



Interreg



Cofinancé par  
l'Union Européenne

France – Suisse

## (A1) : descriptif détaillé du projet

Cette annexe a pour but d'expliquer votre projet de manière plus détaillée et illustrée. Il s'agit d'une description technique qui s'entend comme complément du résumé de votre projet indiqué dans le formulaire de candidature Synergie CTE.

**Nom du projet : ALGA**

**Nom du chef de file FR : JACQUET**

### **Descriptif :**

*Cette section doit permettre au secrétariat conjoint FR de mieux comprendre votre projet notamment lors de sa phase d'instruction technique. Le descriptif peut également inclure des schémas, graphiques, photos, etc. afin d'illustrer au mieux les réalisations prévues.*



## Intitulé du projet

Efflorescences Algales dans le Léman face aux changements GlobAux : d'une meilleure connaissance et compréhension de l'écologie des espèces « nuisibles » et potentiellement toxiques à la préservation d'une bonne qualité de l'eau et des services écosystémiques via le développement d'outils d'aide à la décision

*Algal blooms in Lake GenevA facing global changes: from a better understanding of the ecology of harmful and potentially toxic species to preserving good water quality and lake ecosystem-services through the development of decision tools*

## Acronyme

ALGA

## Résumé court

Le changement climatique va impliquer des changements majeurs du fonctionnement des lacs en modifiant leur régime thermique et donc leur structuration physique mais également les processus biogéochimiques, les interactions biotiques et au final la dynamique globale. Par ailleurs, la demande sociétale sur les usages de l'eau va évoluer qualitativement et quantitativement et il est donc nécessaire d'élaborer des stratégies et une gestion adaptative pour faire face aux répercussions de ces changements sur les différents services écosystémiques lacustres. Dans ce contexte, ALGA vise à i) analyser les risques attendus associés aux proliférations (blooms) d'algues et/ou de cyanobactéries potentiellement toxiques, ii) définir les stratégies de gestion adaptative possible des écosystèmes lacustres, iii) proposer de nouvelles approches de surveillance, iv) et élaborer des scénarii de prévision. Les travaux sont centrés sur le plus grand lac naturel profond d'Europe occidentale, un écosystème transfrontalier modèle, le Léman. Une attention particulière sera portée à la perception de la population et des acteurs de l'eau qui seront associés au projet dans une démarche concertée, dans l'optique d'élaborer des stratégies de gouvernance future.

## Chefs de file du projet

Stéphan Jacquet (FR) & Bas Ibelings (CH)

## Partenariat (partenaires sensu stricto, collaborateurs, sous-traitants)

### FR

- 1 - INRAE CARRTEL (Orlane Anneville, Jean Guillard, Stéphan Jacquet, Frédéric Rimet)
- 2 - Scimabio Interface (Alexandre Richard, Arnaud Caudron, Valentin Vasselon)

+

- Centrale Supelec (Pascal da Costa) – sous-traitant
- ENPC/LEESU (Brigitte Vinçon-Leite) – collaborateur
- Ecole de management de Grenoble (Thomas Bolognesi) – sous-traitant

### CH

- 1 - Université de Genève, Département F.-A. Forel pour sciences de l'environnement et de l'eau et l'Institut des Sciences de l'Environnement et de l'Eau (Bas Ibelings, Mridul Thomas)
- 2 - Université de Genève, Département de science politique et relations internationales et l'Institut des Sciences de l'Environnement et de l'Eau (Géraldine Pflieger)
- 3 - EPFL (Anna Carratala)

+

- Eawag (Elisabeth Janssen, Daniel Odermatt) – collaborateur

+

### Conseil scientifique associé au projet (e.g. une expertise supplémentaire proposée)

- 1 - La Commission internationale pour la protection des eaux du Léman (CIPEL, Frédéric Soullignac, Marc Babut)
- 2 - Office fédéral de l'environnement (OFEV, Khajehnouri Fereidoun)
- 3 – Association pour la sauvegarde du Léman (ASL, Jean-Marcel Dorioz)

## Éléments de contexte

Le Léman est indispensable pour fournir de nombreux services essentiels à une population riveraine toujours croissante, en France comme en Suisse, à savoir l'approvisionnement en eau potable, les loisirs aquatiques et nautiques, la pêche, l'exploitation thermique, ou encore les transports. D'autres services sont plus difficiles à percevoir et quantifier mais sont également cruciaux pour l'environnement et donc pour l'Homme, comme le support de la biodiversité et les cycles biogéochimiques (Baulaz 2020). Le Léman est soumis à des pressions déclinées localement, comme la pollution induite par la densification de la population et l'activité économique (dont les micropolluants, l'eutrophisation et la ré-oligotrophisation, les espèces invasives), et plus largement comme le changement global (dont le réchauffement climatique). Ce dernier conduit à un réchauffement progressif du lac (Desgué-Itier *et al.* 2022), ainsi qu'à une augmentation en fréquence et durée des événements météorologiques extrêmes tels que les canicules et les tempêtes. Les changements climatiques affectent également le régime de mélange du lac, renforçant la stratification de la colonne d'eau en été et affaiblissant le brassage hivernal (Mesman *et al.* 2022). Lorsque le brassage du lac en hiver est incomplet et qu'une couche profonde anoxique se forme de façon plus ou moins

permanente et perdue, aucun renouvellement d'oxygène n'atteint les sédiments. Dans ces conditions d'absence d'oxygène, l'état d'oxydoréduction des sédiments change et cela accroît le risque de libération du phosphore stocké dans les sédiments pendant les décennies eutrophes des années 1950 à 1990, augmentant ainsi le stock de phosphore biodisponible au sein de l'écosystème profond. Les années où le mélange est plus important, ce phosphore peut être ramené à la surface du lac où il favorise la prolifération d'algues et la détérioration de la qualité de l'eau du lac. Toutefois, et inversement, un brassage hivernal réduit peut aussi conduire à une ultra-oligotrophisation temporaire des couches de surfaces et réduire théoriquement la production phytoplanctonique (Salmaso *et al.* 2018). Sans brassage complet, les niveaux élevés de nutriments dans la partie la plus profonde du lac restent bloqués, c.à.d. indisponibles pour le phytoplancton dans la couche superficielle. Livingstone (1997) a également indiqué qu'un modèle en dents de scie de réchauffement-refroidissement des eaux profondes est probable, avec des années de floraison intermittentes.

Les microalgues (phytoplancton) font partie intégrante d'un écosystème lacustre sain. Elles sont les principaux producteurs primaires et constituent donc la base du réseau trophique lacustre. Ces organismes ont besoin de nutriments pour se développer et leur croissance est souvent limitée par le phosphore, qui est donc un facteur clé. Cependant, au siècle dernier, un excès de nutriments, notamment de phosphore, a conduit à l'eutrophisation des lacs, dont le Léman. L'eutrophisation a induit des problèmes d'anoxie et un risque très élevé de prolifération d'algues nuisibles, surtout les cyanobactéries. Dans un lac profond comme le Léman, l'eutrophisation provoque l'anoxie des couches profondes, et peut conduire, par exemple, à une forte réduction de la diversité des corégonidés comme cela a pu être enregistré dans certains lacs suisses (Von Lanthen *et al.* 2012).

Les cyanobactéries constituent le groupe d'algues nuisibles le plus connu en raison des hépato- (foie) et neuro-toxines qu'elles produisent. Une prolifération de cyanobactéries toxiques présente des risques pour la production d'eau potable et les loisirs, tandis que les toxines peuvent également s'accumuler dans les poissons (voir Ibelings *et al.* 2021a, 2021b) (OMS, Toxic Cyanobacteria in Water, ISBN : 978-1-003-08144-9). C'est pourquoi le contrôle de l'eutrophisation, c'est-à-dire la réduction du phosphore pour prévenir les efflorescences, a été et continue d'être un objectif de gestion important pour la CIPEL (la commission internationale de protection des eaux du Léman). Cela aurait dû être une prévention effective contre de futures efflorescences, mais cela était sans compter les effets du changement climatique qui favorisent également les blooms d'algues, surtout celles de cyanobactéries. Moss *et al.* (2011) ont parlé d'une attaque conjointe, par l'eutrophisation et le changement climatique, portant *in fine* préjudice à la qualité de l'eau. En outre, il est important d'ajouter que les efflorescences nuisibles - non toxiques - qui interfèrent avec l'utilisation du lac peuvent être formées par des groupes d'algues autres que les cyanobactéries. Un exemple frappant, bien relayé par l'ensemble des médias locaux ([https://asleman.org/wp-content/uploads/2022/10/Lemaniques124\\_09\\_2022\\_web2.pdf](https://asleman.org/wp-content/uploads/2022/10/Lemaniques124_09_2022_web2.pdf)) a été la floraison soudaine d'*Uroglena* sp. au Léman en septembre 2021, liée à une séquence d'événements climatiques extrêmes, provoquant pendant plusieurs jours une forte coloration brune du lac.

Le Léman et son bassin versant ont fait et continuent de faire l'objet d'une importante surveillance écologique, notamment par la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman (<https://www.cipel.org/>) en lien avec l'Observatoire des LAcs (<https://www6.inrae.fr/soere-ola>) (Rimet *et al.* 2020). Par ailleurs, de nombreuses études ont

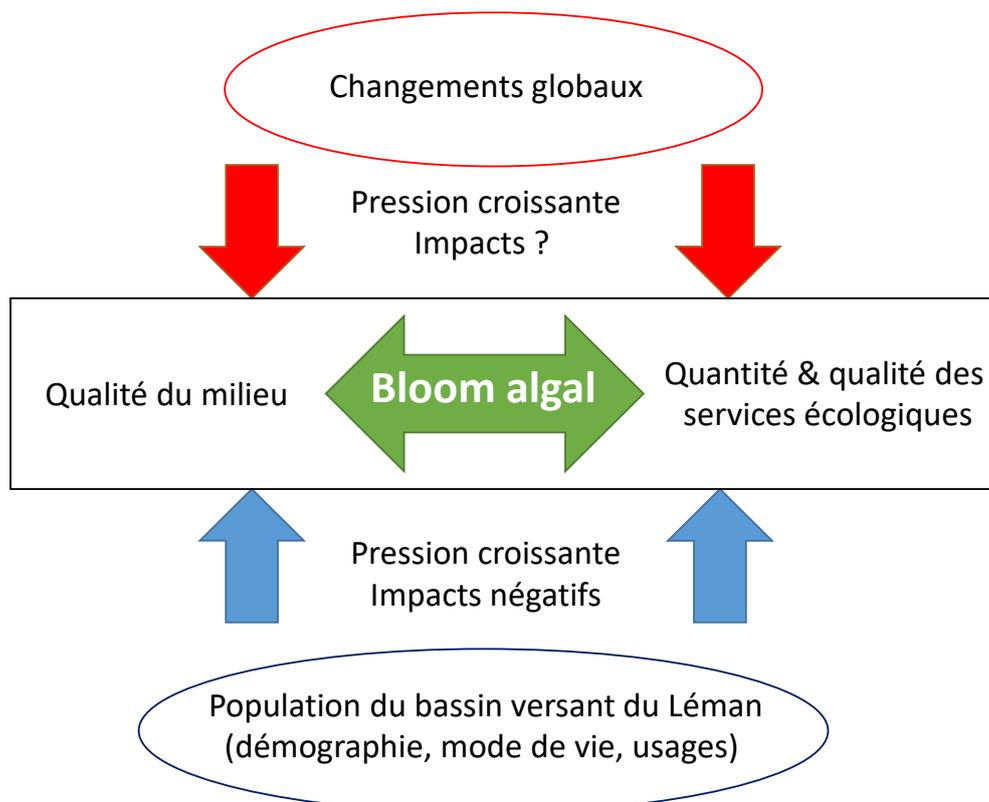
analysé différents aspects de son fonctionnement hydrodynamique (Cotte & Venneman 2020, Reiss *et al.* 2020), son écologie (Anneville *et al.* 2007, Parvathi *et al.* 2012, Krishna *et al.* 2021) ou encore sa biogéochimie (Perga *et al.* 2016). Bien que certaines études adoptent une approche écosystémique afin de comprendre dans leur intégralité à la fois le fonctionnement et la résilience (définie ici comme la capacité de l'écosystème à « rebondir » après une perturbation et retrouver un équilibre stable) du Léman (Noges *et al.* 2018, Anneville *et al.* 2019), il reste nécessaire d'approfondir nos connaissances afin de mieux anticiper les effets du changement climatique ainsi que l'augmentation des pressions locales. En outre, des études ont mis en évidence des interactions synergiques entre les facteurs de stress locaux, régionaux et mondiaux, menaçant encore plus les lacs que lorsque ces processus fonctionnent seuls (Moss *et al.* 2017, Jenny *et al.* 2020).

