commission on Large Dams, 2012, Kyoto, Japon. p 249-271, article Q. 92 - R. 18. hal-00817820

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

VINGT QUATRIÈME CONGRÈS
DES GRANDS BARRAGES
Kyoto, Juin 2012

**LE PREMIER SYSTEME DE SURVEILLANCE EN TEMPS REEL DES MICRO-
ORGANISMES PHYTOPLANCTONNIQUES EN EAUX DOUCES :
LE SYSTEME PROLIPHIC – APPLICATION A LA RETENUE DE GRANGENT
SUR LA LOIRE (FRANCE)**

Dr. Catherine FREISSINET
Agnès CABAL
Aurélien PERRIN
Stéphane DUFLO

Equipe Eau et Territoires, SOGREAH Groupe ARTELIA

Dr. Jean-François HUMBERT
UMR Bioemco, France

Dr. Bruno TASSIN
Dr. Brigitte VINÇON-LEITE
Dr Bruno LÉMAIRE
Dr Briac LE VU

LEESU, Ecole des Ponts ParisTech, Université Paris-Est

Dr. Catherine QUIBLIER
Muséum National d'Histoire Naturelle

Marie-José SALENÇON
EDF R&D

FRANCE

1. INTRODUCTION

Les écosystèmes aquatiques continentaux sont au centre d'enjeux multiples (économique, écologique, patrimonial...) et constituent, à ce titre, une préoccupation majeure de ce début de siècle. Ils sont soumis à des pressions anthropiques croissantes qui se sont traduites, au cours des 30 dernières années, par une raréfaction des ressources en eaux douces mais aussi par une dégradation quasi générale de la qualité de ces écosystèmes. Cette dégradation se manifeste notamment par des proliférations de micro-organismes phytoplanctoniques qui perturbent à la fois les usages (eau potable, irrigation, hydroélectricité, activités récréatives, pêche...) et le fonctionnement de ces systèmes.

De plus, ces proliférations peuvent être associées à des risques sanitaires pour l'Homme et les animaux lorsque les organismes qui prolifèrent sont des cyanobactéries. Ces microorganismes sont en effet, capables de synthétiser diverses toxines. C'est pourquoi, en 1998, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a proposé des recommandations pour la surveillance des cyanobactéries et les usages des eaux contaminées, recommandations qui ont été ensuite adoptées par de nombreux Etats. Dans ce contexte particulier, mais aussi au sein de l'Union européenne dans le cadre plus général de la Directive Eau de Baignade et de la Directive Cadre Eau qui demandent aux états-membres d'atteindre et de préserver le bon état écologique de leurs milieux aquatiques, une forte demande a émergé pour des approches et des outils automatisés permettant d'évaluer et de surveiller les communautés phytoplanctoniques dans les écosystèmes aquatiques.

Le projet PROLIPHYC s'est inscrit dans ce cadre général. Il avait pour objectifs, le développement, la validation et l'industrialisation d'un système de surveillance et d'alerte en temps réel pour la gestion des risques liés aux proliférations phytoplanctoniques, dont les cyanobactéries, dans les plans d'eau douce mais aussi dans les rivières lentes.

Cinq laboratoires de recherche (LEESU, INRA, MNHN, DT INSU, LGE), un organisme gestionnaire de la ressource en eau (CISALB), une PME (nke) et un grand groupe SOGREAH, coordinateur du projet, ont mis en commun, leurs compétences respectives, pour mener à bien ce projet.

2. LE SYSTÈME PROLIPHYC

Le système PROLIPHYC est un système automatisé et modulable de suivi et d'exploitation des données en temps réel générant des indicateurs et proposant une prévision, selon divers scénarii météorologiques, de la croissance

des cyanobactéries. Une interface utilisateur conviviale est fournie aux gestionnaires des milieux aquatiques pour pouvoir pleinement exploiter ce nouvel outil intégré fiable et complet pour la surveillance et l'alerte. Par ailleurs, ce système constitue également un outil de recherche pour mieux comprendre, à des échelles temporelles fines, les facteurs de contrôle de la dynamique des populations phytoplanctoniques dans les écosystèmes aquatiques.

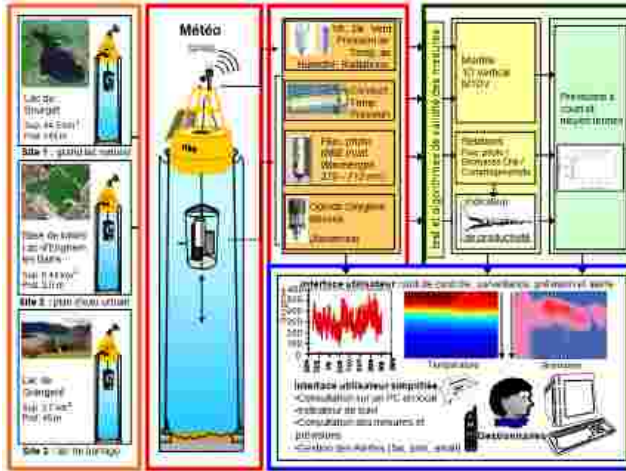


Fig. 1
Vue d'ensemble du système Proliphyc
Overview of the Proliphyc system

Le système PROLIPHIC est aujourd'hui opérationnel et il a été testé entre 2007 et 2010 sur trois sites présentant des caractéristiques très différentes : le lac du Bourget (lac de 145 m de profondeur hébergeant une cyanobactérie qui se développe en profondeur, *Planktothrix rubescens*), la base nautique d'Enghien Les Bains (plan d'eau de 2.5 m de profondeur hébergeant de très fortes proliférations d'une cyanobactérie qui occupe toute la colonne d'eau, *Planktothrix agardhii*) et la retenue de Grangent (lac de barrage sur la Loire de profondeur 50m, qui héberge la cyanobactérie *Microcystis aeruginosa* qui peut s'accumuler en couches épaisses à la surface de l'eau).

