



**HAL**  
open science

## Un drone pour la surveillance des proliférations phytoplanctoniques dans les milieux aquatiques lenticques

François Derkx, Brigitte Vinçon-Leite, Bruno J. Lemaire, Kamel Soudani, Catherine Quiblier, Catherine Freissinet, Simon Chollet, Beatriz Decencière, Laurent Seguy, Stéphane Buttigieg, et al.

### ► To cite this version:

François Derkx, Brigitte Vinçon-Leite, Bruno J. Lemaire, Kamel Soudani, Catherine Quiblier, et al.. Un drone pour la surveillance des proliférations phytoplanctoniques dans les milieux aquatiques lenticques. Drones et hydraulique : les drones au service des métiers de l'eau, SHF, Apr 2015, Cachan, France. hal-02329216

**HAL Id: hal-02329216**

**<https://enpc.hal.science/hal-02329216v1>**

Submitted on 23 Oct 2019

**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.

# UN DRONE POUR LA SURVEILLANCE DES PROLIFERATIONS PHYTOPLANCTONNIQUES DANS LES MILIEUX AQUATIQUES LENTIQUES

François DERKX<sup>1</sup>, Brigitte VINÇON-LEITE<sup>2</sup>, Bruno J. LEMAIRE<sup>2,3</sup>, Kamel SOUDANI<sup>4</sup>,  
Catherine QUIBLIER<sup>5</sup>, Catherine FREISSINET<sup>6</sup>, Simon CHOLLET<sup>7</sup>,  
Béatrice DERENCIERE<sup>7</sup>, Laurent SEGUY<sup>1</sup>, Stéphane BUTTIGIEG<sup>1</sup>, Gonzague SIX<sup>1</sup>,  
Bruno TASSIN<sup>2</sup>, Jean-Luc SORIN<sup>8</sup>, Jean-François HUMBERT<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Université Paris Est, IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton, 77447 Champs-sur-Marne [francois.derkx@ifsttar.fr](mailto:francois.derkx@ifsttar.fr)

<sup>2</sup> Leesu Ecole des Ponts ParisTech Université Paris-Est, 6 Av Blaise Pascal, Champs/Marne F-77455 [bvl@leesu.enpc.fr](mailto:bvl@leesu.enpc.fr)

<sup>3</sup> Agro ParisTech, Rue Claude Bernard, Paris F-75006 – [bruno.lemaire@leesu.enpc.fr](mailto:bruno.lemaire@leesu.enpc.fr)

<sup>4</sup> Laboratoire ESE UMR8079, Université Paris-Sud, Orsay F-91405 [kamel.soudani@u-psud.fr](mailto:kamel.soudani@u-psud.fr)

<sup>5</sup> Université Paris-Diderot, MNHN, UMR 7245, 57 rue Cuvier, CP39, F-75231 Paris Cedex 05, [quiblier@mnhn.fr](mailto:quiblier@mnhn.fr)

<sup>6</sup> ARTELIA Eau et Environnement, 6 rue de Lorraine, F-38432 Echirolles Cedex, [Catherine.FREISSINET@arteliagroup.com](mailto:Catherine.FREISSINET@arteliagroup.com)

<sup>7</sup> CEREEP, 78, rue du Château F-77140 Saint-Pierre-Lès-Nemours, [simon.chollet@ens.fr](mailto:simon.chollet@ens.fr)

<sup>8</sup> IFSTTAR centre de Nantes, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais Cedex [jean-luc.sorin@ifsttar.fr](mailto:jean-luc.sorin@ifsttar.fr)

<sup>9</sup> iEES Paris, UPMC, 4 Place Jussieu, F-75005 Paris, [humbert@biologie.ens.fr](mailto:humbert@biologie.ens.fr)

**MOTS CLEFS :** cyanobactéries, hétérogénéité spatiale, réflectance, capteurs embarqués, modélisation hydrodynamique

*A drone for monitoring phytoplankton blooms in lentic waterbodies*

**KEY WORDS:** cyanobacteria, spatial heterogeneity, reflectance, on-board sensors, hydrodynamic modeling

## I INTRODUCTION

Les lacs et les réservoirs sont très nombreux à la surface de notre planète. Le nombre de ceux dont la surface est supérieure à 0,1ha est d'ailleurs estimé à 64 millions, ce qui représente une couverture totale d'environ 3,8 millions de km<sup>2</sup> (McDonald et al. 2012). En ce qui concerne les lacs de barrage, leur nombre ne cesse d'augmenter, en réponse à la demande croissante d'eau pour la consommation, l'irrigation et l'hydroélectricité (Seitzinger et al., 2010). La dégradation de la qualité de l'eau dans nombre de ces écosystèmes aquatiques, notamment les proliférations phytoplanctoniques, perturbe les usages qui sont faits de ces systèmes et impose une surveillance régulière.