**Pour que le Léman puisse continuer à fournir des services écosystémiques essentiels tels que l'approvisionnement en eau potable, qui dépend de la qualité de l'eau et de l'absence de prolifération d'algues nuisibles, il est critique que plusieurs disciplines s'unissent, et c'est typiquement ce que propose le projet ALGA.** Les blooms sont des processus complexes dans lesquels différents facteurs environnementaux se conjuguent et qui ont des conséquences compliquées sur le fonctionnement de l'écosystème lacustre. Des disciplines scientifiques allant de la physique des lacs à la physiologie et à l'écologie du phytoplancton, ou encore des spécialistes de la valeur des services écosystémiques doivent collaborer pour comprendre les mécanismes impliqués dans la future formation des blooms. Sans cette compréhension approfondie, il n'est pas possible de prédire les scénarios d'efflorescence probables dans les décennies à venir. Cette compréhension constitue également la base d'une gestion adaptative des lacs, capable de répondre aux défis d'un climat en évolution et de contrôler efficacement les efflorescences qui s'ensuivront. Les buts et limites de la gestion des lacs et les implications des mesures d'atténuation et de contrôle des efflorescences sont fixées par la gouvernance des lacs, dans les deux pays, qui est informée par les besoins et les demandes de la population locale. C'est pourquoi la compréhension des mécanismes d'apparition des blooms algaux et l'évaluation de leurs impacts subséquents sur les services rendus, comme l'eau potable et les loisirs ou encore la pêche, constituent un préalable indispensable à la définition d'une gouvernance transfrontalière face à ces épisodes gérés jusqu'à maintenant sans une concertation nécessaire face à ces enjeux entre pays, ni entre gestionnaires/décideurs d'un même pays. Une gestion transfrontalière efficace doit être en mesure d'assurer une action coordonnée en réponse aux blooms algaux. Elle dépend d'abord de la perception et des attentes de la population et des principaux acteurs économiques bénéficiaires des services écosystémiques. En effet, perceptions et attentes permettent à la fois de définir les modalités du problème à résoudre et sa mise à l'agenda politique (Hill & Varone 2017). Par conséquent, **le projet ALGA aura notamment pour objectif d'identifier les lacunes de la gouvernance actuelle vis-à-vis des blooms, et un éventail de configurations de gouvernances possibles en fonction des enjeux écologiques, des attentes de la population et de son adhésion aux instruments de gouvernance (information, réglementation, taxes, etc.).** L'identification de cet éventail et la proposition de modèles de gouvernance des blooms, réalisables autour du Léman, tiendra compte des bases légales et des configurations d'acteurs sur le territoire pour s'assurer de l'opérationnalité des conclusions du projet (Heikkila 2017). Ainsi, afin de garantir les services fournis par l'écosystème lémanique sur le long terme, une telle approche globale, associant une vision écologique et socio-économique, aiderait les gestionnaires à identifier des mesures respectueuses et adaptées pour répondre aux besoins et à leur évolution future,

à décider des mesures d'adaptation ou d'atténuation et ainsi être en mesure de faire les compromis appropriés (Ostrom 2009, Bolognesi *et al.* 2018).

**Une approche transdisciplinaire autour du bassin lémanique constitue donc un atout majeur pour élaborer des scénarios de gestion pour le futur. Nous proposons de fédérer dans un projet INTERREG FR-CH diverses expertises existantes en associant écologues, politistes, économistes et acteurs socio-économiques autour du socio-écosystème Léman pour faire émerger une compréhension collective qui aidera les gestionnaires dans leurs prises de décisions.**

L'objectif de notre projet porte plus spécifiquement sur les déterminants de l'évolution de la qualité des eaux du Léman pour un multi-usage optimisé pour répondre à la question de savoir si et comment les proliférations d'algues perturberont à l'avenir ce service d'approvisionnement clé qu'est l'eau potable, ainsi que d'autres services importants, en particulier la pêche, les loisirs et la biodiversité, dans un contexte de changement climatique. En effet, parmi les principales menaces pour le Léman, l'augmentation des proliférations de microalgues et de cyanobactéries toxiques, susceptibles de mettre en péril la production et l'approvisionnement en eau potable, mais aussi la pêche et les loisirs, ressort des discussions avec les utilisateurs, les gestionnaires et les chercheurs du lac (**Figure 1**).



**Figure 1** Schéma résumant les déterminants clés dans la prolifération algale et les conséquences sur le milieu

Cette question est critique, comme la conséquente prolifération algale de l'été 2021 l'a manifesté (avec la microalgue *Uroglena* sp. qui a causé d'importants impacts visuels et olfactifs, **Figure 2**). Le large relai des médias a souligné la sensibilité des populations et des décideurs face à cette problématique. Régulièrement, à certaines saisons, le Léman voit se développer massivement certaines algues (e.g. *Mougeotia*) ou des cyanobactéries toxiques (e.g. *Planktothrix rubescens*). Il peut être attendu que si les apports en nutriments demeurent à un niveau suffisamment élevé, ces efflorescences continueront d'être présentes et susceptibles de durer dans le temps (Talpoczai *et al.* 2015, Anneville *et al.* 2015, Gallina *et al.* 2017), avec une variété de nuisances et d'impacts possibles sur les services en lien avec l'approvisionnement en eau potable, la pêche professionnelle et amateur, ou encore les activités de loisirs.

### *Les cyanobactéries*

La problématique du déterminisme de l'apparition et du développement en masse (bloom) des cyanobactéries toxiques constitue typiquement un front de science et un enjeu sociétal fort, localement, mais aussi globalement au niveau national et international (Huisman *et al.* 2018, Benayache *et al.* 2019, Jenny *et al.* 2020). Les efflorescences cyanobactériennes posent des problèmes nombreux, souvent associés à des dysfonctionnements trophiques des écosystèmes, à une baisse de productivité piscicole, et à divers désagréments générant *in fine* des impacts économiques sociétaux et sanitaires. Une version récente entièrement mise à jour du manuel de l'Organisation Mondiale de la Santé sur les cyanobactéries toxiques dans l'eau met en évidence les causes, les conséquences et les risques de ces proliférations (<https://www.who.int/publications/m/item/toxic-cyanobacteria-in-water---second-edition>). En effet les cyanobactéries qui nous intéressent ici produisent des toxines pouvant affecter tous les niveaux trophiques, et sont susceptibles de conduire à des intoxications animales (ex: <https://www.watson.ch/fr/suisse/neuch%C3%A2tel/589475670-la-cyanobacterie-est-de-retour-a-neuchatel>) et parfois humaines. Les cyanotoxines largement produites comme les microcystines, et de plus en plus aussi des neurotoxines, posent non seulement un risque aigu pour la santé humaine, via les activités de nage ou la consommation de poissons (Briand *et al.* 2003, Ibelings & Chorus 2007, Ibelings *et al.* 2011), mais elles peuvent également être impliquées dans divers types de cancer à la suite d'une exposition chronique à de faibles doses dans l'eau potable (Brenda *et al.* 2022, Mrdjen *et al.* 2022). De plus, les cyanobactéries affectent la production en eau potable pour de nombreux lacs sujets à ces efflorescences. Ces problématiques sont étroitement liées à celle du changement global, affectant les communautés phytoplanctoniques en modifiant les habitats et tendant à favoriser les cyanobactéries, particulièrement compétitives dans un milieu soumis à des changements environnementaux importants et où la fréquence des événements extrêmes pourrait s'accroître (Paerl & Huisman 2008, Anneville *et al.* 2015, Moiron *et al.* 2021).

Le groupe des cyanobactéries est composé de nombreuses espèces dont les traits de vie peuvent être très différents. L'écologie des espèces les plus fréquentes en eau douce (*Planktothrix*, *Microcystis*, *Aphanizomenon*, etc...) est largement documentée dans la littérature (Whitton & Potts 2002, Huisman *et al.* 2005). De même les relations entre la biomasse des cyanobactéries et la concentration en nutriments (notamment le phosphore) ont souvent été décrites (Lurling *et al.* 2018, Gobler 2020). Toutefois, ces connaissances restent encore insuffisantes pour bien comprendre la naissance et le maintien des efflorescences, tout particulièrement dans un contexte de changement global qui conduit à réviser les relations

connues (Moiron et al. 2021). Une incertitude supplémentaire provient de changements à grande échelle dans les communautés biologiques de brouteurs du phytoplancton, y compris des cyanobactéries, d'une réduction des daphnies et de l'invasion récente du lac par la moule quagga (Haltiner et al. 2022). La prise en compte de l'impact du bassin versant sur le ruissellement et les apports en nutriments ainsi que les outils de modélisations numériques apparaissent aujourd'hui indispensables pour comprendre en profondeur la dynamique des blooms à cyanobactéries toxiques.

Un risque globalement sous-étudié, contrairement aux proliférations pélagiques, est la prolifération de tapis de cyanobactéries benthiques toxiques (Quiblier et al. 2013). Les études sur les cyanobactéries benthiques sont au mieux anecdotiques et généralement liées à des rapports d'empoisonnements d'animaux dans les médias, comme les chiens morts dans le lac de Neuchâtel en août 2020. Ces tapis se développent principalement dans les zones littorales des lacs, où le contact entre les humains, les animaux et le lac est le plus intense. On pense que des températures plus élevées, des conditions calmes de longue durée, en lien avec le changement climatique, ainsi qu'une transparence accrue liée à la ré-oligotrophisation et/ou au développement de la moule quagga (grand filtreur) peuvent favoriser les conditions de développement des cyanobactéries benthiques. Cependant, les données sur ce qui contrôle leur croissance et leur toxicité (hépatotoxines, neuro- et dermatotoxines) sont aujourd'hui encore largement défaut. Et ceci est particulièrement vrai pour le Léman. À l'heure actuelle, nous n'avons pas de compréhension de base de leur présence et dynamique dans le lac, et nous n'avons pas non plus les moyens de prédire leur développement futur. Les protocoles d'évaluation des risques et les procédures de gestion des risques des cyanobactéries benthiques sont également absents (Ibelings et al. 2011, 2021).

### *Les microalgues*

En ce qui concerne les microalgues, la filamenteuse *Mougeotia gracillima* dont la dynamique a déjà été en partie décrite au sein du Léman (Tapolczai et al. 2015) s'est révélée problématique à de nombreuses reprises par le passé et ses impacts sont importants pour la pêche professionnelle. Les pêcheurs ont pu en effet être amenés, dans certaines situations, à arrêter provisoirement leur activité car leurs filets étaient colmatés par cette algue filamenteuse. L'apparition, la localisation, la durée et l'intensité de ces phénomènes restent mal connus et encore non chiffrés économiquement.

Plus récemment, au cours de l'été 2021, le Léman a reçu un apport de matière terrigène très important en lien avec les précipitations estivales qui ont été extrêmement élevées. La matière organique et notamment le carbone organique, issus du bassin versant, ont donc « alimenté » la zone littorale du lac et ce de manière soutenue. Cette matière organique a fort probablement entraîné le développement de bactéries hétérotrophes capables de dégrader cette matière organique, en partie réfractaire (humique) en la rendant plus labile et disponible, et en participant aussi à la régénération des nutriments. Différentes populations de bactéries avec des fonctions différentes se sont sûrement succédées au cours de cette période. Début septembre 2021, des températures clémentes, un fort ensoleillement, des eaux calmes se sont alors ajoutés à des conditions favorables au développement d'espèces mixotrophes (c'est-à-dire capables de faire la photosynthèse mais pouvant également utiliser la matière organique y compris la biomasse bactérienne). *Uroglona* sp semble avoir été le taxon qui a le mieux profité de ces conditions, expliquant en partie le succès de son efflorescence (**Figure**

2). Il est fort possible que ce type d'événement se reproduise à l'avenir à la faveur du changement climatique et il tend à nous rappeler combien le fonctionnement du lac dépend fortement de son bassin versant, que des liens forts existent entre zones littorales et pélagiques, suggérant que la mise en place d'un suivi scientifique de la zone littorale serait sûrement pertinent (Irani Rahaghi *et al.* en préparation).



**Figure 2** A la fin de l'été 2021, l'ensemble du Léman a été la proie d'une forte efflorescence algale et entièrement recouvert par l'espèce *Uroglena* sp qui a coloré les eaux de surface en marron pendant plusieurs jours

Les dernières décennies ont révélé l'importance des causes anthropiques comme principaux déterminants des changements environnementaux. A cet égard, l'étude (prospective) de l'évolution d'un écosystème ne peut faire l'économie de la prise en compte de mécanismes sociaux afin d'être réaliste (Redman *et al.* 2004). Par exemple, les politiques publiques contribuent significativement à expliquer la fréquence et l'intensité des inondations ou des sécheresses (phénomènes à causes multiples) car elles déterminent l'usage des sols et la pression sur la ressource (Bolognesi 2015, Di Baldassare *et al.* 2019). La formulation d'une politique publique résultant de la demande politique, de l'attention et de la façon dont est compris un problème (Hill & Varone 2017), comme les blooms algaux dans le Léman, les perceptions du problème par les acteurs politiques, économiques et la population, sont donc critiques pour accompagner les évolutions d'un socio-écosystème comme le Léman. La façon dont ces efflorescences sont perçues et peuvent être gérées constitue une question importante et demeure une tâche clé.

