

BLOOMS DE MOUGEOTIA DANS LE LEMAN : FACTEURS DECLENCHANTS ET COMPARAISONS AVEC D'AUTRES GRANDS LACS

MOUGEOTIA BLOOMS IN LAKE GENEVA

CAMPAGNE 2013

PAR

**Kalman TAPOLCZAI, Orlane ANNEVILLE, Remy TADONLEKE et Frédéric RIMET
Avec la collaboration de Nico Salmaso, Giuseppe Morabito et Tamar Zohary**

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (INRA), BP 511, F - 74203 THONON LES BAINS CEDEX

RÉSUMÉ

Depuis le début des années 2000, des blooms d'une microalgue surviennent régulièrement dans le Léman. Il s'agit d'une algue filamenteuse, Mougeotia sp. (Zygophycées). Cette algue non toxique, crée des problèmes pour les pêcheurs professionnels et est une réponse inattendue par rapport à la ré-oligotrophisation du Léman. Pour expliquer ce phénomène, nous avons utilisé les données du monitoring du Léman et les avons comparées à celles de lacs où des blooms similaires surviennent : le lac Kinneret (Israël) et les lacs de Garde et Majeur (Italie).

En raison de la complexité taxonomique de ce genre, les taxons présents dans ces lacs n'ont pu être déterminés de façon précise. Par contre, il apparaît que Mougeotia sp. a des écologies similaires dans tous ces lacs. En effet, la dynamique inter-annuelle de ce taxon est liée aux teneurs en phosphore qui doivent être comprises entre 5 et 15 µg/l (moyenne annuelle dans la couche 0-20 m). Ensuite, sa dynamique saisonnière est fortement influencée par la stratification des eaux. Ce taxon filamenteux qui résiste bien à la sédimentation, trouve ses avantages compétitifs par rapport aux autres algues quand le milieu est bien stratifié. Selon les lacs, la stratification apparaît plus ou moins tôt dans l'année : ceci explique pourquoi Mougeotia sp. apparaît à des saisons différentes suivant le lac considéré. Enfin, Mougeotia sp. dispose de chloroplastes lamellaires qui peuvent s'orienter pour présenter la plus grande surface par rapport aux rayons lumineux ; ceci lui permet de vivre dans des conditions de faible luminosité. Il trouve donc sa niche écologique dans des profondeurs d'une dizaine de mètres.

Enfin, nous avons cherché la combinaison de circonstances favorisant les blooms. En premier lieu, le lac doit être dans un état oligo-mésotrophe. Ensuite, la zone euphotique doit s'étendre jusqu'à une dizaine de mètres et correspondre à la profondeur de l'épilimnion. La masse d'eau doit être fortement stratifiée jusqu'à 10 mètres, profondeur à laquelle Mougeotia sp. se développe, par ailleurs les analyses montrent que la vitesse des vents en juin et l'inoculum en Mougeotia sont également des paramètres qui influencent la formation des blooms.

Si les concentrations en phosphore ne descendent pas en dessous de 5 µg/L dans la zone 0-20 m et si les conditions météorologiques et hydrologiques données ci-dessus surviennent à nouveau dans les prochaines années, des blooms dans le Léman pourraient à nouveau apparaître.

SUMMARY

Since the early 2000s, microalgae blooms occur regularly in Lake Geneva. This non-toxic, filamentous alga, *Mougeotia* sp. (Zygothryxaceae) creates problems for professional fishermen and is an unexpected response in relation to the re-oligotrophication of Lake Geneva. To explain this phenomenon, we used monitoring data from Lake Geneva and compared them to lakes where similar blooms occur: Lake Kinneret (Israel) and Lake Garda and Maggiore (Italy).