La plupart des proliférations phytoplanctoniques dans les écosystèmes d'eau douce est due aux cyanobactéries. Ces microorganismes perturbent profondément le fonctionnement écologique et les usages de ces milieux car plusieurs espèces peuvent produire des toxines dangereuses pour la santé animale et humaine. Les risques sanitaires générés par ces toxines nécessitent la mise en place d'une surveillance régulière dans les plans d'eau utilisés pour la production d'eau potable ou pour les activités récréatives (Chorus and Bartram, 1999) afin de limiter les risques d'exposition aux cyanotoxines pour l'Homme.

Une des difficultés majeures dans la surveillance des cyanobactéries provient de l'hétérogénéité de leur distribution spatiale aussi bien à l'échelle verticale (colonne d'eau) qu'à l'échelle horizontale. Dans la colonne d'eau, ces microorganismes peuvent en effet se trouver à différentes profondeurs et dans le plan horizontal, ils peuvent s'accumuler dans certaines zones sous l'effet des vents ou des courants. De nouveaux systèmes de surveillance et d'alerte utilisant des mesures en continu réalisées par des bouées instrumentées ont été développés durant la dernière décennie (par exemple Le Vu et al., 2011 ; Gonzalez et al., 2012). Ces systèmes sont très utiles pour le suivi de la qualité de l'eau mais ils ne permettent d'obtenir des informations qu'en un seul point des plans d'eau. Ils ne fournissent donc aucune indication sur la répartition des cyanobactéries à l'échelle de tout l'écosystème, notamment pour détecter à temps le point de départ d'une prolifération. Pour lever cette limite, il serait nécessaire de disposer d'un réseau de bouées distribuées sur l'ensemble du lac, ce qui entraînerait des coûts beaucoup trop élevés.

C'est la raison pour laquelle d'autres approches de surveillance sont nécessaires et c'est pourquoi, dans les grands plans d'eau, la télédétection satellitaire commence à être utilisée. Le principal problème pour cette approche concerne la résolution spatiale souvent insuffisante des images, en particulier pour des plans d'eau de petite dimension. Par exemple, la résolution spatiale est de 300m au nadir pour l'instrument MERIS du satellite européen ENVISAT et malgré sa résolution temporelle journalière, elle est inadaptée à une détection précise des proliférations dans des milieux aquatiques dont l'échelle de taille est du même ordre de grandeur.

Des résolutions spatiales métriques ou infra-métriques sont associées à des fréquences temporelles trop faibles pour permettre un suivi de la prolifération. De plus, les contraintes météorologiques pour l'obtention d'images satellitaires de qualité ainsi que la complexité des algorithmes de traitement limitent leur utilisation en tant qu'outil de suivi de routine. Enfin, le coût d'achat de ces images constitue une autre limitation à l'usage de la télédétection satellitaire pour la surveillance régulière des cyanobactéries dans les lacs.

Dans ce contexte, nous présentons ici les objectifs et les lignes directrices d'un projet de développement d'un nouveau système de surveillance des plans d'eau, basé sur l'utilisation d'un drone équipé d'une plateforme porteuse d'instruments interchangeables (projet OSS-Cyano, ANR ECO-TS). Ce système permettra en particulier, des mesures à très haute résolution spatiale sur l'ensemble de la surface du plan d'eau grâce à un capteur de réflectance adapté à la détection des cyanobactéries. Les mesures de ce capteur spécifique pourront être complétées par des mesures *in situ* réalisées par une sonde multi-paramètres. De plus, le prélèvement d'échantillons dans la colonne d'eau permettra des analyses ultérieures en laboratoire.

Les mesures de réflectance alimenteront le système de surveillance du plan d'eau. En cas de dépassement d'un seuil de biomasse cyanobactérienne préétabli dans une région du plan d'eau, une modélisation prédictive pourra être mise en œuvre afin de prévoir l'extension de la prolifération dans les jours suivants et la menace éventuelle d'une zone à risque : prise d'eau, zone de baignade...