2.1. DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

Le développement du système PROLIPHIC comporte une partie météorologique incluant les bouées et des capteurs intégrés et une partie exploitation avec les méthodes de filtrage et traitement des données, les

modèles prédictifs, les indicateurs de niveau d'alerte, la base de données et l'interface utilisateur.

2.1.1. Un premier prototype pour le Lac du Bourget

Le premier prototype de la bouée, , développé sur le site du lac du Bourget, a permis de tester et de sélectionner les différents capteurs immergés destinés à équiper les bouées « Proliphyc » : une sonde CTD-O₂ nke (conductivité, température, pression, oxygène dissous mesuré par une optode Aanderaa 3835) et un fluorimètre multi longueurs d'onde BBE-Moldaenke FluoroProbe100 (450, 525, 570, 590 et 610 nm) qui permet d'estimer la quantité de chlorophylle et sa répartition dans les différentes classes phytoplanctoniques (cyanobactéries, diatomées...). L'ensemble est piloté par un cerveau unique (contrôleur CF2: cycle d'interrogation des différents capteurs, acquisition de données, stockage local, mises en veille). L'alimentation sur batterie rend la bouée autonome pour au moins trois mois de mesures (sur la base d'une période d'échantillonnage de 15min).

2.1.2. Premier prototype de bouée industrialisée, bouée dite « Petit Lac »

Equipée des mêmes capteurs immergés que ceux décrits dans le paragraphe précédent, une bouée instrumentée dénommée PL, (Petit Lac) a été développée dans un second temps, en intégrant les contraintes d'industrialisation nécessaires à sa commercialisation à l'issue du projet. Cette bouée, dont le flotteur de 200L est particulièrement bien adapté aux lacs urbains de taille moyenne, comporte en plus une station météo comprenant un capteur de vent/pluie Vaisala WXT520, un capteur d'irradiance Kipp&Zonen CMP11, et un compas nke. L'ensemble est piloté par un automate et les données sont transmises par un modem GPRS. L'alimentation sur batterie rechargeable par un panneau solaire, rend la bouée autonome pour une période de plusieurs mois.

2.1.3. Deuxième Prototype de bouée industrialisée, bouée dite « Grand Lac »

Après le développement de cette première bouée PL et compte tenu de l'expérience acquise avec le prototype utilisé sur le lac du Bourget, une bouée adaptée aux lacs profonds, dénommée GL (Grand Lac) a été alors développée. Cette bouée comporte plusieurs évolutions pour lui permettre de fonctionner en conditions de forte houle (>1 m), qui peuvent se rencontrer en grand lac. Pour répondre à ce besoin, un flotteur de 1000L et un amortisseur de houle ont été intégrés au dispositif afin de lui procurer une stabilité suffisante et une protection accrue au pilonnement. Comme pour la bouée PL, une remontée automatique quotidienne des capteurs dans une chambre de chloration permet de limiter la colonisation des capteurs par des organismes (biofouling). Cette bouée a été testée sur la retenue de Grangent.

3. RETENUE DE GRANGENT

3.1. PRÉSENTATION DU SITE ET DES ENJEUX DU SYSTÈME PROLI PHYC

La retenue de Grangent a été créée en 1957. Elle est située dans le sud-est du Massif central, à environ 15 km à l'ouest de Saint-Etienne, à 420 m d'altitude. Cette retenue constitue une importante réserve d'eau ($57,4 \times 10^6 \text{ m}^3$), d'une longueur de 21 km, une superficie totale de 365 ha, et une profondeur maximale de 50 m au droit du barrage. Elle draine un vaste bassin versant de 3850 km², à forte dominance agricole



Fig. 2

Vue de la retenue de Grangent en direction du barrage (Photo A. Svanis)
View of Grangent reservoir looking towards the dam

La fonction essentielle du barrage de Grangent est la production d'électricité. L'eau turbinée est répartie à l'aval entre la Loire et le canal du Forez qui alimente la plaine du Forez. Ce canal destiné à l'origine à l'irrigation, assure également la fourniture en eau potable de collectivités locales de la plaine du Forez. Une tranche d'eau annuelle est également réservée à l'agriculture. Enfin, une importante activité touristique est associée à la retenue avec la base nautique de Saint-Victor-sur-Loire : pêche, plages aménagées, activités nautiques.

3.2. PROLIFÉRATION DE *MICROCYSTIS AERUGINOSA* DANS LA RETENUE DE GRANGENT

Depuis la fin des années 1970, les apports excessifs de phosphore et d'azote par les activités agricoles et les rejets d'eaux usées ont conduit à l'augmentation du niveau trophique du lac dont l'une des conséquences les plus spectaculaires et les plus gênantes a été l'apparition, récurrente, d'importantes efflorescences estivales de *Microcystis aeruginosa* vers la fin des années 1980. Différentes actions ont été entreprises afin d'enrayer ces proliférations, qui se sont révélées être plus ou moins efficaces: mise en place d'un égout collecteur dans la vallée de l'Ondaine en 1995, modernisation de la station d'épuration du Pertuiset en 1997, dispositif de brassage artificiel dans la zone des baignades et activités nautiques. L'ensemble de ces efforts s'est traduit par une diminution de l'intensité des efflorescences cyanobactériennes sur cette retenue, même si des proliférations importantes continuent à être observées certaines années.



Fig. 3

Une prolifération de *M. aeruginosa* dans la retenue de Grangent
(Photo D. Latour)

Proliferation of M. aeruginosa in Grangent reservoir (Photo D. Latour)

3.3. LES ATTENTES DES USAGERS POTENTIELS DU SYSTEME PROLIPHYC

Les perturbations principales causées par les proliférations de *M. aeruginosa* dans la retenue de Grangent concernent à la fois l'aspect visuel de la retenue qui se trouve localement recouverte d'une épaisse couche verte (voir photo ci-dessus) correspondant à des accumulations de la cyanobactérie, la

diminution de la transparence de l'eau qui pose un problème de sécurité pour la baignade, et le risque sanitaire associé à la production de toxines par la cyanobactérie. En effet, *M. aeruginosa* est connue pour synthétiser des microcystines qui sont des toxines hépatiques dangereuses pour la santé animale et humaine.