Because of the taxonomic complexity of this kind, taxa present in these lakes were not determined accurately. However, it appeared that *Mougeotia* sp. had similar ecologies in all these lakes. Indeed, the inter-annual dynamics of the taxon was related to phosphorus levels, which must be between 5 and 15 g / l (in the annual mean in the 0-20 m layer). Its seasonal dynamics are strongly influenced by layering: this filamentous taxon, resistant to sedimentation, finds competitive advantages over other algae when the medium is stratified. According to the lake, stratification appeared earlier or later in the year, explaining why *Mougeotia* sp. appeared in different seasons depending on the lake in question. Finally, *Mougeotia* sp. has lamellar chloroplasts that can move to present the largest surface area in relation to the light rays; this allows it to survive in low-light conditions. Therefore, it finds its ecological niche at a depth of 10 metres.

Finally, we searched for the combination of circumstances favouring blooms. First, the lake must be oligo-mesotrophic. Secondly, the photic layer must extend to 10 metres and match the depth of the epilimnion. The water mass must be highly stratified up to 10 metres, which is the depth at which *Mougeotia* sp. develops; however, analyses show that wind speed in June and the inoculum in *Mougeotia* are also parameters that influence the formation of blooms.

If phosphorus concentrations do not fall below 5 mg / L in the 0-20 m layer and if the weather and hydrological conditions cited above occur again in the coming years, blooms in Lake Geneva could reappear.

1. INTRODUCTION

Les blooms (ou fleurs d'eau) de microalgues sont bien étudiés surtout lorsqu'ils concernent les cyanobactéries puisque celles-ci présentent un risque pour la santé humaine (Havens 2008). Leur présence est souvent liée à des phénomènes d'eutrophisation. À côté des Cyanobactéries, d'autres algues peuvent créer des blooms dans les lacs. C'est le cas des dinoflagellés (Cantonati *et al.* 2003) ou encore de Cryptophycées (Druart & Balvay 2007).

Depuis la fin des années 1990, le Léman fait face à des blooms d'une micro-algue filamenteuse appartenant à une classe différente de celles mentionnées précédemment, la classe de Zygothryxées. Il s'agit d'une espèce du genre *Mougeotia* qui provoque également des blooms dans d'autres lacs péri-alpins italiens, le lac de Garde et le lac Majeur, et dans un lac subtropical, le lac Kinneret en Israël. Ces blooms provoquent une gêne pour la pêche professionnelle, dans la mesure où les algues obstruent les filets. L'adduction d'eau potable peut également être impactée par le colmatage des filtres par ces microorganismes. Les différents utilisateurs et gestionnaires de ces lacs (dont la CIPEL, l'agence de l'Eau, les Services Cantonaux de l'environnement en Suisse pour le Léman) sont en attente de réponses pour une meilleure gestion et compréhension de ce phénomène.

Ce genre d'algue est fréquent dans les cours d'eau et la plupart des études qui le concernent sont menées sur des taxons benthiques (Graham *et al.* 1996). Cependant des auteurs se sont penchés sur son écologie en lac (ex. (Padisak *et al.* 2008) (Reynolds *et al.* 2002)). L'objectif de cette étude est donc d'identifier les conditions environnementales qui déclenchent les proliférations de *Mougeotia* dans le Léman. Pour ce faire, nous avons étudié les séries chronologiques du Léman et avons adopté une approche comparative afin de confronter la dynamique d'occurrence de *Mougeotia* dans le Léman avec les dynamiques d'occurrence observées dans d'autres écosystèmes lacustres. Lors de cette étude, nous avons voulu répondre aux questions suivantes :

- Est-ce la même espèce qui prolifère dans les 4 lacs (Léman, lac de Garde, lac Majeur, Lac Kinneret)?
- Ces taxons ont-ils la même écologie? Est-il possible de définir l'écologie de ces *Mougeotia* ?
- Quels sont les facteurs déclenchant des blooms à *Mougeotia* dans le Léman ?

2. METHODES

Pour cette étude, les phénomènes de blooms à *Mougeotia* du Léman ont été comparés à des blooms survenant dans trois autres grands lacs (figure 1) : Lac de Garde, Lac Majeur et Lac Kinneret :

- le lac de Garde est le plus grand lac d'Italie, situé au pied des Alpes. Il présente une surface de 368 km² et un volume de 49 km³. Sa profondeur maximale est de 350 m.