De récentes études montrent que la perception des risques environnementaux s'associe avec la formulation des politiques mais que cette perception est contingente (Glaus *et al.* 2020, Frondel *et al.* 2017), instable dans le temps (Wheeler *et al.* 2021) et peut ne pas refléter le fonctionnement écologique d'un système (Cottet *et al.* 2013, Sarker & Blomquist 2019). De plus, la relation entre perception, risque et formulation politique se révèle être non-linéaire (Mathias *et al.* 2020, Nohrstedt *et al.* 2021). Il est donc indispensable d'analyser ces perceptions dans le cas du Léman pour à la fois caractériser l'attention portée aux problèmes de ce lac, et comprendre sous quelles conditions elles peuvent s'associer à l'émergence de politiques plus soutenables et pouvoir agir efficacement sur des perceptions erronées une fois que leurs déterminants seront connus.

L'augmentation observée et attendue de la fréquence, de la durée et de la biomasse des proliférations d'algues ou cyanobactéries nuisibles suggère que les conditions environnementales sont de plus en plus favorables à leur présence et développement. L'eutrophisation reste l'explication la plus parcimonieuse, l'augmentation des nutriments fertilisant le phytoplancton et permettant aux cyanobactéries dans bon nombre de cas de « gagner le match ». Cependant, dans certaines situations, l'incidence croissante des HAB (pour harmful algal bloom) semble déconnectée des apports d'éléments nutritifs, et les proliférations se produisent à des moments inattendus (p. ex. en hiver) et dans des endroits imprévisibles (p. ex. les lacs oligotrophes). Les cyanobactéries, pour ne citer qu'elles, peuvent se développer, voire former des efflorescences même lorsque les concentrations de phosphore minéral dissous et/ou d'azote sont inférieures aux limites de détection analytique. De plus, de faibles relations entre les paramètres traditionnels de la qualité de l'eau et les concentrations de (cyano)toxines ont été signalées. Il est donc essentiel de mieux comprendre les stratégies de ces microorganismes pour contourner la limitation du phosphore et/ou de l'azote afin d'être capable de proposer des solutions de contrôle et d'atténuation des efflorescences. De plus, le comportement imprévisible des cyanobactéries exige non seulement de nouvelles réflexions sur la meilleure façon de contrôler ces fleurs d'eau, mais aussi d'adapter nos mécanismes d'évaluation et de gestion des risques, afin d'éviter l'exposition de la population autour du Léman aux toxines.

## Objectifs du projet ALGA

Les objectifs du projet visent principalement à :

- (i) comprendre comment les blooms algaux impacteront dans l'avenir la qualité des eaux du Léman et les différents services qui en découlent (approvisionnement en eau potable, pêche et activités récréatives) dans un contexte de changement climatique ;
- (ii) proposer de nouveaux outils d'aide à la décision, des protocoles pleinement opérationnels, pour l'évaluation des risques (exposition aux toxines par l'eau potable, les loisirs ou la nourriture pour les humains et séparément pour les animaux comme les chiens) adaptés à la situation locale du Léman et les étapes à suivre pour une gestion appropriée des risques.

Dans ce cadre, il est proposé de considérer / prendre en compte :

- le phytoplancton au sens large (microalgues et cyanobactéries), en zones pélagique et benthique littorale ;
- différentes échelles et divers outils (e.g. observations dont télédétection, expérimentations, analyses de données existantes et nouvelles, modélisation numérique);

Pour, au final, proposer :

- la mise en place de livrables pertinents (e.g. les bases d'un observatoire global et intégratif ; synthèses sur le déterminisme des blooms, leur perception, leur incidence sur les services rendus, les outils pour les gérer, les mesures à mettre en place ; un ou plusieurs outils prédictifs de l'occurrence d'un bloom pour aider à la décision ; l'évaluation d'impacts dont le coût économique d'un bloom, causés par exemple par l'augmentation des coûts de production d'eau potable, la perte de tourisme, les effets négatifs sur la valeur des propriétés (voir par exemple Dodds *et al.* 2009).
- des propositions d'actions et/ou des recommandations de politiques publiques pour en limiter la fréquence et l'intensité (renaturation de la zone littorale du lac, pratiques de gestion du bassin versant avec une urbanisation à repenser, arrêt de l'artificialisation des berges, création/modernisation des stations d'épuration et bassins de rétention des eaux pluviales).

Pour atteindre ces objectifs, le projet (résumé par la **Figure 3**) est divisé en 4 groupes ou work packages comme indiqués dans la **Figure 4** et explicités ci-après.

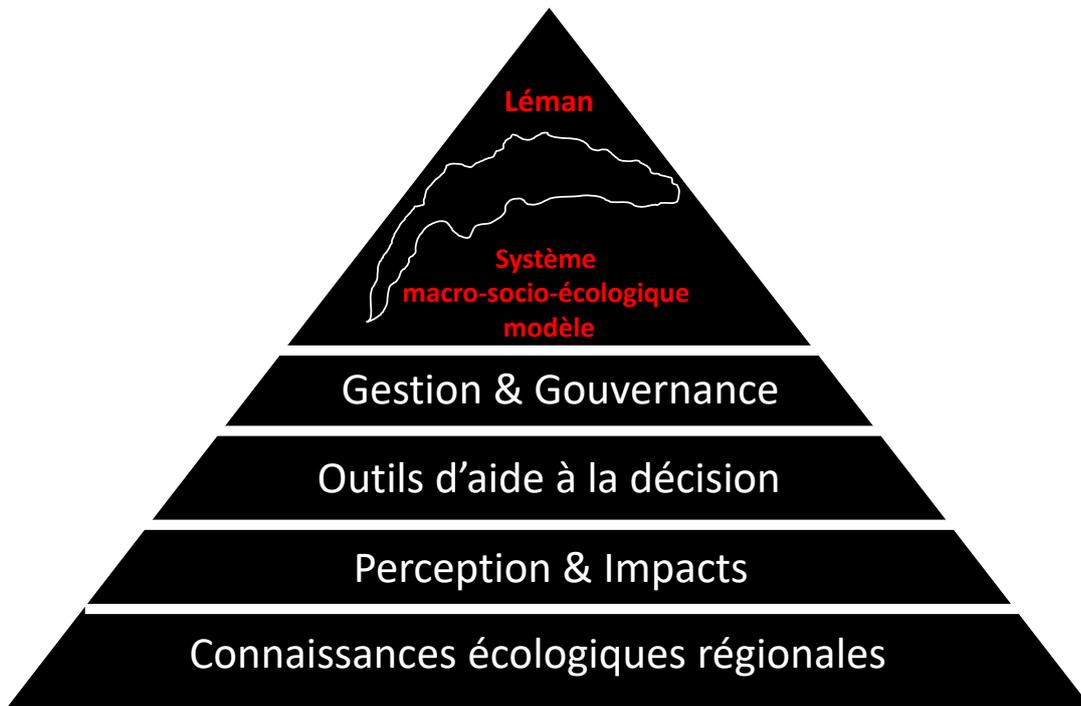


Figure 3 Schéma synoptique résumant le projet ALGA

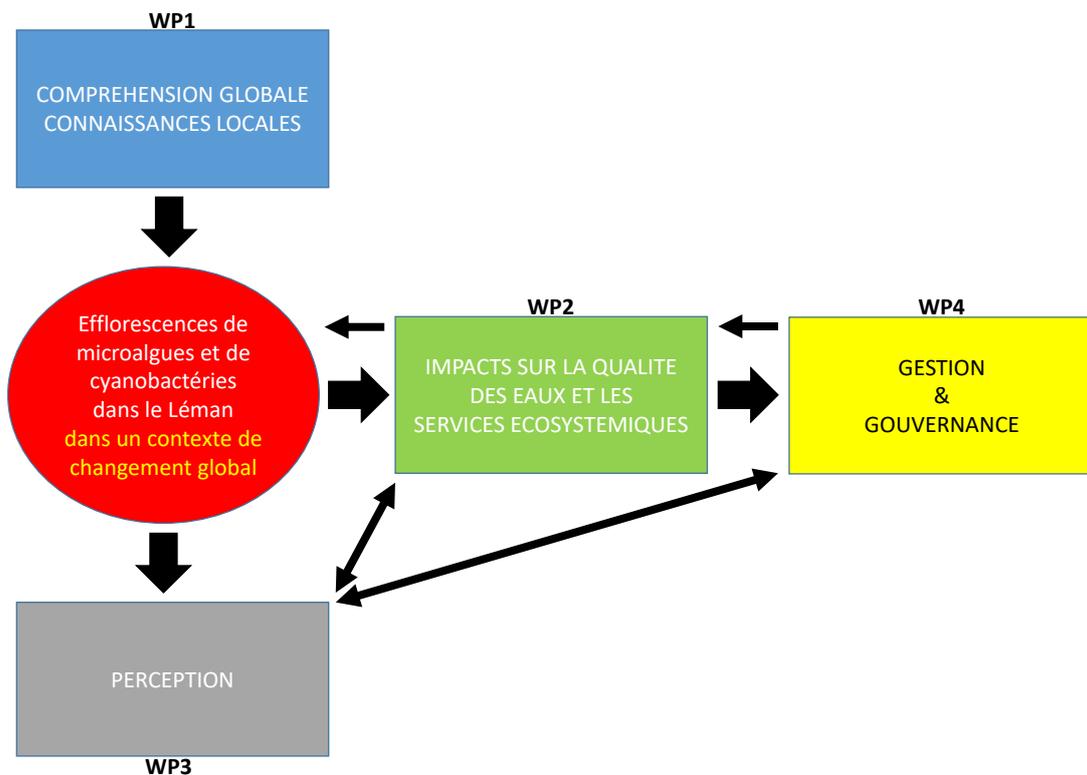


Figure 4 Articulation des work-packages proposés pour le projet ALGA et de leurs interactions

## WP1: Caractérisation des mécanismes intervenant dans les proliférations algales du Léman

Animateurs : Bastiaan Ibelings & Anna Carratala

Lorsque nous pensons aux proliférations d'algues nuisibles dans les lacs périalpins français et suisses, l'espèce archétypique qui vient à l'esprit est la cyanobactérie filamenteuse productrice de toxines, de couleur lie-de-vin *Planktothrix rubescens*. Cette espèce est généralement située dans le métalimnion des lacs stratifiés, mais elle peut quitter cette position invisible à l'œil et devenir visible dans les eaux de surface lors d'un mélange de la colonne d'eau. Cette manifestation est connue sous le nom de « sang de Bourguignons » (Walsby *et al.* 2006). *P. rubescens* semble bénéficier des conditions changeantes causées par le changement climatique, non pas tant en lien avec des températures estivales plus élevées, mais plutôt des températures hivernales plus douces (Jacquet *et al.* 2005, Anneville *et al.* 2015, Gallina *et al.* 2017), et surtout un brassage réduit du lac en hiver, laissant intacte une grande population hivernante de *P. rubescens* qui sert d'inoculum pour le bloom à venir (Posch *et al.* 2012, Moiron *et al.* 2021).

On pourrait dire que le risque de futures proliférations de *P. rubescens* dans le Léman, ainsi que les raisons (facteurs et processus) de ces proliférations, sont relativement bien compris compte tenu de la grande quantité de travail qui a déjà été effectuée mais les changements environnementaux continuent de nous surprendre et mettent à mal nos certitudes. De plus, notre focalisation sur un possible avenir « rouge » pour le Léman (Gallina *et al.* 2017, Derot *et al.*, 2020) nous a peut-être amenés à négliger d'autres algues potentiellement nuisibles, d'autres microorganismes susceptibles de former des blooms. Les observations et les événements récents dans le Léman ne font d'ailleurs que souligner cet état de fait.

Ce WP1 sert de base de connaissance des efflorescences dans le lac pour les autres WPs. Il vise à (a) approfondir notre compréhension de la dynamique de *P. rubescens* dans un environnement lacustre changeant, mais aussi (b) à combler nos lacunes de connaissance dans la compréhension de 4 autres phénomènes moins bien étudiés et pourtant critiques: (i) les proliférations en proche surface de cyanobactéries potentiellement toxiques, unicellulaires ou formant des colonies, typiquement le clade *Cyanobium-Synechococcus*, (ii) les proliférations d'organismes mixotrophes, comme le chrysophyte *Uroglena*, (iii) les blooms d'algues filamenteuses non toxiques mais néanmoins nuisibles comme *Mougeotia* qui semble favorisée dans le Léman par la combinaison ré-oligotrophisation - changement climatique, iv) les tapis de cyanobactéries benthiques toxiques susceptibles, après décrochement, de se retrouver dans la colonne d'eau en zone littorale et de libérer des toxines.