3.4. MISE EN ŒUVRE DE LA BOUÉE GRAND LAC

La bouée PROLIPHYC GL (Grand Lac) mise en œuvre sur la retenue de Grangent est équipée d'un flotteur de plus grande dimension et, d'un amortisseur de houle pour le système de treuil, afin de pouvoir mieux supporter les contraintes physiques, notamment la houle, exercées dans les écosystèmes lacustres de grande dimension.

Le mouillage de cette bouée a été réalisé le 30 Juin 2009 dans une zone où la profondeur est de 45 m et il a nécessité l'emploi de deux ancres et de deux petits flotteurs latéraux, afin de ne pas gêner le déplacement vertical du panier équipé des capteurs lorsque les profils sont réalisés.

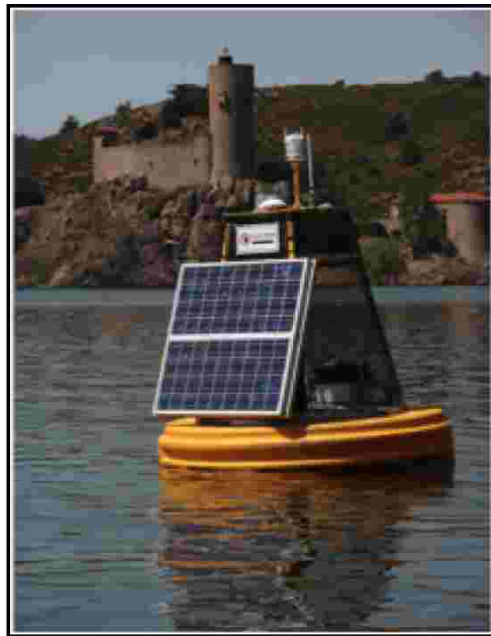


Fig. 4

La bouée Proliphyc GL sur la retenue de Grangent
The LL Proliphyc buoy on Grangent reservoir

Le choix du site de mouillage a été déterminé après une étude préliminaire qui a montré que les proliférations semblaient plutôt se développer dans la partie aval de la retenue. Par ailleurs, ce choix permettait également de comparer les données fournies par la bouée à celles résultant du suivi bimensuel effectué dans la même zone, par EDF R&D en collaboration avec l'Université de Clermont Ferrand.

3.5. PRÉSENTATION DES SÉRIES DE DONNÉES

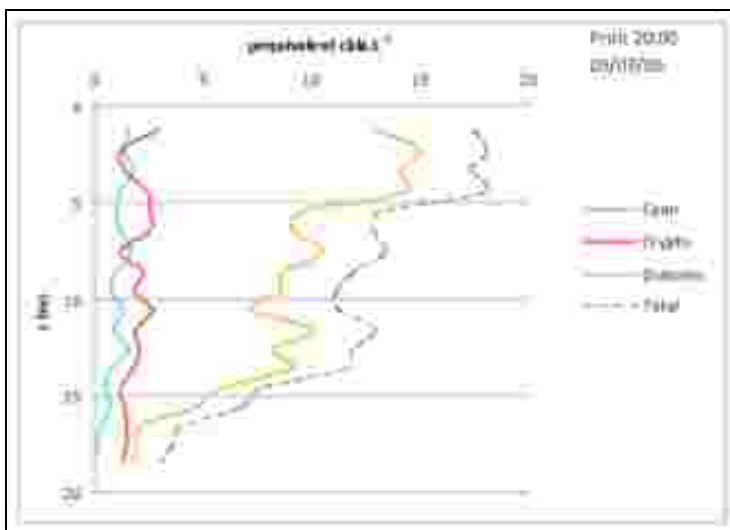


Fig. 5

Profils verticaux de la biomasse phytoplanctonique entre 0 et 18 m de profondeur sur la retenue de Grangent, le 09/07/09.

Vertical profiles of phytoplankton biomass between depths of 0 and 18 m on Grangent reservoir, on 09/07/09

Une première série de données a été obtenue entre le 30 juin et le 5 août 2009, avec un système configuré comme prévu initialement (capacité à faire des profils verticaux sur 18 m dans la colonne d'eau, voir figure ci-contre)., A la suite de problèmes techniques liés à l'usure du câble supportant le panier, une nouvelle configuration du système limitant la profondeur des profils verticaux aux cinq premiers mètres de la colonne d'eau a ensuite été utilisée jusqu'à fin 2010.

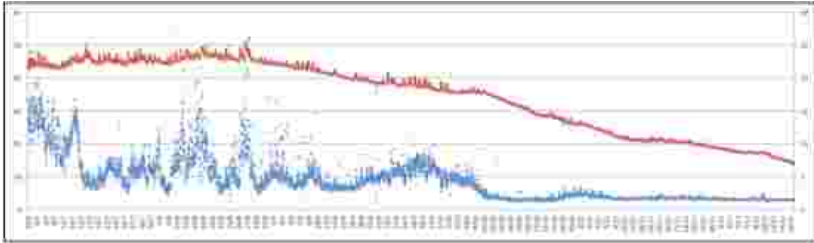


Fig. 6

Variations à 1 m de profondeur de la température de l'eau (courbe rouge) et des concentrations totales en chlorophylle a (courbe bleue) entre Juillet et Décembre 2010.

Variations in water temperature (red line) and total chlorophyll a concentrations (blue line) at a depth of 1 m between July and December 2010.