- le lac Majeur est le 2ème plus grand lac d'Italie, également situé au pied des Alpes. Sa surface est de 212 km², son volume de 37.5 km³ et sa profondeur maximale est de 370 m.
- le lac Kinneret (ou lac de Tibériade) est situé au nord de l'Israël, dans un climat sub-tropical. Sa surface est de 170 km², son volume de 4 km³ et sa profondeur maximale de 43 m.

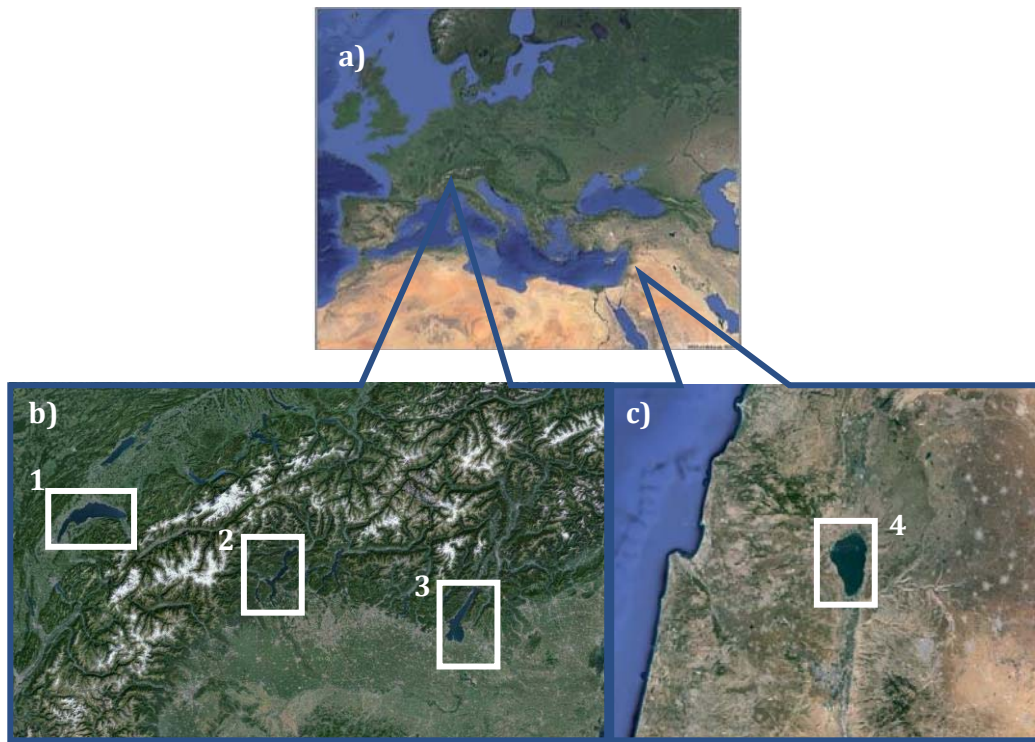
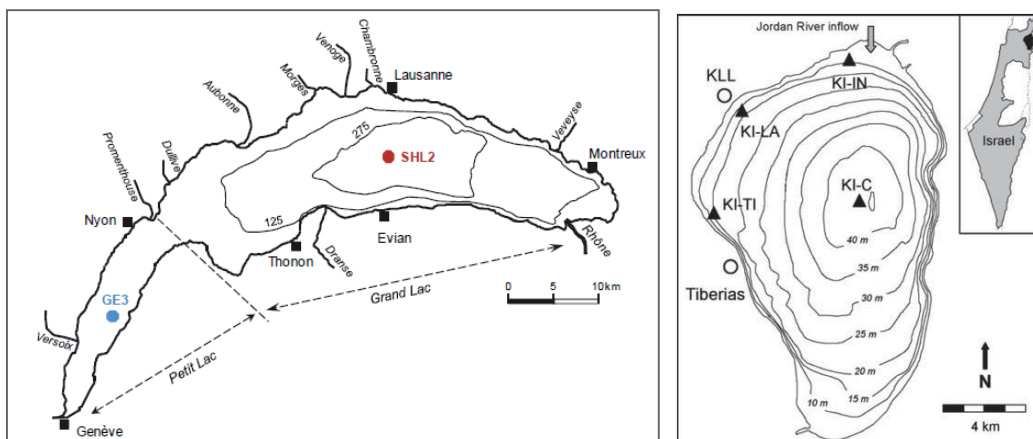


Figure 1 : Localisation des 4 lacs étudiés : Léman (1), lac Majeur (2), lac de Garde (3) et lac Kinneret (4).