En sélectionnant cette variété d'organismes (voir ci-après), nous souhaitons également approfondir notre compréhension des interactions entre la zone littorale et la zone pélagique du Léman, ces échanges étant encore largement méconnus à ce jour. Avec la ré-oligotrophisation qui se poursuit dans la zone pélagique, associée à des durées et intensités accrues de la stratification de la colonne d'eau, emprisonnant les nutriments dans l'hypolimnion, il est attendu que la zone littorale devienne une zone de disponibilité relativement importante en nutriments et que les échanges entre le littoral et la zone pélagique gagnent en importance. L'importance accrue de la zone littorale et les conséquences de ce renforcement des connexions littoral - pélagique commencent déjà à être visibles, par exemple dans la floraison d'*Uroglena* (et la prolifération des tapis benthiques de cyanobactéries toxiques décrites ci-dessus). Les périodes de précipitations extrêmes seront plus fréquentes, comme en août 2021. Ces précipitations transportent les nutriments vers le lac. Une zone

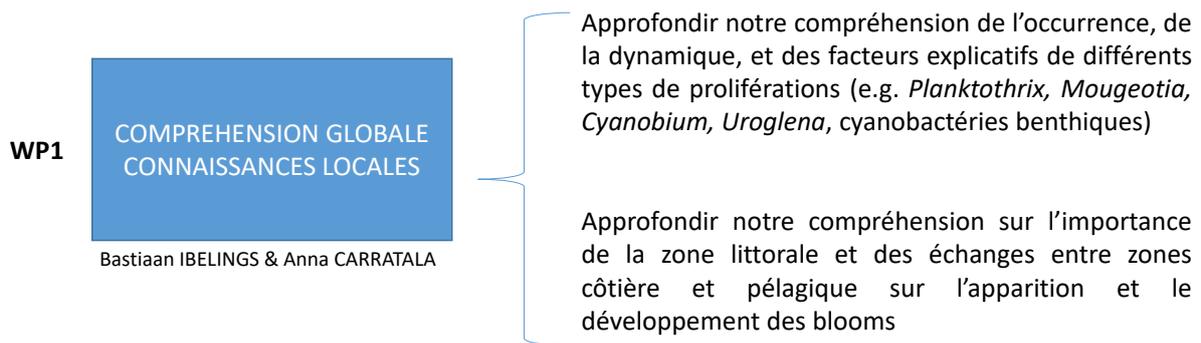
littorale renaturée fonctionnerait comme une bande tampon qui absorberait les nutriments dans les plantes (hélrophytes et macrophytes), empêchant ainsi la formation d'efflorescences nuisibles dans les eaux libres du lac.

Les risques liés aux tapis de cyanobactéries benthiques dans notre région sont devenus évidents avec la mort de plusieurs chiens dans le lac de Neuchâtel en août 2020 (<https://www.24heures.ch/les-cyanobacteries-mettent-elles-la-baignade-en-peril-857270723488> ; Le 24 heures 05 August 2020, Les baigneurs doivent ils craindre les algues bleues?). Les cyanobactéries benthiques restent sous-étudiées par rapport aux espèces pélagiques. Plus globalement, les études sur le développement des tapis sont fragmentées, incomplètes et généralement uniquement liées à des accidents visuels et dramatiques, i.e. la mort d'animaux domestiques (Quiblier *et al.* 2013). Dans le Léman, nous n'avons pratiquement aucune connaissance sur la présence de tapis de cyanobactéries productrices de toxines. Pour la surveillance efficace de ces cyanobactéries benthiques, l'utilisation de la benthotorche Moldaenke sera privilégiée, ainsi que l'application de capteurs hyperspectraux sur des drones aériens et l'analyse génétique sur les espèces et gènes producteurs de toxines. Une campagne de sensibilisation sur la possibilité d'intoxications canines pourrait être proposée auprès des vétérinaires de la région, et en cas d'intoxication, sur les conditions de ces événements.

Un article récemment publié par Suarez *et al.* (2023) sur *Planktothrix rubescens* dans le lac Hallwil (CH) montre comment, sous l'impact de la réoligotrophisation, cette espèce a évolué pour être capable de proliférer en zone « profonde ». Ce constat a été observé par ailleurs et par le passé en France sur le lac de Nantua (Feuillade 1994) et dans le lac du Bourget (Moiron *et al.* 2021). L'enjeu ici est que le prélèvement d'eau effectué dans l'hyplimnion pour la production d'eau potable peut alors se faire à la profondeur exacte où les toxines sont produites.

Avec les 5 types d'algues ou cyanobactéries choisis, ALGA couvrira une variété d'espèces clefs et un gradient complet, de la zone littorale au large pélagique ainsi qu'un gradient de profondeur, de l'épi- à l'hypolimnion. Les espèces ciblées présentent en effet une existence épilimnique (e.g. *Cyanobium*, *Mougeotia*), métalimnique mais pouvant se déplacer vers l'hypolimnique (e.g. *P. rubescens*), un modèle d'échange entre le littoral et le pélagique (e.g. *Uroglena*) et un groupe typique de la zone littorale ou des tributaires (e.g. les tapis de cyanobactéries). Pour des informations plus détaillées sur les groupes d'algues qui menacent l'évolution future de la qualité de l'eau du Léman, voir l'annexe 1. *In fine*, ces travaux devraient aboutir à des protocoles pour l'évaluation et la gestion des risques pour les cyanobactéries pélagiques et benthiques dans le Léman (voir Ibelings *et al.* 2011 pour des exemples internationaux) – voir WP4.

**Les 2 principaux objectifs du WP1** peuvent être visualisés comme suit (**Figure 5**):



**Figure 5** Schéma résumant les principaux objectifs du WP1

Ces objectifs se **traduisent par les questions suivantes** :

- 1) Quels sont les schémas saisonniers et annuels de la dynamique des différentes espèces ou genres importants identifiés dans le Léman ? Comment sont-ils liés à l'environnement ? Y-a-t-il des déclencheurs clefs des blooms ?
- 2) Quelle est la distribution spatiale des proliférations d'algues superficielles dans le lac – où sont-elles initiées, comment se propagent-elles et disparaissent-elles ?
- 3) Quelle est la distribution des cyanobactéries benthiques dans la zone littorale du lac ?

Il est proposé que chacun de ces objectifs et questions soit ventilé en tâches spécifiques (voir Tableau Calendrier des taches à la fin) où la collaboration entre les différents acteurs du projet sera très importante. Les **produits livrables principaux du WP1** sont les suivantes :

- 1) Données à haute fréquence (quotidiennes - hebdomadaires) de variables environnementales et d'algues (LéXPLORE) ;
- 2) Analyse des séries chronologiques de la base de données à long terme OLA / CIPEL ;
- 3) Analyse des toxines – hépto- et neuro-toxines dans des échantillons hebdomadaires (si possible) en utilisant les méthodes en place à l'Eawag ;
- 4) Images satellitaires du lac (Sentinel 2) montrant la distribution spatiale des différentes efflorescences pendant la période d'étude en utilisant des algorithmes et des procédures développées à l'Eawag pour le traitement de ces images ;
- 5) Un Modèle hydrodynamique tridimensionnel (3D) a déjà été implémenté pour le Léman (Soulignac *et al.* 2019). Il sera amélioré afin de tester et exécuter des scénarii attendus d'efflorescences avec différentes caractéristiques pour évaluer leurs impacts respectifs sur les indicateurs de l'écosystème. Il permettra également d'investiguer les échanges entre zone littorale et zone pélagique afin de mieux comprendre l'origine des proliférations algales et leur extension ;
- 6) Premier relevé des cyanobactéries benthiques autour du lac Léman en utilisant la Benthotorch et des méthodes basées sur l'ADN ainsi que des drones hyperspectraux.

## WP2: Impacts des efflorescences algales et cyanobactériennes

Responsables : Orlane Anneville & Stéphan Jacquet

Les microalgues et les cyanobactéries sont des composantes majeures des écosystèmes aquatiques. Elles régulent des fonctions importantes de l'écosystème telles que le transfert d'énergie et la biodiversité. Compte tenu de ce rôle, le phytoplancton contribue de manière significative à divers services écosystémiques, par exemple la qualité de l'eau, l'approvisionnement alimentaire, la régulation du climat via l'absorption de CO<sub>2</sub> et le stockage du carbone, etc.

Le Léman est exposé à une grande variété de pressions anthropiques (par exemple, le changement climatique incluant les événements extrêmes, l'eutrophisation, les micropolluants, les microplastiques, etc...) susceptibles d'induire de forts changements dans les communautés phytoplanctoniques (Anneville *et al.* 2019) avec des conséquences sur le fonctionnement du lac et les services qu'il fournit (Baulaz 2020). Il est aujourd'hui largement reconnu que de nouveaux changements dans les facteurs de stress locaux et mondiaux, en particulier la combinaison du réchauffement climatique et de l'utilisation des terres (urbanisation, apports de nutriments), peuvent fortement favoriser le développement de proliférations algales entraînant une dégradation de l'état écologique et de la qualité de l'eau (Kakouei *et al.* 2021). La dégradation de la qualité de l'eau des lacs est à l'origine d'une perte de services écosystémiques qui soutiennent les sociétés humaines (Baulaz 2020, Jenny *et al.* 2020).

Il convient toutefois de noter que les proliférations algales sont de natures diverses et qu'elles n'entraînent pas nécessairement toutes au même degré une dégradation de la qualité de l'eau et une perte des services écosystémiques. Les proliférations de cyanobactéries toxiques sont considérées comme les pires en raison du risque sanitaire qu'elles impliquent (Huisman *et al.* 2018). Les proliférations peuvent présenter diverses caractéristiques en ce qui concerne la composition taxonomique, la durée, la localisation, la saison et nous nous attendons à ce que les impacts sur les services écosystémiques dépendent effectivement de ces caractéristiques. Prédire comment et quelles efflorescences auront un impact sur les différents services fournis par les lacs est désormais une question sociétale de première importance, mais elle fait paradoxalement toujours largement défaut pour le Léman, pourtant le plus grand lac naturel profond d'Europe occidentale.

De nombreux impacts des proliférations d'algues et/ou de cyanobactéries sont d'ordre écologique, socio-économique et/ou culturel. Sans être exhaustif, et sans ordre d'importance, on peut citer la désoxygénation de l'eau, la réduction de la transparence, la mortalité piscicole, la contamination de l'eau potable, l'exposition alimentaire, l'altération du réseau trophique, les maladies de peau ou pulmonaires, la dégradation de l'habitat, l'inefficacité des filets de pêche, ... Ces impacts, qu'ils soient de nature écologique et/ou socio-économique affectent à leur tour les usages importants de l'eau.

Peu de travaux se sont penchés sur les impacts des blooms sur les services écosystémiques. Aucune synthèse mettant en évidence la structure théorique de la problématique et /ou à visée opérationnelle n'est disponible. De la même manière, il manque encore à ce jour une synthèse mettant en lien les interactions entre les services, les bénéficiaires des services, les cascades de dégradations, la hiérarchie de l'ensemble.

Ce WP visera donc à étudier les conséquences d'une variété de proliférations algales sur les services écosystémiques tels que définis par le *Millenium Ecosystem Assessment* (soutien, réglementation, approvisionnement et culture) et à déterminer les associations entre les

caractéristiques des proliférations (composition taxonomique, habitat, intensité...) et le niveau de menace pour l’approvisionnement et les autres services rendus par le Léman. Il précisera à quel point l’écosystème est et sera vulnérable dans le contexte des changements mondiaux. Le WP2 s’appuiera sur les résultats du WP1 et du WP3 et alimentera le WP4.

L’objectif de ce WP sera de fournir des conseils, avis consultatifs et aides à la décision opérationnelle pour l’évaluation des risques. Il permettra d’informer le public si une efflorescence constitue une préoccupation alarmante pour certaines utilisations spécifiques.

Dans un premier temps, le travail proposé dans ce WP consistera en un inventaire et un examen systématique des expertises existantes et de la littérature scientifique axée sur les impacts de la prolifération d’algues sur les écosystèmes lacustres. La synthèse réalisée permettra de mieux illustrer les liens entre les caractéristiques des efflorescences et leurs impacts directs ou indirects sur les services écosystémiques. En terme de « livrables », un document de synthèse sera rédigé sur ces impacts et discutera des implications pour les utilisateurs du lac sur la qualité de l’eau, les activités récréatives, les usages, les entreprises et, en général et plus particulièrement sur ce qui concerne ou peut concerner le Léman.