## II DRONE UTILISÉ

Le drone prévu pour le projet OSS-CYANO a été utilisé au départ par l'IFSTTAR pour mettre au point de nouvelles méthodes d'auscultation des ouvrages d'art (Derx et al., 2003 ; Derx et al., 2005 ; Derx et Sorin, 2008). Il s'agit d'un mini-drone hélicoptère à voilure tournante (figure 1) dont les caractéristiques principales sont données dans le tableau 1. Une station sol associée à un ordinateur portable et deux écrans permet soit le pilotage du drone avec des commandes de hauts niveaux soit son contrôle-commande en mode mission programmé. Le drone est équipé de sécurités assurant son retour automatique au point « Home » en cas de perte radio. Il est également équipé d'une tourelle gyrostabilisée sur laquelle nous pouvons embarquer des équipements de vision tels que caméscope, appareil photo numérique, caméras IR...



Figure 1 : Drone utilisé pour les essais

Désignation	Caractéristiques
Diamètre rotor	1,80m
Longueur fuselage	1,70m
Hauteur	0,75m
Masse à vide	12,3kg
Masse maximale	16,4kg
Charge maximale	4,1kg
Vitesse longitudinale	-4 + 10m/s
Vitesse latérale	± 4m/s
Vitesse verticale	± 2m/s
Taux de virage	± 30°/s
Altitude nominale de croisière	150m
Altitude maxi de vol	2 500m
Vitesse du vent maxi au sol	10m/s
Autonomie maximale	60mn
Moteur	2T, 26cc

Tableau 1 : Caractéristiques principales du drone

L'objectif pour IFSTTAR étant de travailler sur l'instrumentation embarquée et non sur le drone lui-même, après avoir utilisé le drone dans le cadre de mise au point de nouvelles méthodes d'auscultation pour les ouvrages d'art, son instrumentation a été adaptée pour des applications environnementales (survol d'éboulements en montagne, morphologie des rivières, traits de côtes maritimes...). Par la suite, en partenariat avec le LEESU<sup>1</sup>, une instrumentation spécifique a été étudiée pour réaliser des essais destinés au suivi des milieux aquatiques dans le cadre du projet QUADRO, financé par l'Institut Carnot VITRES (Innovation dans la Ville, les Infrastructures de Transport, les Réseaux, l'Environnement et les Services). Cette instrumentation adaptable sur le drone comprenait : (1) un module de prise de vues (visible et infra-rouge), (2) un flotteur instrumenté, (3) un servo-treuil associé à une sonde de mesure, (4) un dispositif d'échantillonnage d'eau en plusieurs profondeurs, (5) un dispositif de communication sans fil, (6) une Interface Homme Machine (IHM). Ce dispositif a fait l'objet d'un brevet et est présenté dans une autre communication (Derks et Sorin, 2015).

### III INSTRUMENTATION SPÉCIFIQUE POUR OSS-CYANO

#### III.1 Généralités

Dans le projet OSS-Cyano l'évolution de l'instrumentation porte sur la remise à niveau du dispositif de sonde de mesure et du dispositif d'échantillonnage réalisés pour le projet QUADRO et sur le développement de deux nouvelles plateformes de mesure : (1) un dispositif de spectrophotométrie et (2) un dispositif permettant l'intégration d'un capteur optique de réflectance adapté à la détection des cyanobactéries. Ces dispositifs de mesure auront l'architecture présentée sur la Figure 2. Le dispositif de mesure (Figure 2 [1]) embarqué sur le drone communique au sol grâce à un modem radio (Fig.2 [2]). Un ordinateur de terrain (Fig.2 [3]) avec une interface homme-machine (IHM) permet de piloter et de contrôler les dispositifs de mesure et de stocker les données qui sont géolocalisées et horodatées grâce au module GPS intégré dans le dispositif de mesure. Ces systèmes seront autonomes en énergie, en communication ce qui permettra de les adapter sur n'importe quel drone ayant la charge d'emport suffisante.