Une série complète de données a donc été obtenue sur la période allant de Juillet 2010 à Décembre 2010. Un exemple de ces données est fourni dans la figure 6. Cependant, l'année 2010 a été marquée par un très faible développement de la cyanobactérie *M. aeruginosa*.

3.6. ANALYSE ET EXPLOITATION

Compte tenu des faibles biomasses de *M. aeruginosa* en 2010, il n'a pas été possible de procéder à une validation complète des données fournies par les capteurs. Nous avons toutefois pu observer une bonne corrélation entre les valeurs fournies par la sonde BBE et les valeurs de chlorophylle-*a* estimées en spectrométrie après extraction des pigments (valeurs fournies par EDF/Université de Clermont-Ferrand), de même qu'entre ces mêmes données de la sonde BBE et les estimations d'abondances et de biomasses obtenues par comptage du phytoplancton. Une corrélation significative existe également entre les données de biomasses en cyanobactéries fournies par la sonde et le comptage du nombre de colonies de *Microcystis*. L'ensemble de ces relations méritera d'être confirmée pour des gammes de valeurs plus larges, comportant notamment des valeurs plus élevées.

3.7. UTILISATION DU MODÈLE COUPLE DYRESM / CAEDYM

Pour modéliser le fonctionnement thermique et biologique de la retenue de Grangent, le modèle numérique couplé DYRESM-CAEDYM du Center for Water Research australien a été mis en œuvre. Le modèle thermique DYRESM a été

appliqué à la retenue de Grangent, avec comme forçage météorologique les observations de la station Météo France de l'aéroport de Saint-Etienne. Il a été calé pour l'année 2005 avec les profils thermiques mesurés par EDF R&D. Le modèle thermique reproduit correctement l'évolution de la température de l'eau. (Fig. 7). Les débits transitant dans la retenue n'ont pas été pris en compte puisque la période d'intérêt pour l'activité phytoplanctonique, essentiellement centrée sur l'été, correspond à l'étiage de la Loire.

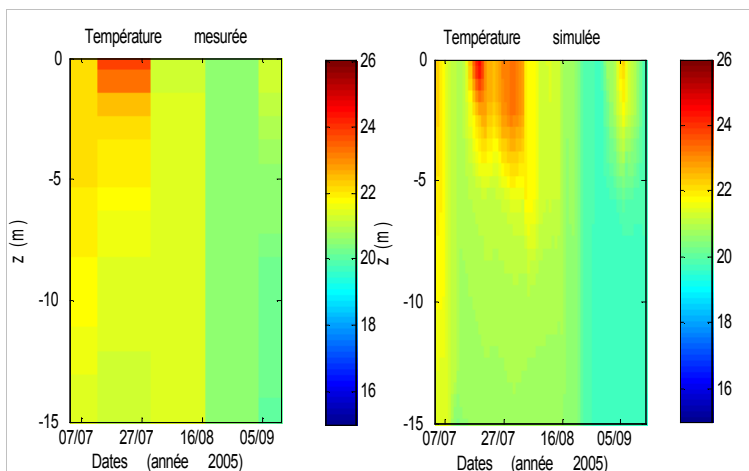


Fig. 7

Modélisation thermique sur le lac de Grangent effectuée à partir de données EDF de l'année 2005.

Thermal modelling on Grangent reservoir on the basis of EDF data for the year 2005

Le modèle thermique a ensuite été validé avec succès, sur les mesures de la bouée de juillet 2009.

Dans le modèle biologique CAEDYM, nous avons fait l'hypothèse que les seuls facteurs limitants de la croissance des cyanobactéries dans la retenue de Grangent sont la lumière et la température, négligeant ainsi le rôle des nutriments. Le modèle ne décrit que la seule espèce *M. aeruginosa*, et tient compte de ses migrations verticales caractéristiques (alourdissement des colonies le jour par accumulation de carbohydrates générés par la photosynthèse, allègement des colonies la nuit par consommation des carbohydrates lors de la respiration et de la biosynthèse). Le modèle reproduit bien les tendances du comportement des cyanobactéries à l'été 2009, notamment une légère croissance vers le 15 juillet qui s'estompe ensuite (Fig. 8).

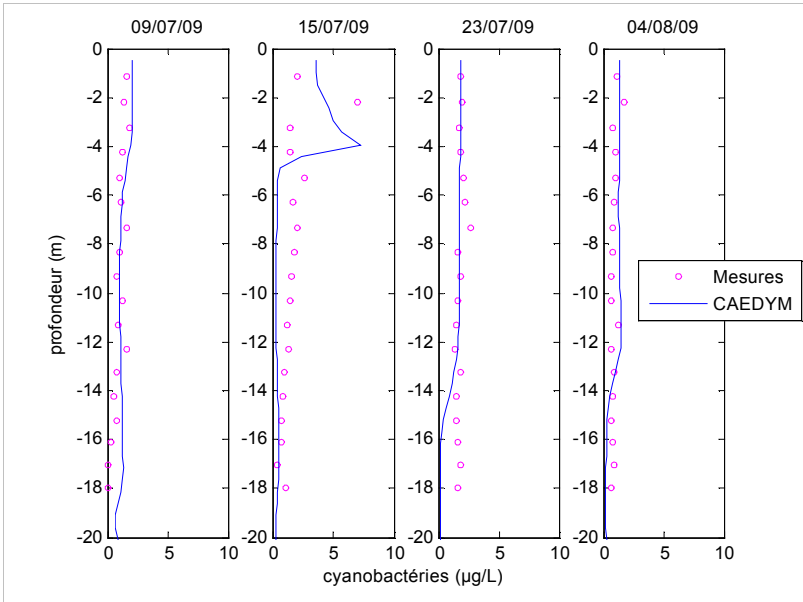


Fig. 8

Modélisation de la répartition verticale de la biomasse des cyanobactéries dans la retenue de Grangent, durant l'été 2009.