Dans un second temps, il est proposé d’étudier les relations entre les proliférations passées observées dans le lac et leurs conséquences à différentes échelles spatiales et temporelles (à l’aide des bases de données OLA, SECOE et LEXPLORE), en termes d’approvisionnement et de services culturels. Les résultats aideront à identifier des proxys d’états de l’écosystème (par exemple, la transparence) qui pourraient être utilisées pour quantifier la qualité de services spécifiques (par exemple, l’approvisionnement en eau, les pêches).

A partir des améliorations du modèle hydrodynamique tridimensionnel (3D) (WP1), des scénarios d’efflorescence les plus probables seront proposés afin d’évaluer leurs impacts respectifs sur certains indicateurs qui déterminent l’adéquation du lac pour les services écosystémiques. Dans le WP2, nous appliquerons un second modèle qui a été récemment développé à l’UniGe dans le cadre de la thèse de Doelker (2022). Doelker a adapté un modèle d’évaluation intégré (IAM), plus précisément le modèle dynamique intégré climat-économie (DICE) développé par Nordhaus (2007) pour évaluer les dommages économiques des proliférations de cyanobactéries dans le lac Érié. Dans le WP2, ce modèle sera mis en œuvre pour quantifier les dommages économiques des efflorescences dans le Léman.

L’analyse rétrospective de la base de données OLA associée à l’analyse des images satellitaires permettra de définir les caractéristiques des blooms et de caractériser les impacts sur les services écosystémiques qui en ont résulté. Sur cette base, des scénarios représentatifs du contexte hydrodynamique de ces épisodes seront définis afin d’étudier en détail les liens entre proliférations et déficiences des services écosystémiques. Par exemple, l’expansion du bloom par les courants et les implications qui en résultent pour la prise d’eau ou la transparence de l’eau des plages pourront être simulées. Les sorties du modèle hydrodynamique 3D fourniront des informations sur la structure thermique de la colonne d’eau (épaisseur de la couche mélangée, profondeur de la thermocline... ) qui seront utilisées pour établir le lien entre le développement biologique et les états de l’écosystème (par exemple, la transparence de l’eau ou présence de cyanobactéries). Le modèle hydrodynamique permettra de mieux comprendre le déplacement des blooms, comme dans le cas du bloom d’*Uroglena* survenu au Léman au cours de l’été 2021 (Rahaghi *et al.* en préparation). Il est à noter ici que cette question intéresse également le gestionnaire du lac (la CIPEL).

**Les principaux objectifs** du WP2 (**Figure 6**) peuvent donc être résumés comme suit :

WP2

IMPACTS SUR LA QUALITE  
DES EAUX ET SERVICES  
ECOSYSTEMIQUES

Orlane ANNEVILLE & Stéphan JACQUET

Fournir une synthèse (étude complète et revue systématique sur les impacts des prolifération d'algues sur les écosystèmes lacustres), basée sur la littérature scientifique et expertises diverses pour mieux illustrer les liens entre les caractéristiques des proliférations dans le Léman et leurs impacts directs ou indirects sur le soutien, la réglementation, l'approvisionnement et les services culturels

Combiner analyse rétrospective des données et modélisation pour étudier les associations entre les caractéristiques des proliférations et leurs conséquences sur les services écosystémiques afin de proposer des orientations pour la gestion et la gouvernance

Figure 6 Schéma résumant les principaux objectifs du WP2

En termes de « **livrables** » de WP2, on proposera :

- 1) Une synthèse bibliographique mettant en lumière les relations entre blooms algaux et services écosystémiques en milieu lacustre ;
- 2) Un document de synthèse sur les impacts et les implications pour les utilisateurs du Léman sur la qualité de l'eau, les activités récréatives, les usages, les entreprises, etc., et ce, en fonction de divers scénarios de bloom ;
- 3) Un outil (modèle) alimenté par les résultats du modèle hydrodynamique 3D à destination des gestionnaires et décideurs, basé sur l'identification d'indicateurs simples d'état de l'écosystème (par exemple la transparence) qui pourraient être utilisés pour quantifier la qualité de services spécifiques (par exemple l'approvisionnement en eau, la pêche). Ce modèle devrait permettre la détection précoce des conditions environnementales associées à une altération des services écosystémiques et favorisera la possibilité d'agir rapidement pour réduire les risques en alertant les services concernés (stations de pompage pour l'eau potable...) et la population.

## **WP3: La perception des blooms par la population du bassin lémanique**

Responsables: Alexandre Richard & Pascal da Costa

L'IPBES (2008) définit les services écosystémiques comme les avantages que les humains tirent des écosystèmes. Ces services sont répertoriés en quatre catégories selon la classification internationale commune des systèmes auxiliaires (CICES, <https://cices.eu>): i) l'approvisionnement en nourriture, en eau et autres ressources naturelles; ii) la régulation, la purification de l'eau, le climat et la lutte contre les maladies; iii) le soutien, les cycles des éléments nutritifs et la pollinisation des cultures; iv) les services culturels, les avantages spirituels et récréatifs. Bien que l'exercice de classification consiste à démarquer des catégories, il existe une interdépendance des liens fonctionnels et statistiques entre ces services (TEEB 2010).

A mesure que ce concept s'est répandu dans la communauté scientifique, les institutions publiques et privées ont cherché à inclure les services écosystémiques comme outil d'aide à la décision et à la négociation. Cette inclusion vise à trouver un « équilibre » dynamique entre développement économique, utilisation rationnelle des ressources naturelles et bien-être social (Ruckerlshaus & Ali 2015). Il convient de noter que l'identification et l'évaluation de la contribution des écosystèmes à la satisfaction des besoins socio-économiques est une tâche complexe qui nécessite des recherches approfondies et une approche multidisciplinaire (TEEB 2010).

Comprendre l'état et les tendances des services écosystémiques dans un environnement en évolution est critique pour déterminer des stratégies de gestion efficaces. Le Léman fournit de nombreux services écosystémiques à différentes catégories de populations, décrits en profondeur pour leur lien avec la qualité des eaux et le territoire du lac par Baulaz (2020), qui peuvent être impactés par la prolifération d'algues nuisibles (WP1-WP2). Certains services peuvent être monétisés (on parle généralement de services écosystémiques marchands, tels que la pêche professionnelle, la production d'eau potable, ou encore les activités nautiques). Mais pour d'autres services (des services de régulation ou de soutien, mais également le bien-être social ou les aménités, la quiétude et beauté d'un paysage, les avantages spirituels et encore de nombreuses activités récréatives, etc.), la valeur économique reste difficile à quantifier, principalement parce qu'ils constituent un type particulier de bien qui sous-tendent des activités économiques, mais ne sont pas échangés en tant que tel sur un marché. La caractérisation de la place de ces activités non-marchandes pour les usagers se révèle ainsi essentielle pour permettre une évaluation crédible de la valeur des services écosystémiques.

La monétarisation des services écosystémiques est un vaste domaine de recherche (de Groot *et al.* 2012). La difficulté réside dans la définition même du service écosystémique, qui est souvent un bien immatériel, non marchand, et dont la rareté n'est pas directement liée à un prix. Il existe trois principales approches d'évaluation de la valeur économique des services écosystémiques : la technique basée sur les coûts observables (coût de restauration après dégradation, coût de remplacement, coûts évités, coûts de transport...), les techniques basées sur le comportement vis-à-vis des biens marchands liés aux écosystèmes (coûts liés au tourisme, à la valeur immobilière...), et, enfin, la technique consistant à faire déclarer des préférences par un panel représentatif de la population du territoire. Cette dernière méthode semble la plus appropriée, car elle identifie toutes les facettes du bien environnemental. Elle consiste à présenter les différentes évolutions probables ou hypothétiques du service

écosystémique et à proposer différents choix (enquêtes par questionnaires) associés aux efforts économiques consentis par la population, pour maintenir/améliorer/valoriser les services fournis. Cette méthode est finalement basée sur l'évaluation de la volonté de payer pour un état écologique « préservé » ou « amélioré » (Hernandez & da Costa 2022).

Aussi, ce WP3, qui se concentre sur la perception de la population à l'égard de la prolifération des algues et des impacts sur les services rendus par le lac, peut apporter des informations utiles pour aider à identifier/classer les principales attentes de la population et à établir des stratégies de gestion future, notamment dans une optique d'analyse coûts-bénéfices la plus complète possible, incluant les valeurs des services écosystémiques, y compris non-marchands, générés par « l'écosystème Léman ». La perception du public à l'égard des proliférations d'algues est souvent associée à l'eutrophisation, où l'augmentation de la charge en éléments nutritifs entraîne une augmentation de biomasse, avec un effet notable sur la qualité de l'eau (anoxie) et sur l'écosystème par des altérations substantielles de l'écologie benthique et pélagique (Medlin 2013). Cependant, la dynamique de prolifération des algues est beaucoup plus complexe notamment pendant les trajectoires de réoligotrophisation sous l'effet concomitant du changement climatique et de stress multiples. Lors de la récente prolifération d'*Uroglena* décrite plus haut, provoquant des impacts visuels et olfactifs, et relayée par les médias, un malentendu général a été observé au sein d'une partie de la population à l'apparition de cette efflorescence, attribuant ces effets soit à un défaut de la station d'épuration, soit à une tendance à l'eutrophisation du lac, soit à une pollution d'un nouveau type. Une telle perception est à la fois la conséquence d'un manque de connaissances scientifiques approfondies sur les processus et la récurrence de ce type de prolifération dans le lac, mais aussi d'un déficit de diffusion des connaissances à la population et d'explication des causes de ce phénomène. La perception du public devrait également différer selon les catégories socioculturelles. Ainsi, les professionnels travaillant sur le lac sont beaucoup plus informés et préoccupés par le fonctionnement du lac et l'apparition de la prolifération des algues. La perception du public peut également varier en fonction des lieux de vie ou d'activité, du réseau social, les problématiques locales et les types de relations avec l'environnement pouvant varier selon l'espace. La perception du public à l'égard des proliférations d'algues, et le degré de préoccupation quant à l'état écologique actuel et futur du lac constituent donc des informations d'un grand intérêt pour explorer la perception des risques sur divers services écosystémiques (approvisionnement en eau potable, activités de pêche, activités nautiques et récréatives, bien-être associé à un écosystème lacustre « en bonne santé », etc.).

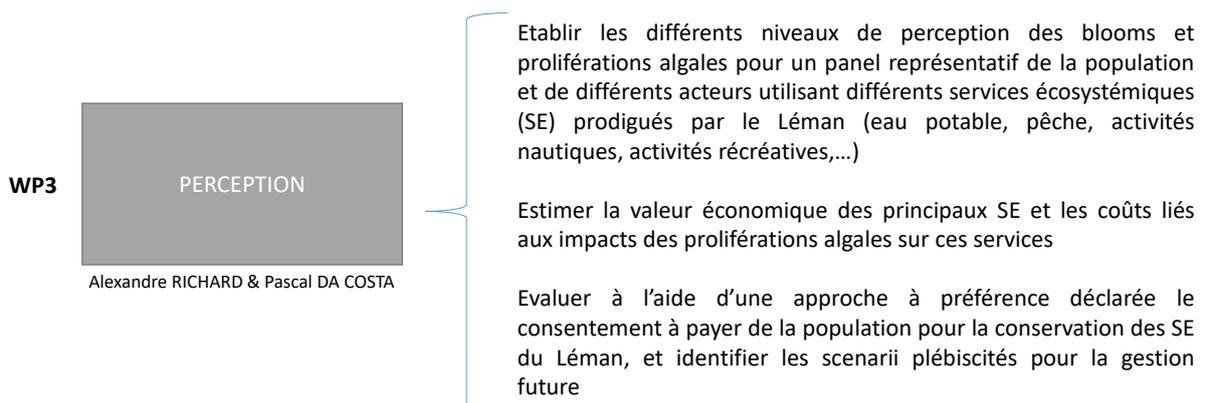
Les efforts visant à améliorer l'état écologique des eaux de surface en Europe devraient induire des changements positifs sur les services écosystémiques, tels que l'atténuation des risques pour la santé humaine liés à l'eau, qui est l'un des avantages non commerciaux les plus importants (Hunter *et al.* 2012). Toutefois, les estimations des avantages pour le bien-être des mesures d'atténuation des risques sont actuellement incomplètes. En particulier, peu d'études ont tenté d'estimer la perception des risques ainsi que les coûts et les avantages de la réduction des risques posés par les proliférations algales dans les lacs utilisés pour l'eau de boisson, l'approvisionnement alimentaire et/ou les activités récréatives (Hunter *et al.* 2012). Pourtant, les études qui existent montrent que les coûts économiques des proliférations d'algues sont considérables, par exemple 2,2 milliards USD pour les seuls États-Unis (Dodds *et al.* 2009).