Figure 1 : Location of the four study lakes: Lake Geneva (1) Lake Maggiore (2), Lake Garda (3) and Lake Kinneret (4).

Les données du monitoring de ces 4 lacs ont été utilisées pour identifier les conditions environnementales associées à la présence de *Mougeotia* et examiner les facteurs déclenchant les blooms de *Mougeotia*. Des échantillonnages mensuels ou bimensuels sont effectués à la station Bardolino pour le lac de Garde, à la station Ghiffa pour le lac Majeur, et toutes les semaines ou tous les 15 jours à la station KI-C du lac Kinneret (les localisations précises des stations de prélèvement sont données à la figure 2).



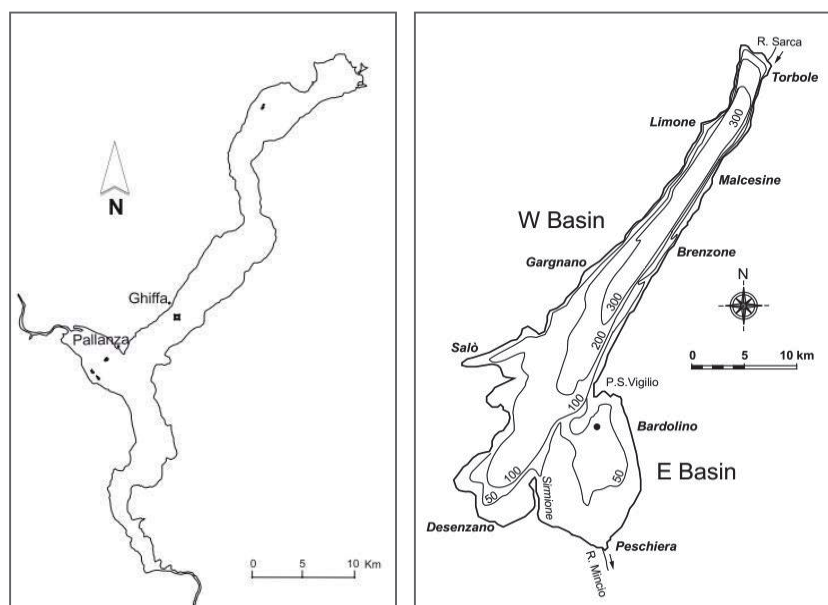


Figure 2 : localisation des points d'échantillonnage des lacs Léman (en haut à gauche) Kinneret (en haut à droite), Majeur (en bas à gauche) et de Garde (en bas à droite).

Figure 2 : Location of sampling points of Lake Geneva (top left) Lake Kinneret (top right), Lake Maggiore (bottom left) and Lake Garda (bottom right).

Les prélèvements ont été réalisés avec des cloches effectuant un échantillonnage intégré pour le Léman (0-10 m jusqu'à 2000, puis 0-20 m à partir de 2000) et le lac Majeur (0-20 m). Pour le lac de Garde, des échantillons intégrés à 3 profondeurs sont réalisés (0-2 m, 9-11 m, 19-21 m), des analyses microscopiques séparées sont effectuées sur ces 3 profondeurs. Pour le lac Kinneret, des échantillons discrets sur 11 profondeurs sont réalisés (0, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40), des analyses microscopiques séparées sont ensuite effectuées sur ces 11 échantillons. Pour tous les lacs, les dénombrements du phytoplancton ont été réalisés selon la même méthode (Utermohl 1958).