Modelling of the vertical distribution of cyanobacteria biomass in Grangent reservoir, during summer 2009

Modélisation prédictive : En raison du trop faible développement de *M. aeruginosa* en été 2009, il n'a pas été possible de tester la modélisation prédictive ni de mettre en place le système d'alerte en 2009. Le modèle ainsi calé a été utilisé au mois de mai 2010 pour réaliser des prévisions de concentrations en cyanobactéries en utilisant les prévisions météorologiques à l'horizon de trois jours réalisées par Météo-France. Les concentrations en cyanobactéries étaient encore très faibles à cette période. La figure 9 présente un exemple de résultats sur une prévision réalisée le 25 mai et comparée aux observations faites les jours suivants. Même si certaines simulations sont moins bonnes que celle qui est présentée, l'ordre de grandeur des valeurs simulées reste correct.

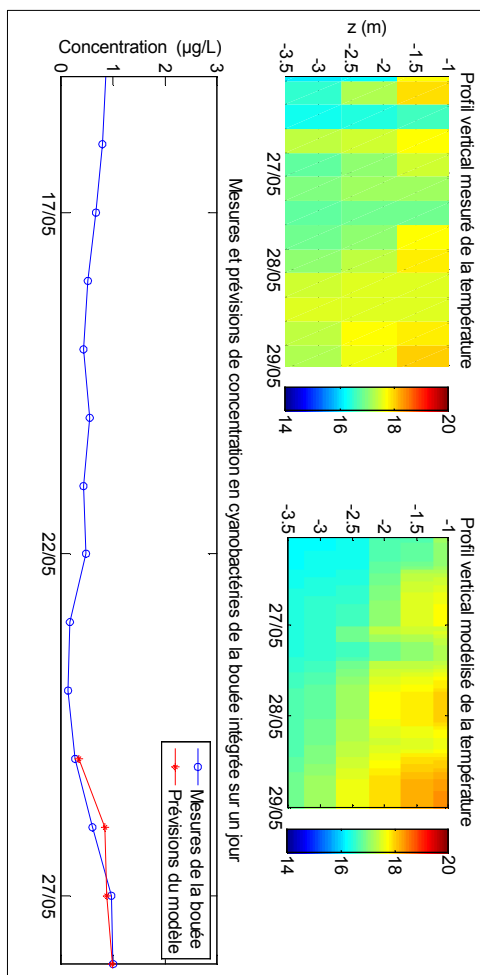


Fig. 9

En haut : profils de température mesurés et prédits par le modèle entre le 26 et le 29 mai 2010 sur les quatre premiers mètres de profondeur.

Upper panel: temperature profiles measured and predicted by the model between 26 and 29 May 2010 over the first four metres below the surface.

En bas : Comparaison rétrospective de la concentration en cyanobactéries à 1 m de profondeur mesurée par la bouée (moyenne journalière) et calculée par le modèle sur trois jours avec les prévisions météorologiques disponibles au 25 Mai 2010

Lower panel: Retrospective comparison of cyanobacteria concentration at a depth of 1 m measured by the buoy (daily average) and calculated by the model over three days using the weather forecasts available on 25 May 2010

CONCLUSION

La configuration de la bouée testée à Grangent correspond à une version améliorée du système complet tel qu'il avait été imaginé en début de projet. En effet, alors que selon les spécifications initialement prévues, les mesures devaient être réalisées par les capteurs en une seule profondeur, il a été décidé de concevoir un système permettant l'acquisition de profils verticaux. Ceci constitue un défi technologique important, même si le système n'est actuellement opérationnel que pour l'exploration des 5 premiers mètres de surface.

L'application informatique d'acquisition, de traitement, de validation et d'alerte constitue l'application d'aide à la décision intégrée du système. Elle se concrétise, pour les gestionnaires par différents niveaux d'information disponibles dans l'environnement du système d'alerte :

- surveillance du bon fonctionnement de l'acquisition des données en temps réel,
- surveillance des alertes en temps réel en provenance de la bouée,
- suivi des principales mesures (météorologie, qualité de l'eau, proliférations algales),
- mise à disposition d'indicateurs d'aide à la décision basés à la fois sur les mesures réalisées et sur les prévisions émises.



L'ensemble des fonctionnalités offertes par ce système est présenté en détail dans un manuel utilisateur et la brochure commerciale est disponible sur simple demande à l'auteur principal.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le programme PRECODD de l'ANR pour sa participation financière au projet, pour ses encouragements et félicitations.

Un comité de suivi composé des agences de l'Eau RM&C, Seine Normandie, Loire Bretagne, Rhin-Meuse, VEOLIA eau, ONEMA, EDF, BRGM et la ville d'Enghien les Bains, a été mis en place par les partenaires du projet pour apporter un avis externe sur les recherches, sur la qualité scientifique et

l'opérationnalité du système final. Les Partenaires du projet remercient profondément ce comité.

Un remerciement particulier à l'Université de Clermont Ferrand (en particulier D. Latour et M. Sabart) qui a apporté des informations complémentaires pour le réservoir de Grangent.

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel de la dégradation de la qualité des écosystèmes aquatiques continentaux, la création du système PROLIPHYC présentée ici, avait pour objectif le développement, la validation et l'industrialisation d'un système de surveillance et d'alerte en temps réel pour la gestion des risques liés aux proliférations phytoplanctoniques, dont les cyanobactéries, dans les plans d'eau et les rivières lentes utilisés pour des activités récréatives ou la production d'eau potable.

Le développement des bouées PROLIPHYC a représenté un défi technologique important. Ces bouées sont équipées d'un panier instrumenté de capteurs qui permettent la mesure en continu de paramètres physiques, chimiques et biologiques à différentes profondeurs. Les données peuvent être réceptionnées et traitées en temps réel. Ces bouées ont par ailleurs été équipées d'un système de protection anti-fouling.