Dans le Léman, la pêche (tant professionnelle que récréative), représente un bon exemple de service écosystémique aux multiples facettes, qui fait partie des services dits

d'approvisionnement (exploitation de la ressource piscicole) mais aussi des services culturels (nombre de membres par association de pêche, tourisme, activités de pêche récréative). Sur la base des projections du WP2 sur l'impact des proliférations d'algues sur l'évolution de la mortalité des poissons et de l'encrassement des filets dans le Léman, des scénarios peuvent ensuite être définis et hiérarchisés sur les trajectoires d'évolution des assemblages et de l'abondance des poissons d'une part, et des activités de pêche d'autre part. Ces scénarios seront définis selon différents critères (comité technique / scientifique local, comité des parties-prenantes, focus groupes) puis proposés à la population sous la forme d'une enquête de grande ampleur. Par exemple, l'attachement de la population à la consommation de perches du lac peut être évalué et comparé à différentes alternatives telles que la consommation de perches d'importation ou la consommation d'autres espèces de poissons lorsque les proliférations empêchent la capture de la perche. Les résultats de cette analyse conduiront à une quantification des différents attributs de l'activité de pêche au Léman et à des propositions de gestion concrètes qui concilient l'évolution naturelle de l'écosystème lacustre et les attentes de la population.

**L'objectif principal de ce WP3 (Figure 7)** est donc de fournir des informations provenant de différents groupes de population du territoire lémanique sur la perception de la prolifération des algues et des impacts sur les services écosystémiques. Les questions suivantes seront également abordées :

- 1) Quelle est la valeur économique réelle (ou marchande) des services écosystémiques touchés par les proliférations algales et quel est le coût de cet impact ? ;
- 2) Quels sont les efforts économiques ou la « volonté de payer » de la population - et selon quelle lecture / compréhension de la situation écologique du Léman, pour maintenir les services écosystémiques fournis par les lacs et potentiellement menacés par la prolifération des algues ?



**Figure 7** Schéma résumant les principaux objectifs du WP3

En termes de « **livrables** » de WP3, on proposera :

- Une synthèse des services écosystémiques marchands / non marchands associés au Léman (lien avec WP2) ;
- L'analyse de l'enquête réalisée auprès d'un panel représentatif de la population sur la perception des blooms ;

- La liste de scénarii pour la gestion future des proliférations algales (lien avec WP4) ;
- Les résultats de l'enquête sur le consentement à payer de la population en fonction des scénarii de gestion.

## **WP4 : Gestion et gouvernance**

Responsables : Géraldine Pflieger & Thomas Bolognesi

Le WP4 *Gestion et Gouvernance* du projet *ALGA* vise à identifier et caractériser les centres et instruments de gouvernance relatifs à la prolifération d'algues et de cyanobactéries dans le Léman. Ce faisant, le WP4 permet d'assister la prise de décision en mettant en lumière les lacunes de la gouvernance tout comme ses leviers dans une perspective de coopération, complémentarité et désajustements entre les centres et instruments de la gouvernance. Ainsi, le WP4 montre les leviers a priori efficaces selon la structure actuelle de gouvernance et ceux à développer pour favoriser la coordination dans le futur.

La gouvernance est une structure polycentrique, c'est à dire qu'elle se compose de différents centres de décisions interdépendants mais plus ou moins autonomes et coordonnés entre eux (Carlisle and Gruby 2019; Ostrom 2010). L'étude des configurations de cette structure polycentrique est un important enjeu scientifique et sociétal qui pose la question de la façon dont nous nous organisons pour répondre à des problèmes collectifs et pour quels résultats (Berardo & Lubell 2016, Heikkila *et al.* 2018). Au cœur de cette approche se trouve l'appréciation du degré de cohérence d'ensemble d'initiatives de coordination indépendantes. Ce prisme se révèle particulièrement pertinent pour traiter la capacité de réponse à des problèmes émergents, en l'occurrence la prolifération d'algues et de cyanobactéries dans le Léman.

Le WP4 propose, pour la gouvernance de la prolifération des algues et cyanobactéries : 1/ une cartographie des acteurs impliqués dans la gestion du lac, 2/ une cartographie des acteurs impliqués dans la gestion des drivers physico-chimiques de la prolifération des algues, 3/ l'identification des principales bases légales et instruments politiques et 4/ des mesures des relations entre ces composantes.

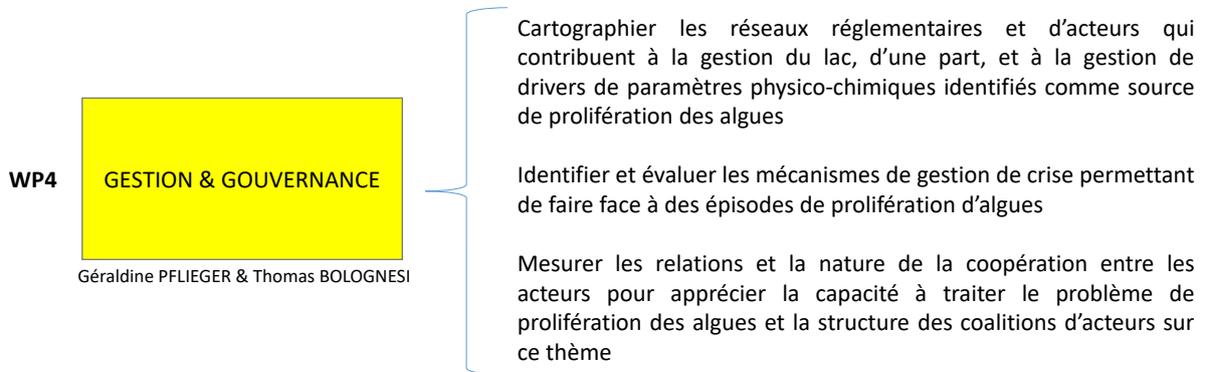
La collecte de données sera faite via 1) dix entretiens avec des acteurs structurants, 2) un sondage en ligne et 3) une analyse des bases légales en France et en Suisse. Les entretiens préliminaires visent à identifier les acteurs partie-prenantes de la gouvernance selon l'approche par « boule de neige » ainsi que les bases légales pertinentes. Le sondage en ligne consiste à demander aux acteurs identifiés à l'issue de la phase d'entretiens avec qui ils collaborent dans la gestion du lac, et avec quels objectifs principaux. L'analyse des bases légales permet de compléter l'inventaire réglementaire initié lors des entretiens.

Les données collectées seront analysées avec des 1) analyses de réseaux pour produire les cartographies, mesures relationnelles et identifier d'éventuelles coalitions d'acteurs relations (Ingold 2011), 2) de l'économétrie pour renforcer l'étude des facteurs structurants des réseaux identifiés (Cranmer *et al.* 2017, D'Agostino & Scala 2014) et 3) une analyse interprétative afin de contextualiser et évaluer les configurations de gouvernance mise en avant selon les approches quantitatives (Ostrom & Basurto 2011). En particulier, nous remobiliserons une méthode développée par des membres de consortium dans le cadre de l'étude de la gouvernance des usages de l'eau dans le Canton de Genève (Bolognesi & Pflieger 2022). Cette méthode permet de mettre en commun les données sur les configurations d'acteurs, de bases légales et les ressources politiques.

Le WP4 s'inscrit dans la suite du périmètre pertinent défini par les WP1 et WP2 portant sur le déterminisme et les impacts sur la qualité des eaux et services écosystémiques. Les principaux résultats de ces WPs serviront au design des grilles d'entretiens et à la définition du problème d'action collective. Egalement, des liens forts seront créés avec le développement du WP3. Les perceptions sont essentielles à chaque processus de

gouvernance, par exemple parce qu'elles impactent le choix d'instruments politiques et la construction des coalitions (Hill & Varone 2017, Weible *et al.* 2012). Nous pourrions notamment mettre en commun les analyses relationnelles (WP4) et cognitive (WP3) pour identifier les lacunes et leviers de la gouvernance en place.

Les principaux objectifs du WP4 (**Figure 8**) peuvent donc être résumés comme suit :



**Figure 8** Schéma résumant les principaux objectifs du WP4

En termes de « **livrables** », on proposera :

- 1) Une cartographie des acteurs impliqués dans la gestion du lac (par le biais d'entretiens avec des acteurs structurants) montrant les relations et responsabilités des principaux acteurs de la gouvernance. Cette cartographie est le pendant « acteurs » des livrables 4 et 5 du WP2 produisant des informations et outils d'aide à la décision.
- 2) Une cartographie des acteurs impliqués dans la gestion des « drivers » physico-chimiques de la prolifération des algues (via un sondage en ligne). Cette cartographie est le pendant « acteurs » des livrables 4 et 5 du WP2 produisant des informations et outils d'aide à la décision.
- 3) L'identification des principales bases légales et instruments politiques (en France et en Suisse) sous forme d'une liste avec leurs attributs (niveau administratifs, usages régulés, références entre les règles) permettant de mettre en avant les leviers de gouvernance à activer pour traiter les impacts (WP2 livrable 2) et agir sur les perceptions (WP3).
- 4) La mesure des relations entre ces composantes. Les trois livrables précédents s'appuient sur des données relationnelles. Nous pourrions les structurer sous forme de réseau d'interdépendances. Les mesures caractérisant ce réseau permettent d'appréhender le système de gouvernance, visuellement et en termes de chaîne de causalité et diffusion d'effet. Comparer aux mesures de perceptions (WP3) et du fonctionnement écologique (WP1), ces données permettent d'appréhender les forces et faiblesses du réseau de gouvernance en termes de correspondance aux réalités écologiques et préférences.

## Références Citées

- Anneville O., Molinero J.C., Souissi S., Balvay G., Gerdeaux D. (2007) Long-term changes in the copepod community of Lake Geneva. *Journal of Plankton Research* 29, i49-i59.
- Anneville O., Domaizon I., Kerimoglu O., Rimet F., Jacquet S. (2015) Blue-green algae in a greenhouse century? New insights from field data on climate change impacts on cyanobacteria abundance. *Ecosystems* 18, 441-458.
- Anneville O., Chang C.W., Dur G., Souissi S., Rimet F., Hsieh C.H. (2019) The paradox of re-oligotrophication: the role of bottom-up versus top-down controls on the phytoplankton community. *Oikos* 128, 1666-1677.
- Baulaz, Y. (2020) Évolution des socio-écosystèmes des grands lacs alpins et leurs services écosystémiques à l'épreuve des pollutions. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble.
- Benayache, N., Nguyen-Quang T., Hushchyna K., McLellan K., Afri-Mehennaoui F.Z., Bouaïcha N. (2019) An overview of cyanobacteria harmful algal bloom (CyanoHAB). *Issues in Freshwater Ecosystems* 10.5772/intechopen.84155.
- Berardo, R., Lubell M. (2016) Understanding what shapes a polycentric governance system. *Public Administration Review* 76(5), 738–51.
- Bolognesi, T., Pflieger G. (2022) Organisation et cohérence de la politique de l'eau dans le Canton de Genève: Analyse des perceptions, financements et réglementations. Université de Genève. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:160834>.
- Brenda, Y.H., Xuemei Z., Harvey A.R., Lingeng L. et al. (2022) Oral cyanobacteria and hepatocellular carcinoma. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 31(1), 221–229.
- Brooks, B.W., Lazorchak J.M., Howard M.D., Johnson M.V.V., Morton S.L., Perkins D.A., Reavie E.D., Scott G.I., Smith S.A. and Steevens J.A. (2016) Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems? *Environmental toxicology and chemistry* 35(1), 6-13.
- Burkholder, J.M., Shumway S.E., Glibert P.M. (2018) Food web and ecosystem impacts of harmful algae. In S.E. Shumway, J.M. Burkholder, S.L. Morton (Eds.), *Harmful Algal Blooms: a Compendium Desk Reference*, John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, New Jersey (2018), pp. 243-301.
- Carlisle, K., Rebecca L. (2019) Polycentric systems of governance: A theoretical model for the commons. *Policy Studies Journal* 47(4), 927–52.
- Carmichael, W.W. (2001) Health effects of toxin-producing cyanobacteria: The CyanoHABs". *Human and ecological risk assessment: An International Journal* 7(5), 1393-1407.
- Cotte, G., Vennemann T.W. (2020) Mixing of Rhône River water in Lake Geneva: Seasonal tracing using stable isotope composition of water. *Journal of Great Lakes Research* 46(4), 839-849.
- Cottet M., Piégay H., Bornette G. (2013) Does human perception of wetland aesthetics and health relate to ecological functioning? *Journal of environmental management* 128, 1012-1022.
- Cranmer, S.J., Leifeld P., McClurg S.D., Rolfe M. (2017) Navigating the range of statistical tools for inferential network analysis. *American Journal of Political Science* 61(1), 237–51.

