



Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l' :

Université Paris-Est

Spécialité : Sciences et Techniques de l'Environnement

par

Ali FADEL

Ecole Doctorale : Sciences, Ingénierie et Environnement

*Fonctionnement physico-chimique et développement du phytoplancton dans le
réservoir de Karaoun (Liban). Application d'un modèle couplé
hydrodynamique-écologique.*

Thèse soutenue le 22 septembre 2014 devant le jury composé de :

Myriam Bormans
Catherine Quiblier
Sarah Dorner
Julien Némery
Brigitte Vinçon-Leite
Kamal Slim
Bruno Lemaire
Ali Atoui
Bruno Tassin
Nabil Amacha

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directrice de thèse
Directeur de thèse
CoDirecteur de thèse
CoDirecteur de thèse
Membre invité
Membre invité

Abstract

Forty percent of world reservoirs suffer from eutrophication which increases phytoplankton biomass in reservoirs and impairs water uses. Understanding the mechanisms and processes that control cyanobacterial blooms is of great concern. Ecosystem models enable us to simulate, analyze and understand ecological processes in lakes and reservoirs. Except for Lake Kinneret in Israel, the phytoplankton community and ecological model application are poorly documented in the Middle East. Karaoun Reservoir, also known as Qaroun, Qaraoun or Qarun, the largest water body in Lebanon, was built for irrigation and hydropower production. There is a great interest in the water quality of this reservoir as it will be used to supply the capital Beirut with drinking water.

The main objective of this Ph.D. work is to understand the dynamics of phytoplankton in Karaoun Reservoir. This main objective branches into three sub-objectives: 1) to establish the seasonal phytoplankton succession 2) to understand the cyanobacterial dynamics 3) identify the driving factors of the cyanobacterial blooms.

To achieve these objectives, we conducted sampling campaigns and laboratory measurements were conducted semi-monthly between May 2012 and August 2013 to assess the trophic state and the phytoplankton biodiversity and seasonal dynamics of its phytoplankton community in response to changes in environmental conditions. These field campaign measurements were then used to calibrate (summer and autumn 2012) and validate (spring and summer 2013) a one-dimensional hydrodynamic-ecological model on Karaoun Reservoir. Our results show that:

- Karaoun Reservoir which strongly stratified between May and August was found eutrophic with a low biodiversity, only 30 phytoplankton species in 2012-2013. Comparing its trophic status and biodiversity to other Mediterranean freshwater bodies showed that it matched more with El Gergal Reservoir in Spain than with natural lakes like Lakes Kinneret in Israel and Trichonis in Greece that were oligotrophic with a high biodiversity.
- Thermal stratification established in spring reduced the growth of diatoms and resulted in their replacement by mobile green algae species during high nutrients availability and water temperatures lower than 22 °C. Water temperature higher than 25 °C favours cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* that displaces *Aphanizomenon ovalisporum* in summer. Dinoflagellate *Ceratium hirundinella* dominated in mixed conditions, at low light intensity in late autumn at 19 °C.
- Unlike the high temperatures, above 26 °C, which are associated with blooms of *Aphanizomenon ovalisporum* in Lakes Kinneret (Israel), Lisimachia and Trichonis (Greece) and in Arcos Reservoir (Spain), *Aphanizomenon ovalisporum* bloomed in Karaoun Reservoir in October 2012 at a relatively low subsurface temperature of 22°C while the reservoir was weakly stratified. This suggests that the risk of *Aphanizomenon ovalisporum* blooms in European lakes is high.
- Cylindrospermopsin, a fatal toxin, was detected in almost all samples even when *Aphanizomenon ovalisporum* was not detected. It reached a concentration of 1.7 µg/L, higher than the drinking water guideline value of 1 µg/L of the World Health Organization. The toxin vertical profiles suggest its possible degradation or

sedimentation resulting in its disappearance from water column. *Aphanizomenon ovalisporum* biovolumes and cylindrospermopsin concentration were not correlated ($n = 31$, $r^2 = -0.05$).

- A simple configuration of the one-dimensional hydrodynamic-ecological model Dyresm-Caedym successfully simulated the growth and succession of the cyanobacteria *Aphanizomenon ovalisporum* and *Microcystis aeruginosa*. The model showed a good performance in simulating the water level (RMSE < 1 m, annual variation of 25 m), water temperature profiles (RMSE < 1.1 °C, range 13-28 °C) and cyanobacteria biomass (RMSE < 57 $\mu\text{g L}^{-1}$ equivalent chlorophyll a, range 0-206 $\mu\text{g L}^{-1}$). Implementing the model to better understand the succession between cyanobacteria blooms showed that higher maximum production of *Microcystis aeruginosa* during favourable temperature and light conditions allowed it to outgrow *Aphanizomenon ovalisporum*.

On the local scale, this thesis provides important background data for the Lebanese water management authorities who aim to use this reservoir for drinking water production. It also increases the understanding of processes and mechanisms that control cyanobacterial blooms. The application of simple model configurations with few major processes can be transposed on other eutrophic lakes and reservoirs to describe the competition between dominant phytoplankton species, contribute to early warning systems or be used to predict the impact of climate change and management scenarios.