Dans une première phase, le développement a permis, à partir d'un prototype, la réalisation d'une bouée dite « Petit Lac » (PL), bien adaptée au système peu profond tel que le lac d'Enghien-les-Bains où elle a été testée. Dans un second temps, une bouée de type « Grand Lac » (GL) a été conçue, mieux adaptée aux systèmes pouvant présenter de fortes houles.

Après la présentation de ces bouées, l'article donne l'exemple du retour d'expérience de l'utilisation de la bouée GL sur la retenue de Grangent. Ce lac de barrage sur la Loire est caractérisé par des proliférations estivales de la cyanobactérie *Microcystis aeruginosa*. En particulier sont présentées des données de biomasses phytoplanctoniques et de températures, brutes, et modélisées pouvant être exploitées dans une modélisation prédictive et d'alimenter le système d'alerte.

Finalement, le travail présenté ici montre que le système PROLIPHYC, associant des bouées, des capteurs et un système informatique d'acquisition, de traitement, de validation et d'alerte peut constituer un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de plans d'eau confrontés aux problèmes des proliférations phytoplanctoniques.

**THE FIRST REAL-TIME SYSTEM FOR MONITORING PHYTOPLANKTON
MICRO-ORGANISMS IN FRESH WATER:
THE PROLIPHYC SYSTEM – APPLICATION TO GRANGENT RESERVOIR ON
THE RIVER LOIRE (FRANCE)**

1. INTRODUCTION

Continental aquatic ecosystems are at the focal point of multiple challenges (economic, ecological, patrimonial, etc.) and are hence a key concern in this early part of the 21st century. They are subject to increasing anthropogenic pressures, which in the past 30 years have resulted in both the depletion of fresh water resources and a widespread deterioration in ecological quality. These deteriorating conditions are frequently reflected in phytoplankton blooms that disrupt both water uses (drinking water, irrigation, hydropower, leisure activities, fishing, etc.) and the functioning of these ecosystems.

Furthermore, these blooms can give rise to health risks for man and animals when the microorganisms concerned are cyanobacteria, which are capable of synthesizing a variety of toxins. For this reason, in 1998 the World Health Organization (WHO) drew up a series of recommendations for monitoring cyanobacteria and the use of contaminated water, which were subsequently adopted by many countries. In this particular context, but also within the wider framework of the European Union's Bathing Water Directive and Water Framework Directive, which require member states to attain and preserve satisfactory conditions in their aquatic environments, strong demand has emerged for automated approaches and tools for evaluating and monitoring phytoplankton communities in aquatic ecosystems.

The PROLIPHYC project ties in with this general framework. Its aim was to develop, validate and produce industrially a real-time monitoring and warning system for managing risks related to the proliferation of phytoplankton, including cyanobacteria, in fresh water bodies and slow-flowing rivers.

Five research laboratories (LEESU, INRA, MNHN, DT INSU, LGE), a water resource management agency (CISALB), a small firm (nke) and a major group, Sogreah, the project coordinator, pooled their respective skills to complete this project.

2. THE PROLIPHYC SYSTEM

PROLIPHYC is a modular, automated system for monitoring and interpreting data in real time, generating indicators and producing a cyanobacteria growth forecast according to various weather scenarios. A user-friendly interface enables aquatic environment managers to make full use of the capabilities of this new comprehensive, reliable, integrated monitoring and warning tool. This system also constitutes a valuable research tool that can be used to gain a better understanding of the factors controlling the dynamics of phytoplankton populations in aquatic ecosystems at small time scales.

Fig. 10
Vue d'ensemble du système PROLIPHYC
Overview of the PROLIPHYC system

The PROLIPHYC system is now operational, having been tested between 2007 and 2010 on three sites in France with very different physical characteristics: Lake Bourget (145 m, deep harbouring a cyanobacteria that develops in deep water, *Planktothrix rubescens*), Enghien Les Bains water sports centre (lake 2.5 m deep harbouring major proliferations of cyanobacteria covering the entire water column, *Planktothrix agardhii*) and Grangent reservoir (lake formed by a dam on the river Loire, 50 m deep, harbouring the *Microcystis aeruginosa* cyanobacteria, which can develop in thick layers on the water surface).

2.1. TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

Development of the PROLIPHYC system comprised a metrological phase, concerning the buoys and built-in sensors, and an operation phase, covering the data filtering and processing methods, predictive models, warning level indicators, database and user interface.

2.1.1. *A first prototype for lake Bourget*

The first prototype buoy, developed on the Lake Bourget site, was used to test and select the various immersed sensors to be fitted to the "Proliphyc" buoys: an nke CTD-O₂ probe (conductivity, temperature, pressure, dissolved oxygen measured by an Aanderaa 3835 optode) and a BBE-Moldaenke FluoroProbe100 multi-wavelength fluorimeter (450, 525, 570, 590 and 610 nm) for estimating the chlorophyll concentrations and its distribution in the various phytoplankton classes (cyanobacteria, diatoms, etc.). The assembly is controlled by a single nerve centre (CF2 controller: sensor interrogation cycle, data

acquisition, local storage, placing of devices on standby). Thanks to its battery power supply the buoy is self-powered for at least three months of measurements (based on a sampling period of 15min).

2.1.2. First prototype buoy for industrial production, the "Small Lake" buoy

An instrumented buoy named SL (Small Lake), fitted with the same immersed sensors as described above, was developed in a second phase, incorporating the constraints of industrial production so as to be able to market it at the end of the project. This buoy, with a 200L float particularly well suited to medium-sized urban lakes, is also fitted with a weather station comprising a Vaisala WXT520 wind/rain sensor, a Kipp&Zonen CMP11 irradiance sensor, and an nke compass. The assembly is controlled by a Programmable Logic Controller (PLC) and data are transmitted via a GPRS modem. Thanks to its battery power supply, which can be recharged by a solar panel, the buoy is self-powered for several months.