- D'Agostino, G., Scala A. (2014) *Networks of Networks: The Last Frontier of Complexity*. Springer.
- De Groot, R., Brander L., Van der Ploeg S., Costanza R. et al. (2012) Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services* 1. 50-61. 10.1016/j.ecoser.2012.07.005.
- Derot, J., Yajima H., Jacquet S. (2020) Advances in forecasting harmful algal blooms using machine-learning models: A case study with *Planktothrix rubescens* in Lake Geneva. *Harmful Algae* 99, 101906.
- Desgué-Itier, O., Vieira Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P.A., Domaizon, I., Guillard, J., Mazure, T., Sharaf, N., Soullignac, F., Tran-Khac, V., Vinçon-Leite, B., Jenny, J.-P. (2023). Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 27, 837-859.
- Di Baldassarre, G., Sivapalan, M., Rusca, M., Cudennec, C., Garcia, M. et al. (2019) Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals. *Water Resources Research* 55(8), 6327-6355.
- Doelker, J.E. (2022). Assessing impacts of changes in the trophic state and cyanobacteria blooms on a local economy: Western Lake Erie as a case study. Master thesis Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, nr 476.
- Dolah, F.M.V., Roelke D. Greene R.M. (2001) Health and ecological impacts of harmful algal blooms: risk assessment needs. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 7(5), 1329-1345.
- Dodds, W.K., Bouska W.W., Eitzmann J.L., Pilger T.J., Pitts K.L., Riley A.J., Schloesser J.T., Thornbrugh D.J. (2009) Eutrophication of U.S. freshwaters: analysis of potential economic damages. *Environ Sci Technol.* 43(1):12-9.
- Ezzedine, J.E, Jacquet S. (unpublished data) Picocyanobacteria in lakes: a multi-proxy functional indicator?
- Feuillade, J. (1994) The cyanobacterium (blue-green alga) *Oscillatoria rubescens* D.C. *Arch. Hydrobiol.* 41, 77-93.
- Fronzel, M., Simora M., Sommer S. (2017) Risk perception of climate change: Empirical evidence for Germany. *Ecological Economics* 137, 173-183.
- Gallina N., Beniston M., Jacquet S. (2017) Estimating future cyanobacterial occurrence and importance in lakes: a case study with *Planktothrix rubescens* in Lake Geneva. *Aquatic Sciences* 79, 249–263
- Glaus, A., Mosimann M., Röthlisberger V. et al. (2020) How flood risks shape policies: flood exposure and risk perception in Swiss municipalities. *Reg Environ Change* 20, 120.
- Gobler, C.J. (2020) Climate change and harmful algal blooms: Insights and perspective. *Harmful Algae* 91, 101731.
- Grattan, L.M., Holobaugh S., Morris Jr J.G. (2016) Harmful algal blooms and public health. *Harmful algae* 57, 2-8.
- Haltiner, L., Zhang H., Anneville O., De Ventura L., et al. (2022) The distribution and spread of quagga mussels in perialpine lakes north of the Alps. *Aquatic Invasions* 17(2), 153–173.

- Havens, K.E. (2008) Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. In Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs (pp. 733-747). Springer, New York, NY.
- Heikkila, T., Villamayor-Tomas S., Garrick D. (2018) Bringing polycentric systems into focus for environmental governance. *Environmental Policy and Governance* 28(4), 207–318.
- Heikkila, T. (2017). Evidence for tackling the complexities of water governance. *Public Administration Review* 77(1), 17–20.
- Hernandez, D., da Costa P. (2022) The economic value of ecosystem conservation: A discrete-choice experiment at the Taravo Wild River in Corsica, France. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*
- Hill, M., Varone F. (2017) *The Public Policy Process*. 7th ed. London.
- Huisman, J., Matthijs H.C.P., Visser P.M. (2005) Harmful Cyanobacteria. *Aquatic Ecology Series book*.
- Huisman, J., Codd G.A., Pearl H.W., Ibelings B.W. et al. (2018) Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology* 16(8), 471-483.
- Hunter, P.D., Hanle, N., Czajkowski M., Mearns K. et al. (2012) The effect of risk perception on public preferences and willingness to pay for reductions in the health risks posed by toxic cyanobacterial blooms. *Science of the Total Environment* 426, 32-44.
- Ibelings BW, Chorus I. (2007) Accumulation of cyanobacterial toxins in freshwater "seafood" and its consequences for public health: a review. *Environ Pollut* 150(1), 177-92.
- Ibelings, B.W., Gsell A.S., Mooij W.M., Van Donk E., Van den Wyngaert S., de Senerpont Domis L.N. (2011) Chytrid infections of diatom spring blooms: paradoxical effects of climate warming on epidemics in lakes. *Freshwater Biology* 56, 754e766.
- Ibelings, B., Kurmayer R., Azevedo S., Wood S., Chorus I., Welker M. (2021a) Understanding the occurrence of cyanobacteria and cyanotoxins. In: Chorus I. & Welker M. (eds). *Toxic Cyanobacteria in Water*. CRC Press on behalf of World Health Organisation, Geneva, Switzerland, pp. 213–294.
- Ibelings, B.W., Chorus I. (2021). Cyanobacterial toxins, exposure through food. In: Toxic Cyanobacteria I Water, World Health Organization, Chorus I, Welker M (eds). CRC Press, ISBN 9780367533311. <https://www.routledge.com/Toxic-Cyanobacteria-in-Water-A-Guide-to-Their-Public-Health-Consequences/Chorus-Welker/p/book/9780367533311>.
- IPBES (2008) Report of the adhoc intergovernmental and multi-stakeholder meeting on an intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. UNEP 1 (6).
- Ingold, K. (2011) Network structures within policy processes: Coalitions, power, and brokerage in Swiss climate policy. *Policy Studies Journal* 39(3), 435–59.
- Jacquet, S., Briand J.F, Leboulanger C. Avois-Jacquet, C. et al. (2005) The proliferation of the toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens* following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget). *Harmful Algae* 4, 651-672.
- Jacquet, S. (2021) Etude relative aux picocyanobactéries. Rapport CIPEL pour la campagne 2020, pp 76-84.
- Jenny J.-P., Anneville O., Arnaud F., Baulaz Y. et al. (2020) Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *Journal of Great Lakes Research* 46, 686-702.

- Kakouei K., Kraemer B.M., Anneville O., Carvalho L., et al. (2021) Phytoplankton and cyanobacteria abundances in mid-21st century lakes depend strongly on future land use and climate projections. *Global Change Biology* 27(24), 6409-6422
- Krishna S., Ulloa H. N., Kerimoglu O., Minaudo C., Anneville O., Wüest A. (2021) Model-based data analysis of the effect of winter mixing on primary production in a lake under reoligotrophication. *Ecological Modelling* 440, 109401.
- Lapointe, B.E., Burkholder, J.M., Van Alstyne, K.L. (2018) Harmful macroalgal blooms in a changing world: Causes, impacts, and management. S.E. Shumway, J.M. Burkholder, S.L. Morton (Eds.), *Harmful Algal Blooms: a Compendium Desk Reference*, John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, New Jersey (2018), pp. 515-542.
- Livingstone, D.M. (1997) An example of the simultaneous occurrence of climate-driven "sawtooth" deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. *SIL Proceedings* 1922-2010, 26:822-828.
- Lüring, M., Mello, M.M.E., van, Oosterhout F., de Senerpont Domis L., Marinho M.M. (2018) Response of natural cyanobacteria and algae assemblages to a nutrient pulse and elevated temperature. *Frontiers in Microbiology* 13(9):1851.
- Mathias, J.D., Anderies J.M., Baggio J., Hodbod J. (2020) Exploring non-linear transition pathways in social-ecological systems. *Scientific Report* 10:4136.
- Medlin, L., 2013. Molecular tools for monitoring harmful algal blooms. *Environmental science and pollution research international* 20, 6683-6685.
- Mesman, J.P., Ayala A.I., Goyette S., Kasparian J. et al. (2022), Drivers of phytoplankton responses to summer wind events in a stratified lake: A modeling study. *Limnology and Oceanography* 67, 856-873.
- Mrdjen, I., Lee J., Weghorst C.M., Knobloch T.J. (2022) Impact of cyanotoxin ingestion on liver cancer development using an at-risk two-staged model of mouse hepatocarcinogenesis. *Toxins* 14, 484.
- Moiron, M., Girel C., Rimet F., Jacquet S. (2021) Die hard in Lake Bourget! The case of *Planktothrix rubescens* reborn. *International Journal of Limnology* 57, 19.
- Moss, B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R.W. et al. (2011). Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1, 101-105.
- Noges et al. 2018 Nöges T., Anneville O., Guillard J., Haberman J., Järvalt A., Manca M., Morabito G., Rogora M., Thackeray S.J., Volta P., Winfield J., Nöges P. (2018). Fisheries impacts on lake ecosystem structure in the context of a changing climate and trophic state. *Journal of Limnology*, 77(1):46-61.
- Nohrstedt, D., Mazzoleni M., Parker C., Di Baldassarre G. (2021) Exposure to natural hazard events unassociated with policy change for improved disaster risk reduction. *Nature Communications* 12, 10.1038/s41467-020-20435-2.
- Nordhaus, W.D. (2007) A Review of the stern review on the economics of climate Change. *Journal of Economic Literature* 45:686–702.
- Ostrom, E. (2010) Polycentric Systems for Coping with Collective Action and Global Environmental Change'. *Global Environmental Change* 20(4):550–57.
- Ostrom, E., Basurto X. (2011) Crafting analytical tools to study institutional change. *Journal of Institutional Economics* 7(3):317–43.
- Paerl HW, Huisman J. (2008) Climate. Blooms like it hot. *Science* 4, 320(5872):57-8.
- Parvathi, A., Zhong X., Jacquet S. (2012) Dynamics of various viral groups infecting autotrophic plankton in Lake Geneva. *Advances in Limnology and Oceanography* 3:171-191.

- Perga, M.E., Maberly S.C., Jenny J.P., Alric B., Pignol C., Naffrechoux E. 2016. A century of human-driven changes in the carbon dioxide concentration of lakes. *Global Biogeochemical Cycles* 30 (2), 93-104.
- Personnic, S., Domaizon I., Sime-Ngando T., Jacquet S. (2009) Seasonal variations of microbial abundances and of virus- vs. flagellate-induced mortality of picoplankton in some peri-alpine lakes. *J. Plank. Res.* 31:1161-117.
- Personnic, S., Domaizon I., Dorigo U., Berdjeb L., Jacquet S. (2009) Seasonal and spatial variability of virio, bacterio- and picophytoplanktonic abundances in three peri-alpine lakes. *Hydrobiol.* 627:99-111.
- Posch T., Köster O., Salcher M.M., Pernthaler J. (2012) Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming. *Nature Climate Change* 2(11):809–813.
- Quiblier, C., Wood S., W, Echenique-Subiabre I., Heath M. et al. (2013). A review of current knowledge on toxic benthic freshwater cyanobacteria--ecology, toxin production and risk management. *Water Research* 47(15):5464-79.
- Redman, C., Grove M., Kuby L. (2004) Integrating social science into the Long-Term Ecological Research (LTER) network: Social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems* 7, 161-171.
- Reiss, R.S., Lemmin U., Cimatoribus A.A., Barry D.A. (2020) Wintertime coastal upwelling in Lake Geneva: An efficient transport process for deepwater renewal in a large, deep lake. *Journal of Geophysical Research Ocean* 125(8), e2020JC016095.
- Rimet, F., Anneville O., Barbet D., Chardon C. et al. (2020) The Observatory on LAkes (OLA) database: Sixty years of environmental data accessible to the public. *Journal of Limnology* 79, 10.4081.
- Ruckelshaus, M., McKenzie E., Tallis H., Guerry A., et al. (2015) Notes from the field: Lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions. *Ecological Economics* 115, 11-21.
- Salmaso N., Anneville O., Straile D., Viaroli P. (2018) European large perialpine lakes under anthropogenic pressures and climate change: present status, research gaps and future challenges. *Hydrobiologia* 824, 1–32.
- Sarker, A., Blomquist W. (2019) Addressing misperceptions of governing the commons. *Journal of Institutional Economics* 15(2), 281-301.
- Soullignac F., Anneville O., Bouffard D., Chanudet V., et al. (2019). Contribution of 3D coupled hydrodynamic-ecological modeling to assess the representativeness of a sampling protocol for lake water quality assessment. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems* 420, 42.
- Tapolczai, K., Anneville O., Padisak J., Salmaso N. et al. (2014) Occurrence and mass development of *Mougeotia* spp. (Zygnemataceae) in large, deep lakes. *Hydrobiologia* 745, 17–29.
- TEEB, 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations. Pushpam Kumar. Earthscan, London and Washington.
- Van der Ploeg, S., De Groot R.S., Wang Y. (2010) The TEEB Valuation Database: overview of structure, data and results. *Wageningen, the Netherlands. Foundation for Sustainable Development.*
- Vonlanthen, P., Bittner D., Hudson A.G., Young K.A., Müller R., Lundsgaard-Hansen B. et al. (2012) Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. *Nature* 482:357–362.
- Walsby, A.E., Schanz F., Schmid M. (2006) The Burgundy-blood phenomenon: a model of buoyancy change explains autumnal water blooms by *Planktothrix rubescens* in Lake Zürich. *New Phytologist* 169:109–122.

