

Abstract in English

Understanding regime shifts in shallow lakes subject to multiple stresses: Individual and combined effects of agricultural runoff and climate warming on submerged macrophytes

Submerged macrophytes stabilize the clear-water status in shallow lakes, supporting many ecosystem services. Shallow lakes are exposed to agricultural runoff (ARO) containing pesticides and nutrients, which can affect macrophytes and threaten the clear-water state. Recent studies show that nitrate may affect macrophyte growth and species richness. Pesticides can also affect macrophytes directly or indirectly by disrupting biotic interactions. Climate warming is an additional stress to shallow lakes. Increased temperatures may promote phytoplankton growth and nutrient release or can modify top-down control. The combined stressors may have additive, synergistic or reversed effects, and these effects are difficult to predict. The objectives of this thesis were to investigate (1) the individual and combined effects of nitrate, pesticides and climate warming on macrophytes; (2) whether upscaling from micro- to mesocosms would preserve the response of macrophytes; and (3) whether the stressor effects could be detected in the macrophyte physiology.

Several experiments integrating different functional groups (macrophytes, phytoplankton, periphyton and their respective consumers) were performed under controlled conditions (laboratory microcosms). These ecosystem models were exposed for several weeks to a simplified cocktail simulating an ARO (nitrates alone or mixed with 4 pesticides) at two temperatures (ambient and +4°C). Following this, more realistic ecosystems were studied using outdoor mesocosms exposed to ARO and simulating the same type of heating (semi-controlled conditions). In all these experiments, the response of the macrophytes was documented by measuring their growth (biomass, size) and physiology (photosynthetic pigments, phenolic compounds, anthocyanins, elemental stoichiometry).

Results from the microcosms showed that all functional groups were affected directly or indirectly by the tested stress factors. Pesticides alone but not nitrate reduced macrophyte biomass. Nitrate and pesticides in combination acted synergistically reducing the resilience of the macrophyte-dominated state. Warming marginally promoted macrophyte growth but together with ARO reduced macrophyte growth (objective 1). Results from the mesocosms showed that the strong negative effect of ARO on the growth of macrophytes was preserved in the outdoor mesocosms but only at ambient temperature. Warming enhanced macrophyte growth, similar to the microcosms, but also significantly buffered the ARO effect, highlighting different responses

compared with the microcosms (objective 2). Complex biotic interactions along with invasions of invertebrate larvae may have reversed responses to the stressors. Besides their effects on growth, ARO and warming had a significant effect on the content of carotenoids, phenolic compounds and stoichiometry. These results need to be confirmed to determine their relevance as early warning signals of stress (objective 3).

This thesis shows that the exposure of shallow lakes to ARO can induce regime shifts by tipping the system towards a degraded state dominated by phytoplankton. In particular, the role of nitrate, which is much less studied compared to phosphorus, is clearly highlighted. Despite the positive effects of warming on macrophyte growth, the three stressors combined (pesticides, nitrates and warming) reversed the expected effect and led to a sharp decline in macrophyte biomass. The change in scale achieved confirms the need to better take into account the complexity of biotic interactions for a more reliable assessment of the environmental risks to which aquatic ecosystems are exposed.

Résumé en français

Vers une meilleure compréhension des changements de régime dans les lacs peu profonds soumis à des stress multiples : évaluation des effets individuels et combinés du ruissellement agricole et du réchauffement climatique sur les macrophytes immergés

Les macrophytes immergés stabilisent les lacs peu profonds dans un état d'eau claire, leur permettant ainsi de fournir de nombreux services écosystémiques. Ce régime écologique ordinairement stable est menacé par l'apport d'eaux de ruissellement agricole (RA) contenant des pesticides et des nutriments pouvant affecter les macrophytes directement ou indirectement en perturbant les interactions biotiques. Combinés à une augmentation de la température de l'eau sous l'effet du changement climatique, les effets de ces facteurs de stress sur les écosystèmes aquatiques sont difficiles à prédire. Dans ce contexte, les objectifs de cette thèse étaient de développer une approche expérimentale pour 1) étudier les effets individuels et combinés des nitrates, des pesticides et du réchauffement climatique sur la réponse des macrophytes ; 2) comparer ces réponses dans le cadre d'expérimentations de complexité croissante (changement d'échelle) et 3) identifier des biomarqueurs physiologiques témoin de ces effets.

Pour ce faire, plusieurs expérimentations intégrant différents groupes fonctionnels (macrophytes, phytoplancton, périphyton et leur consommateurs respectifs) ont été réalisées en conditions contrôlées (microcosmes au laboratoire). Ces écosystèmes simplifiés ont été exposés plusieurs semaines à un cocktail simplifié simulant un RA (nitrates seuls ou en mélange avec 4 pesticides), à deux températures (ambiante et +4°C). Puis des écosystèmes plus réalistes ont été étudiés en utilisant des mésocosmes placés en extérieur qui ont été exposés au RA tout en simulant le même type de réchauffement (conditions semi-contrôlées). Dans toutes ces expériences, la réponse des macrophytes a pu être documentée du point de vue de leur croissance (biomasse, taille) et de leur physiologie (pigments photosynthétiques, composés phénoliques, anthocyanes, composition élémentaire).

Nos résultats obtenus en microcosmes montrent que tous les groupes fonctionnels ont été affectés par les facteurs de stress testés. Les pesticides seuls ont affecté la biomasse des macrophytes, et de manière plus forte en présence de nitrates (effets synergiques), tandis que les nitrates seuls n'ont pas eu d'effet significatif. La croissance des macrophytes a été marginalement favorisée par le réchauffement en l'absence de RA, tandis que l'effet inverse a été observé en présence de RA, mettant ainsi en évidence ainsi des effets indirects liés aux interactions biotiques entre groupes fonctionnels (objectif 1). Nos résultats obtenus en mésocosmes montrent un fort effet

négalif du RA sur la croissance des macrophytes, mais uniquement à température ambiante. A température plus élevée, cet effet négatif a été compensée par un effet positif du réchauffement (effets antagonistes), mettant ainsi en évidence des réponses différentes par rapport à ceux obtenus dans des conditions plus simples (objectif 2). Outre leurs effets sur la croissance, le RA et le réchauffement ont eu un effet significatif sur le contenu en caroténoïdes, en composés phénoliques ainsi que sur la stœchiométrie. Ces résultats nécessitent d'être confirmés pour déterminer leur pertinence en tant que signaux d'alerte précoce de stress (objectif 3).

Cette thèse confirme que l'exposition des lacs peu profonds aux RA peut induire un changement de régime en faisant basculer le système vers un état dégradé dominé par le phytoplancton. En particulier, le rôle du nitrate, jusqu'ici peu étudié par rapport au phosphore, est clairement mis en évidence. Malgré les effets positifs du réchauffement sur la croissance des macrophytes, les trois facteurs de stress combinés (pesticides, nitrates et réchauffement) ont inversé l'effet attendu et entraîné une forte baisse de la biomasse des macrophytes. Le changement d'échelle réalisé confirme la nécessité de mieux prendre en compte la complexité des interactions biotiques pour une évaluation plus fiable des risques environnementaux auxquels les écosystèmes aquatiques sont soumis.