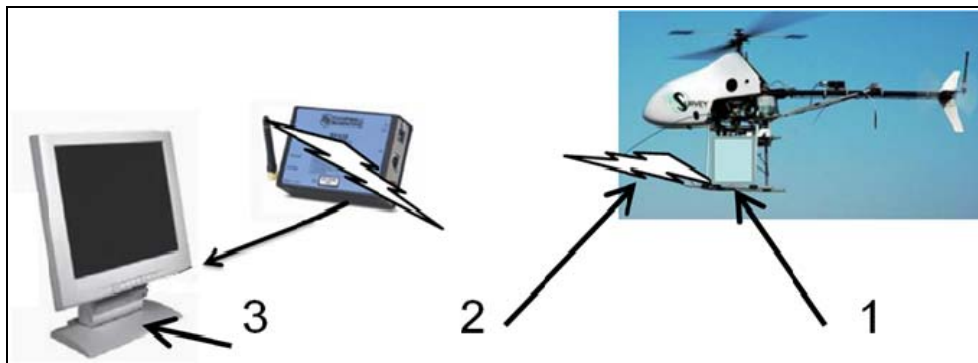


Figure 2 : Schéma de principe des dispositifs développés

#### III.2 Dispositif de réflectance

Le capteur de réflectance est basé sur la spécificité des propriétés d'absorption et de réflexion des pigments caractéristiques des cyanobactéries. Plusieurs algorithmes existants (par exemple Mishra et al., 2013) permettent de calculer à partir des mesures de réflectance la concentration en phycocyanine et ainsi d'évaluer la biomasse des cyanobactéries. Cependant, la présence dans l'eau d'autres composants (autres cellules phytoplanctoniques et autres pigments photosynthétiques, matières en suspension...) nécessite des corrections dans le calcul de la concentration en phycocyanine. La calibration du capteur de réflectance embarqué, basée sur la mise au point d'algorithmes spécifiques, s'appuiera sur des mesures *in situ* de chlorophylle-a et de phycocyanine fournies par des sondes, par des analyses sur des prélèvements d'eau réalisés de façon concomitante aux mesures du capteur embarqué et par les mesures fournies par le dispositif

<sup>1</sup> Le LEESU (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains) est un laboratoire commun de l'École des Ponts ParisTech, l'Université Paris-Est Créteil et AgroParisTech (UMR MA 102). <http://leesu.univ-paris-est.fr>

de spectrophotométrie. En plus des profils verticaux de concentrations en chlorophylle-*a* et en phycocyanine, ces sondes fourniront également des profils de température, qui sont des indicateurs de la structure physique de la masse d'eau. Ces profils verticaux permettront également d'estimer l'épaisseur de la couche d'eau correspondant aux mesures de réflectance.

### III.3 Exploitations des résultats

Grâce au système de prise d'échantillons porté par la plateforme du drone OSS-Cyano, la colonne d'eau pourra être échantillonnée en plusieurs profondeurs afin de réaliser ensuite des analyses en laboratoire, notamment des analyses de cyanotoxines si nécessaire. La possibilité d'une quasi-simultanéité des mesures par les différents capteurs et de l'échantillonnage *in situ* favorisera l'atteinte de deux objectifs : d'une part une calibration robuste du capteur de réflectance et d'autre part, grâce à la complémentarité de l'ensemble des données, une évaluation fiable de la distribution spatiale, horizontale et verticale, des cyanobactéries.

Les mesures, datées et géoréférencées, seront utilisées pour établir une cartographie des concentrations de cyanobactéries dans le plan d'eau étudié. Bien qu'il ne soit pas imageur, le système d'acquisition (capteur de réflectance et drone) permettra de réaliser des acquisitions spectrales géoréférencées et à une très haute fréquence spatiale. Ces acquisitions permettront, à l'aide de méthodes de spatialisation appropriées, de réaliser des cartographies des concentrations de cyanobactéries. Une chaîne de traitement complète (prétraitement, traitement et spatialisation), aboutissant à des produits exploitables par les différents utilisateurs sera développée.

La modélisation prédictive mise en œuvre en cas de dépassement d'un seuil de biomasse cyanobactérienne fera appel à un modèle hydrodynamique, uni-, bi- ou tridimensionnel selon les dimensions du milieu aquatique, capable de prévoir, en utilisant les prévisions météorologiques à court terme (trois jours à une semaine), l'évolution spatiale de la distribution de la biomasse de cyanobactéries en réponse aux forçages météorologiques : mélange par le vent, déplacement sous l'effet des courants, accumulation en certaines régions du plan d'eau... Le couplage de la cartographie des concentrations en cyanobactéries à la surface du plan d'eau et la modélisation prédictive de son évolution dans l'ensemble du plan d'eau (transport horizontal et distribution verticale) constituera une première version de système d'alerte.

Le développement et la validation du système seront réalisés dans deux types de conditions expérimentales. Dans la première étape seront utilisés les macrocosmes aquatiques de la base expérimentale PLANAQUA (<http://ieesparis.ufr918.upmc.fr/spip.php?article173>). Cette « plateforme nationale d'expérimentation en écologie aquatique » propose une large gamme d'équipements techniques dédiés à l'expérimentation en écologie aquatique (microcosmes instrumentés et contrôlés, lacs artificiels pour des expériences à long terme...). Le drone instrumenté sera ensuite testé en conditions réelles d'application, sur différents plans d'eau représentatifs des milieux aquatiques affectés par les cyanobactéries.