Weible C.M., Heikkila T., deLeon P., Sabatier P.A. (2012) Understanding and influencing the policy process. *Policy Sciences* 45(1), 1–21.

Wheeler, S.A., Nauges C., Zuo A. (2021) How stable are Australian farmers' climate change risk perceptions? New evidence of the feedback loop between risk perceptions and behaviour. *Global Environmental Change* 68, 102274.

Whitton, B.A., Potts M. (2002) The Ecology of cyanobacteria: Their diversity in time and space. *Springer book*.

## Calendrier des taches

### WP1

Tache / Action	A1 T1	A1 T2	A1 T3	A1 T4	A2 T1	A2 T2	A2 T3	A2 T4	A3 T1	A3 T2	A3 T3	A3 T4
Acquisition données du bassin versant	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acquisition données environnementales de Lexplore	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Acquisition données algales de Lexplore	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Compilation des données satellites pour validation du modèle 3D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Familiarisation et mise à jour du modèle 3D Model de Soullignac et al. et validation de la nouvelle version			X	X	X	X	X	X	X	X		
Monitoring des algues benthiques		X	X	X		X	X	X				
Mesures de cyanotoxines	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Echantillons et analyses ADN Cyanos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Reporting, intermédiaire et final				X				X				X
Informations aux vétérinaires									X			

### WP2

Tache / Action	A1 T1	A1 T2	A1 T3	A1 T4	A2 T1	A2 T2	A2 T3	A2 T4	A3 T1	A3 T2	A3 T3	A3 T4
Revue systématique et Synthèse sur le lien entre caractéristiques des blooms et leur impact sur les services écosystémiques	X	X	X									
Synthèse sur l'identification			X	X	X							

<i>d'indicateur de qualité de services écosystémiques</i>													
<i>Analyse rétrospective des blooms dans le Léman et leurs impacts sur les indicateurs de qualité des services écosystémiques</i>					X	X	X						
<i>Test de scénarii pour évaluer l'impact des blooms, en fonction de leurs caractéristiques, sur les indicateurs de qualité des services écosystémiques. Elaboration du modèle prédictif des atteintes aux usages.</i>										X	X	X	
<i>Transfert des connaissances et mise à disposition du modèle prédictif des atteintes aux usages et du diagramme de décision à la CIPEL pour le suivi des blooms</i>												X	X
<i>Reporting, intermédiaire et final</i>				X				X					X

### WP3

<b>Tache / Action</b>	A1 T1	A1 T2	A1 T3	A1 T4	A2 T1	A2 T2	A2 T3	A2 T4	A3 T1	A3 T2	A3 T3	A3 T4
<i>Identification des principaux services écosystémiques du Léman</i>	X	X										
<i>Identification des acteurs en lien avec ces services</i>	X	X										
<i>Conception de l'enquête</i>			X									
<i>Réalisation de l'enquête</i>				X	X	X						

<i>Analyses préliminaires</i>						X	X					
<i>Analyse socio-économique</i>								X	X	X	X	X
<i>Reporting intermédiaire et final</i>				X				X				X

**WP4**

<b>Tache / Action</b>	A1 T1	A1 T2	A1 T3	A1 T4	A2 T1	A2 T2	A2 T3	A2 T4	A3 T1	A3 T2	A3 T3	A3 T4
<i>Analyse de la gouvernance et de la gestion des risques liés à la qualité de l'eau du Léman (entretiens, sondage, analyse des bases légales)</i>			X	X	X							
<i>Evaluation du potentiel et des lacunes en termes de gouvernance des risques</i>						X	X					
<i>Proposition de différents outils et scénarios de collecte de l'information, de gestion des risques et de gestion des crises</i>								X	X	X		
<i>Reporting intermédiaire et final</i>				X				X				X

## **Annexe 1 - informations générales sur les cyanobactéries et les algues d'intérêt primaire**

*Planktothrix rubescens*. Bien que *P. rubescens* soit l'espèce d'organisme nuisible la mieux connue dans ce projet, des études récentes obtenues sur cette espèce dans d'autres lacs suisses indiquent des lacunes de connaissances importantes. Suarez *et al.* (2023), en étudiant les changements à long terme dans le lac Hallwil, ont ainsi démontré que la profondeur de la biomasse maximale de *P. rubescens* s'est approfondie en moyenne de 35 cm par an entre 1998 et 2020. La cyanobactérie toxique se développe maintenant à environ 2-3 m sous la couche inférieure du métalimnion, où elle a un accès direct aux nutriments qui sont élevés dans l'hypolimnion de ce lac. Avec le refroidissement automnal et le mélange des eaux, l'efflorescence importante qui se produit dans le proche hypolimnion est alors transportée à la surface, et s'accompagne d'une coloration rouge et des concentrations en toxines potentiellement dangereuses à la surface du lac et le long du rivage. L'étude de l'hypolimnion du Léman a été largement négligée dans cette perspective, alors que cette couche d'eau pourrait donc être un fort enjeu à l'avenir pour les proliférations algales. Avec la ré-oligotrophisation en cours, la profondeur euphotique s'accroît et favorise des espèces dont le cortège pigmentaire permet d'utiliser des longueurs d'onde vertes et de faibles intensités lumineuses en profondeur. C'est typiquement le cas de *P. rubescens*. De plus, avec une stratification plus forte et plus longue, l'hypolimnion va devenir de plus en plus une zone où les nutriments restent disponibles tout au long de la saison de croissance. L'emplacement exact et l'étendue du développement de *P. rubescens*, en réponse aux gradients environnementaux de température, de lumière et de phosphore, doivent donc être étudiés plus en détail. Pour cela, LÉXPLORE avec ses instruments de profilage de profondeur offre une opportunité intéressante.

*Cyanobium-Synechococcus*. Une analyse génétique réalisée par l'EPFL à partir de la plateforme LÉXPLORE (Carratala *et al.* en préparation) sur les gènes ARN 16S a montré un schéma de succession clair dans l'apparition des cyanobactéries dans le Léman. Alors que *P. rubescens* est en effet la cyanobactérie dominante en hiver, son abondance chute au printemps, et c'est le cluster des picocyanobactéries qui prend le relais en été. Ce résultat relatif à l'importance quantitative estivale de ces picocyanobactéries a été décrit (Personnic *et al.* 2009, Jacquet 2021) mais la nouveauté réside dans la détection de gènes codant pour la microcystine (toxine hépatique typique des cyanobactéries), en particulier le gène *mcyA*. Ce dernier a été mesuré tout au long de l'année, tandis que la microcystine elle-même a culminé à la fin de l'été (avec à ce jour des concentrations en dessous des valeurs recommandées par l'OMS). Un enjeu fort concerne ce type d'espèce car avec le réchauffement climatique et la ré-oligotrophisation du Léman, l'importance de ce groupe de cyanobactéries pourrait croître à l'avenir (Ezzedine & Jacquet soumis). Une confirmation est aussi apportée par l'analyse en cytométrie en flux en continu grâce au Cytobuoy de la plateforme LÉXPLORE qui révèle des cellules et colonies de type *Cyanobium-Synechococcus* dominant le phytoplancton pendant l'été (Thomas *et al.* en préparation). Nous avons donc une cyanobactérie toxigénique encore non identifiée qui semble dominer la communauté cyanobactérienne en été, pendant la période de pointe de l'utilisation récréative du lac, et dont nous ne savons encore quasiment rien. Contrairement à *P. rubescens*, le cluster *Cyanobium-Synechococcus* se trouve dans la partie supérieure du lac, l'épilimnion où se déroulent les loisirs. Une meilleure compréhension de l'abondance (nombre de cellules et biovolume via le CytoBuoy et la cytométrie en flux au CARTELE) dans le temps et l'espace (via l'imagerie satellitaire, e.g. Sentinel 2) est désormais

nécessaire et ce sur toute l'année. D'autres études sur les toxines produites – types et concentrations – seraient également nécessaires comme base d'évaluation des risques en été.

*Uroglena* (un modèle de mixotrophie). Au cours de l'été 2021 (juillet et août), le Léman a reçu de très importants apports terrigènes en lien avec de fortes précipitations estivales. La matière organique, en particulier le carbone, provenant du bassin versant a donc « alimenté » la zone côtière du lac. Cet apport de matière organique a très probablement contribué au développement de bactéries hétérotrophes rendant la matière organique plus labile et disponible, et aidant à la régénération des nutriments. Début septembre, un fort ensoleillement, des températures chaudes, des eaux calmes se sont ajoutées à des conditions favorables au développement d'espèces mixotrophes (qui associent photosynthèse et possibilité de se nourrir de bactéries). *Uroglena* sp semble avoir été le taxon qui a le plus bénéficié de ces conditions spécifiques, expliquant le succès de son efflorescence pendant plusieurs jours (*Rahaghi et al.* en préparation). Ce scénario mériterait d'être étudié plus en détail, car il est désormais clairement admis que ce type d'événement est susceptible de se reproduire à l'avenir en lien avec l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes. De plus, l'épisode de l'été 2021 nous a rappelé s'il le fallait à quel point le fonctionnement du lac dépend fortement de son bassin versant. Il existe des liens étroits entre les zones littorales et pélagiques, de sorte que la mise en place d'un suivi scientifique de la zone littorale, qui fait aujourd'hui défaut, serait certainement pertinente. Cela est vrai pour les risques liés à *Uroglena* sp mais aussi pour les tapis de cyanobactéries benthiques (voir ci-dessous).

*Mougeotia*. Cette algue filamenteuse non toxique est une Zygothryxales pouvant créer des problèmes importants pour les pêcheurs professionnels, en raison de sa capacité à proliférer en profondeur, comme *P. rubescens*, et à obstruer et/ou rendre visibles les filets de pêche. Elle s'est développée ces dernières années de manière assez inattendue en réponse à la ré-oligotrophisation du lac. En effet, cette espèce se développe généralement sous des niveaux de phosphore compris entre 5 et 15  $\mu\text{g L}^{-1}$ , tandis que sa dynamique saisonnière est fortement influencée par la stratification des eaux. Ce taxon filamenteux, résistant à la sédimentation, risque clairement d'être « sélectionné » de manière compétitive par rapport aux autres algues dans un lac devenant de plus en plus stable (Tapolczai *et al.* 2013). Si les concentrations en phosphore ne tombent pas en dessous de 5  $\mu\text{g L}^{-1}$  dans la couche située entre 0 à 20 m et si le temps chaud et les conditions hydrologiques stables se produisent plus fréquemment dans les années à venir (ce qui est attendu), des proliférations dans le lac réapparaîtront. Comme pour son concurrent *P. rubescens*, une étude plus approfondie est aujourd'hui requise.

*Cyanobactéries benthiques*. Les risques liés aux tapis de cyanobactéries benthiques dans notre région sont devenus évidents avec la mort de plusieurs chiens dans le lac de Neuchâtel en août 2020 (<https://www.24heures.ch/les-cyanobacteries-mettent-elles-la-baignade-en-peril-857270723488> ; Le 24 heures 05 August 2020, Les baigneurs doivent ils craindre les algues bleues?). Les cyanobactéries benthiques restent sous-étudiées par rapport aux espèces pélagiques. Plus globalement, les études sur le développement des tapis sont fragmentées, incomplètes et généralement uniquement liées à des accidents visuels et dramatiques, i.e. la mort d'animaux domestiques (Quiblier *et al.* 2013). Dans le Léman, nous n'avons pratiquement aucune connaissance sur la présence de tapis de cyanobactéries productrices de toxines. Pour la surveillance efficace de ces cyanobactéries benthiques, l'utilisation de la benthotorche Moldaenke sera privilégiée, ainsi que l'application de capteurs

hyperspectraux sur des drones aériens et l'analyse génétique sur les espèces et gènes producteurs de toxines. Une campagne de sensibilisation sur la possibilité d'intoxications canines pourrait être proposée auprès des vétérinaires de la région, et en cas d'intoxication, sur les conditions de ces événements.