Keywords: Phytoplakton dynamics, Harmful algal blooms, Cyanobacteria, Ecological modelling, toxins, Mediterranean Lakes.

Résumé

40 % des retenues dans le monde souffrent d'eutrophisation. L'augmentation de biomasse de phytoplancton et les proliférations de cyanobactéries dans les réservoirs perturbe leurs usages. Comprendre les mécanismes qui contrôlent la prolifération des cyanobactéries est de grande importance. Les modèles d'écosystèmes lacustres nous permettent de simuler, d'analyser et de comprendre les processus écologiques dans les lacs et les réservoirs. La dynamique phytoplanctonique dans les réservoirs du Moyen-Orient est peu documentée jusqu'à présent. Très peu d'applications de modèles d'écosystèmes lacustres y ont été réalisées. Le réservoir de Karaoun, le plus grand au Liban, a été construit pour l'irrigation et la production hydroélectrique. La préservation de la qualité de l'eau de ce réservoir est d'importance majeure car un projet prévoit de l'utiliser pour l'alimentation en eau potable de la capitale Beyrouth à l'horizon 2025.

Les objectifs de la thèse sont de concevoir et réaliser des campagnes de terrain pour suivre et comprendre la dynamique du phytoplancton et des cyanobactéries dans le lac de barrage de Karaoun, puis de modéliser le fonctionnement physique et biogéochimique de cette retenue.

Des campagnes d'échantillonnage ont été effectuées deux fois par mois entre mai 2012 et Août 2013 pour évaluer l'état trophique, la diversité phytoplanctonique et la dynamique du phytoplancton en réponse aux changements des conditions environnementales. Ces mesures ont été ensuite utilisées pour calibrer (été et automne 2012) et valider (printemps et été 2013) un modèle hydrodynamique-écologique unidimensionnel sur du réservoir. Nos résultats ont montré que:

- La retenue de Karaoun, fortement stratifiée thermiquement entre mai et août, est eutrophe, et présente une faible diversité phytoplanctonique. Seulement 30 espèces de phytoplancton ont été recensées en 2012-2013.
- La stratification thermique qui apparaît au printemps réduit la croissance des diatomées et entraîne leur remplacement par des chlorophycées. Les concentrations en nutriments sont alors élevées et la température de l'eau est inférieure à 22 °C. Les cyanobactéries dominent en été : *Aphanizomenon ovalisporum* lorsque la température de surface de l'eau est inférieure à 25 °C, *Microcystis aeruginosa* lorsqu'elle est supérieure à 25°C. Le dinoflagellé *Ceratium hirundinella* constitue l'espèce dominante en fin d'automne lorsque la colonne d'eau est mélangée, l'intensité lumineuse est faible et la température de l'eau d'environ 19 °C.
- Contrairement aux températures de surface élevées, supérieures à 26 °C, auxquelles prolifère *A. ovalisporum* dans les lacs de Tibériade (Israël), Lisimachia et Trichonis (Grèce) et la retenue d'Arcos (Espagne), une prolifération d'*A. ovalisporum* survient en octobre 2012 dans la retenue de Karaoun, à une température de l'eau de 22 °C et alors que la stratification thermique est faible.
- La cylindrospermopsine (CYN), une toxine qui a provoqué la mort de bétail par ingestion, a été détectée dans la retenue de Karaoun, même en l'absence d'*A. ovalisporum*, seule espèce qui la produit identifiée dans la retenue. Les biovolumes d'*A. ovalisporum* et la concentration de CYN ne sont pas corrélés ($n = 31$, $r^2 = -0,05$). La CYN atteint une concentration de 1,7 µg/L, supérieure à la valeur guide pour l'eau potable de 1 µg/L (Organisation Mondiale de la Santé). Les profils verticaux de la

toxine suggèrent que sa disparition progressive de la colonne d'eau est due à sa dégradation ou à sa sédimentation.

- Une configuration simple du modèle Dyresm-Caedym a permis de simuler avec succès la croissance et la succession des cyanobactéries *A. ovalisporum* et *M. aeruginosa*. Le modèle réalise de bonnes performances pour la simulation du niveau de l'eau du réservoir (RMSE <1 m pour une variation annuelle de 25 m), des profils de température de la colonne d'eau (RMSE <1 °C pour des variations annuelles comprises entre 13 et 28 °C) et de la biomasse des cyanobactéries (RMSE <48 µg/L équivalent chlorophylle-a, concentration entre 0 et 206 µg/L).

A l'échelle locale, cette thèse est importante pour les autorités de gestion des eaux libanaises qui visent à utiliser ce réservoir pour la production d'eau potable. Elle a également permis de mieux comprendre les processus qui contrôlent la prolifération de cyanobactéries. L'application de configurations de modèles simples limités aux processus principaux pourrait être transposée sur d'autres réservoirs eutrophes pour décrire la compétition entre les espèces phytoplanctoniques dominantes, s'insérer dans des systèmes d'alerte ou prédire l'impact du changement climatique et tester des scénarios de gestion.

Mots Clés : Dynamique de phytoplakton, Proliférations d'algues toxiques, Cyanobactéries, la Modélisation écologique, Toxines, Lacs Méditerranée.