2.1.3. Second prototype buoy for industrial production, the "Large Lake" buoy

Having developed the first SL buoy, the experience gained with the prototype used on Lake Bourget was drawn on to develop a buoy suitable for use on deep lakes, called the LL (Large Lake). This buoy features several upgrades enabling it to operate in heavy swell (>1 m), which can occur on a large lake. To meet this need, a 1000L float and a wave damper were added to the buoy to give it sufficient stability and increased protection from heave. As with the SL buoy, the sensors are automatically retracted daily into a chlorination chamber in order to restrict the undesirable accumulation of microorganisms (biofouling). This buoy was tested on Grangent reservoir.

3. GRANGENT RESERVOIR

3.1. PRESENTATION OF SITE AND CHALLENGES FOR PROLIHYC

Grangent reservoir was created in 1957. It is located in the south-eastern Massif Central, about 15 km west of Saint-Etienne, at an altitude of 420 m. This major water resource (57.4 x 106 m³) is 21 km long, has a total surface area of 365 ha, and reaches a maximum depth of 50 m next to the dam. It drains a vast catchment area measuring 3850 km², mainly given over to agriculture.

Fig. 2

Vue de la retenue de Grangent en direction du barrage (Photo A. Svanis).
View of Grangent reservoir looking towards the dam

The primary function of Grangent dam is to generate electricity. The turbined water is distributed downstream between the river Loire and the Canal du Forez, which conveys water to the Forez plain. This canal was originally intended for irrigation, but also supplies the localities on the Forez plain with drinking water. An annual water allowance is also reserved for agriculture. Lastly, tourism has developed on a considerable scale around the recreation area at Saint-Victor-sur-Loire (fishing, beaches with facilities, water sports).

3.2. PROLIFERATION OF MICROCYSTIS AERUGINOSA IN GRANGENT RESERVOIR (PHOTO D. LATOUR)

In the late 1970s, excessive inflows of phosphorus and nitrogen from agriculture and discharges of wastewater began increasing the lake trophic level, one of the most spectacular and troublesome consequences of which was the recurring summertime development of *Microcystis aeruginosa* blooms around the late 1980s. Various steps were taken to eradicate these blooms, with varying degrees of success: a main sewer was laid in the Ondaine valley in 1995, Le Pertuiset wastewater treatment plant was modernised in 1997, and an artificial water mixing system was installed in the bathing and water sports area. These efforts have reduced the intensity of cyanobacteria proliferation on the reservoir, even though major blooms continue to occur in some years.

Fig. 3

Une prolifération de *M. aeruginosa* dans la retenue de Grangent
(Photo D. Latour).

Proliferation of M. aeruginosa in Grangent reservoir (Photo D. Latour)

3.3. EXPECTATIONS OF POTENTIAL PROLIPHYC SYSTEM USERS

The disruption caused by *M. aeruginosa* blooms on Grangent reservoir mainly relates to visual appearance, since the water surface becomes locally covered by a thick green layer (see photo above) due to cyanobacteria accumulation, to reduced water transparency, causing safety problems for bathers, and to the health risks associated with the toxins produced. Indeed, *M. aeruginosa* is known to synthesize microcystins, whose hepatotoxicity can be harmful for animals and humans.

3.4. IMPLEMENTATION OF LARGE LAKE BUOY

The PROLIPHYC LL (Large Lake) buoy implemented on Grangent reservoir is fitted with a larger float and a wave damper for the winch system, increasing its ability to withstand the physical stresses, especially swell, arising in large lake ecosystems.

This buoy was anchored on 30 June 2009 in an area 45 m deep. Two anchors and two small side floats had to be used to avoid hampering the vertical movement of the basket carrying the sensors when the profiles are taken.

The anchorage site was selected after a preliminary study showing that algal blooms tended to develop in the downstream part of the reservoir. This choice also made it possible to compare the data supplied by the buoy with those obtained from the bimonthly monitoring carried out in the same area by EDF R&D in collaboration with the University of Clermont Ferrand.

Fig. 4
La bouée Proliphyc GL sur la retenue de Grangent
The LL Proliphyc buoy on Grangent reservoir

3.5. PRESENTATION OF DATA SERIES

Fig. 5
Profils verticaux de la biomasse phytoplanctonique entre 0 et 18 m de profondeur sur la retenue de Grangent, le 09/07/09.
Vertical profiles of phytoplankton biomass between depths of 0 and 18 m on Grangent reservoir, on 09/07/09.

A first data series was obtained between 30 June and 5 August 2009, with the system configured as planned initially (ability to take vertical profiles over 18 m in the water column, see figure opposite). Following technical problems relating to wear on the cable carrying the basket, a new system configuration limiting the vertical profile depth to the first five metres of the water column was then used until the end of 2010.

Fig. 6
Variations à 1 m de profondeur de la température de l'eau (courbe rouge) et des concentrations totales en chlorophylle a (courbe bleue) entre Juillet et Décembre 2010.
Variations in water temperature (red line) and total chlorophyll a concentrations (blue line) at a depth of 1 m between July and December 2010.

A complete data series was hence obtained for the period between July and December 2010. An example of these data is given in figure 6. However, *M. aeruginosa* cyanobacteria only developed on a small scale in 2010.

3.6. ANALYSIS AND INTERPRETATION

Given the small quantities of *M. aeruginosa* biomass that developed in 2010, it was not possible to validate the data supplied by the sensors completely. However, we noted a good correlation between the values supplied by the BBE probe and the chlorophyll-a values estimated through spectrometry after extracting the pigments (values supplied by EDF/University Clermont-Ferrand), as well as between the same data from the BBE probe and the abundance and biomass estimates obtained by counting the phytoplankton cells. There is also a significant correlation between the cyanobacteria biomass data supplied by the probe and the number of *Microcystis* colonies counted. It is worth confirming all these correlations on wider value ranges, notably including higher values.