## IV CONCLUSION

Le système de surveillance des proliférations de cyanobactéries aéroporté par un drone que nous présentons, est constitué d'une plateforme permettant d'embarquer un capteur de réflectance, une sonde multiparamètres incluant chlorophylle *a*, phycocyanine et température de l'eau et un dispositif d'échantillonnage de la colonne d'eau. Outre le capteur optique de réflectance adapté aux cyanobactéries, l'innovation de ce système tient à la possibilité de réaliser de façon concomitante des mesures dans la colonne d'eau et un échantillonnage permettant ensuite des analyses approfondies en laboratoire. Le drone présente de nombreux avantages comme sa capacité à faire une mission automatiquement et de refaire un test à l'emplacement exact à l'aide de la localisation GPS. Un autre avantage est la possibilité, au cours d'un test de reprendre le drone en pilotage manuel pour faire d'autres mesures en un autre point du site étudié.

Ce nouveau système de surveillance permettra d'atteindre trois objectifs : (1) mieux appréhender l'hétérogénéité de la distribution spatiale des cyanobactéries à l'échelle du plan d'eau ; (2) fournir une cartographie des concentrations en cyanobactéries à une fréquence adaptée au niveau de risque sur les usages (survol hebdomadaire, quotidien ou à quelques heures d'intervalle en période à risque) ; (3) intégrer l'ensemble des mesures dans un système de cartographie des efflorescences de cyanobactéries et, en utilisant une modélisation hydrodynamique prédictive, l'évolution à l'horizon de la semaine de cette cartographie.

## V REMERCIEMENTS

Le projet OSS-Cyano est financé par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme ECO-TS (projet ANR-13-ECOT-0001-03).

## VI REFERENCES ET CITATIONS

- Chorus, I. et Bartram, J. (1999). Toxic Cyanobacteria in Water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. Geneva: World Health Organization.
- Derkx F., Sorin J.L. (2015). – Quelques essais sur l'eau et son environnement réalisés à l'aide d'un drone. Congrès SHF -Drones et Hydrauliques- Paris avril 2015
- Derkx F., Sorin J.L. (2008). - Inspection des ouvrages d'art par drone. Bilan et perspectives des travaux du LCPC. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées 273 : 39 - 56
- Derkx F., Sorin J.L., Georges E. (2008). - Les drones au service des ouvrages d'art. Revue de l'Electricité et de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication, n°6/7 Juin/Juillet 2008
- Derkx F., J-L. Sorin., Merliot E. (2005). - Unmanned Aerial Vehicle (UAV) at the service of bridges and structures, Final seminar of the 11A025 project research.
- González, J., Herrera, J. L. & Varela, R. A. (2012). A design proposal of real-time monitoring stations: implementation and performance in contrasting environmental conditions. Sci. Mar. 76 235-248.
- Le Vu, B., Vincon-Leite, B., Lemaire, B. J., Bensoussan, N., Calzas, M., Drezen, C., Deroubaix, J. F. et al., (2011). High-frequency monitoring of phytoplankton dynamics within the European water framework directive: application to metalimnetic cyanobacteria. Biogeochemistry 106, 229-242.
- McDonald, C. P., Rover, J. A., Stets, E. G. & Striegl, R. G. (2012). The regional abundance and size distribution of lakes and reservoirs in the United States and implications for estimates of global lake extent. Limnology and Oceanography 57, 597-606.
- Medina-Cobo, M., Domiguez, J. A., Quesada, A. & de Hoyos, C. (2014). Estimation of cyanobacteria biovolume in water reservoirs by MERIS sensor. Water Research 63, 10-20
- Mishra, S., Mishra, D. R., Lee, Z. & Tucker, C. S. (2013). Quantifying cyanobacterial phycocyanin concentration in turbid productive waters: A quasi-analytical approach. Remote Sensing of Environment 133, 141-151.
- Seitzinger, S. P., Mayorga, E., Bouwman, A. F., Kroeze, C., Beusen, A. H. W., Billen, G., Van Drecht, G., Dumont, E., Fekete, B. M., Garnier, J. & Harrison, J. A. (2010). Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. Global Biogeochemical Cycles 24, GB0A08.
- Tassin B, Derkx F., Merliot E., Sorin J.L., Prevot F. (2011) Dispositif d'acquisition pour la réalisation de mesures et/ou le prélèvement d'échantillons dans un liquide. 2011. FR 1159526, PCT/FR2012/189235 - 19/10/12 EP 2 584 355 - 24/04/13