3.7. USE OF THE DYRESM / CAEDYM COUPLED MODEL

To model the thermal and biological functioning of Grangent reservoir, the DYRESM-CAEDYM coupled numerical model from the Centre for Water Research in Australia was used. The DYRESM thermal model was applied to the reservoir, forced with the weather data recorded at the Météo France station at Saint-Etienne airport. It was adjusted for 2005 with the thermal profiles measured by EDF R&D. The thermal model reproduces water temperature variations correctly (Fig. 7). Discharges transiting through the reservoir were not taken into account since the period relevant for phytoplankton activity, mainly occurring in summer, corresponds to the low-flow period on the river Loire.

Fig. 7

Modélisation thermique sur le lac de Grangent effectuée à partir de données EDF de l'année 2005.

Thermal modelling on Grangent reservoir on the basis of EDF data for the year 2005.

The thermal model was then successfully validated using the measurements taken by the buoy in July 2009.

In the CAEDYM biological model, we assumed that the only factors limiting cyanobacteria growth in Grangent reservoir are light and temperature, thus neglecting the role of nutrients. The model only describes the species *M. aeruginosa*, and takes into account its characteristic vertical migrations (colonies grow heavier by day due to the accumulation of carbohydrates generated by

photosynthesis, and lighter by night as they consume the carbohydrates during respiration and biosynthesis). The model accurately reproduces the cyanobacteria behaviour trends in summer 2009, especially a slight growth around 15 July that subsequently diminishes (Fig. 8).

Fig. 8

Modélisation de la répartition verticale de la biomasse des cyanobactéries dans la retenue de Grangent, durant l'été 2009.

Modelling of the vertical distribution of cyanobacteria biomass in Grangent reservoir, during summer 2009.

Predictive modelling: Due to the insufficient development of *M. aeruginosa* in summer 2009, it was not possible to test the predictive modelling or set up the warning system in that year. The thus adjusted model was used in May 2010 to predict cyanobacteria concentrations using the three-day weather forecasts issued by Météo France. The cyanobacteria concentrations were still very low at that time. Figure 9 presents an example of the results on a forecast drawn up on 25 May and compared with the observations made on the following days. Even though some of the simulations are not as good as the one presented, the order of magnitude of the simulated values remains satisfactory.

Fig. 9

En haut: profils de température mesurés et prédits par le modèle entre le 26 et le 29 mai 2010 sur les quatre premiers mètres de profondeur.

Upper panel: *temperature profiles measured and predicted by the model between 26 and 29 May 2010 over the first four metres below the surface.*

En bas: Comparaison rétrospective de la concentration en cyanobactéries à 1 m de profondeur mesurée par la bouée (moyenne journalière) et calculée par le modèle sur trois jours avec les prévisions météorologiques disponibles au 25 Mai 2010

Lower panel: *Retrospective comparison of cyanobacteria concentration at a depth of 1 m measured by the buoy (daily average) and calculated by the model over three days using the weather forecasts available on 25 May 2010*

CONCLUSION

The buoy configuration tested at Grangent corresponds to an improved version of the complete system as it was conceived at the start of the project. Although the initial specifications stated that measurements should be taken by sensors at a single depth, the decision was taken to design a system enabling vertical profiles to be taken. This is major technological challenge, even though

the system is currently only operational to explore the first five metres below the surface.

The computerised acquisition, processing, validation and warning application constitutes the system's built-in decision-aid tool. For managers, it takes the form of different information levels available as part of the warning system:

- functional supervision of real-time data acquisition,
- supervision of real-time warnings issued by the buoy,
- monitoring of the main measurements (weather, water quality, algal blooms),
- provision of indicators to aid decision-making based both on the measurements taken and the forecasts issued.

The range of functions offered by this system is described in detail in a user manual and the sales brochure, which can be obtained from the main author on request.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the ANR's PRECODD programme for its financial contribution to the project, and for its encouragements and congratulations.

A monitoring committee consisting of the Rhône-Méditerranée-Corse, Seine-Normandie, Loire-Bretagne and Rhin-Meuse water authorities, VEOLIA eau, ONEMA, EDF, BRGM and Enghien les Bains municipal council was set up by the project partners to give an outside opinion on the research, scientific quality and operational capability of the final system. The project partners are extremely grateful to this committee.

Special thanks are due to the University of Clermont Ferrand (especially D. Latour and M. Sabart) for the additional information it provided on Grangent reservoir.

SUMMARY

In the current context of the quality degradation of continental aquatic ecosystems, the PROLIPHYC system, as presented here, had the aim of developing, validating and industrializing a real time monitoring and warning

system for the management of the risks linked to the proliferation of phytoplankton, including cyanobacteria, in water bodies and slow-flowing rivers.

The development of the PROLIPHYC buoy was a big technological challenge. The buoys carried a basket fitted with sensors for measuring physical, chemical and biological parameters at various depths. Data can be received and processed in real time. Moreover, buoys are equipped with a unique anti-fouling system.

Initially, a « Small Lake » (SM) buoy, resulting from a prototype, was developed. It is well adapted to shallow environment, like Lake Enghien-les-Bains where it has been tested. In a second time, a « Large Lake » (LL) buoy was developed, specially designed for aquatic system presented important waves.

After the presentation of the buoy development, the paper gives the example of the work made with the LL one on the Grangent reservoir. This large lake formed by a dam on the river Loire is characterized by the summer proliferation of the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*. In particular, raw and modeled data for biomass and temperature are presented, and their possible use in predictive modeling for the feeding of the warning system.

Finally, the work presented here, shows that the PROLIPHYC system, that combines buoys, sensors, an informatic system for acquisition, processing, validation, and warning can represent a decision-aid system for managers of water bodies who are faced to the problem of phytoplanktonic proliferations.