Les paramètres physico-chimiques utilisés dans cette étude proviennent de moyennes pondérées par la profondeur dans la couche de surface 0-20 m. Les facteurs pris en compte pour cette étude sont la température [T (°C)], le phosphore total [TP ($\mu\text{g l}^{-1}$)], le phosphore dissous [SRP ($\mu\text{g l}^{-1}$)], Secchi (m). D'autres paramètres tels que la profondeur de la zone euphotique (Vollenweider & Kerekes 1982), la stabilité de la colonne d'eau (RWCS, Welch 1992) sont estimés à partir des paramètres cités ci-dessus.

3. RESULTATS

3.1 EST-CE LA MÊME ESPÈCE QUI PROLIFÈRE DANS LES 4 LACS ?

Le genre *Mougeotia* est très diversifié, il comprend plus de 190 espèces (Guiry & Guiry 2012). Avant de démarrer toute analyse, il apparaissait donc nécessaire de savoir si nous avions la même espèce dans les différents lacs et pour le cas particulier du Léman, si nous avions toujours la même espèce de 1974 à nos jours.

Dans le Léman, il est fait mention de *Mougeotia gracillima* (figure 3) depuis 1974 et ces identifications sont basées sur des tailles de cellules. Nous avons repris des échantillons de 1976 à 2011 présentant des abondances importantes de *M. gracillima* dans le Léman et nous avons réalisé des mesures de taille de cellules. La largeur des cellules est un des critères d'identification utilisé dans la détermination des espèces de ce genre. Il apparaît que les largeurs des cellules sont identiques dans les différents échantillons et varient de 3 à 5 μm . Cette largeur de cellule correspond à la description de *M. gracillima*, mais aussi à celle *M. elegantula*. Dans de nombreux cas, l'identification des espèces du genre *Mougeotia* nécessitent des zygospores (forme de reproduction) qui sont absentes des échantillons du Léman : ce critère permettrait de départager ces deux espèces.

Dans les lacs de Garde, Majeur et Kinneret, l'identification est faite uniquement au genre (figure 3). Les dimensions des cellules dans le Lac Kinneret sont proches de celles observées dans le Léman ; par contre dans le lac de Garde, elles sont plus larges (4 à 8 μm).

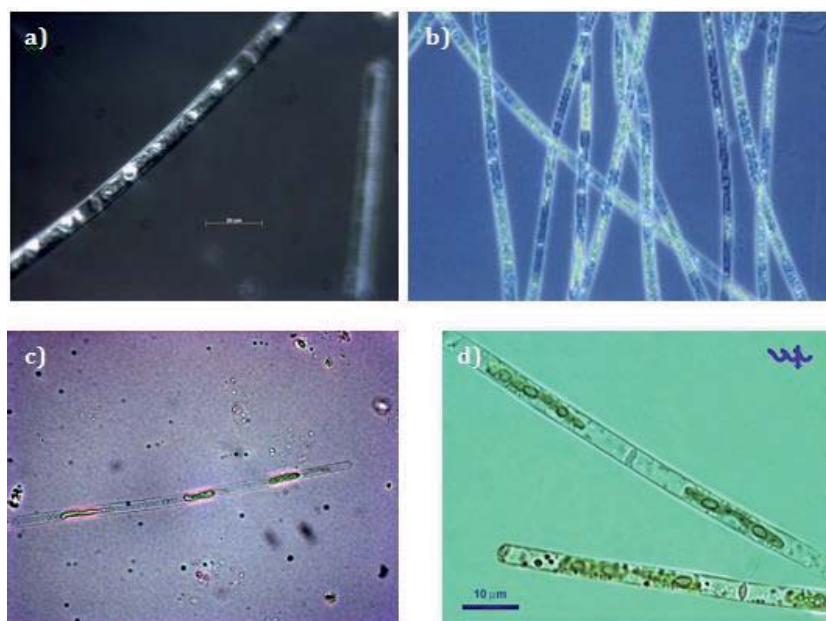


Figure 3 : Photos de *Mougeotia* sp. du Léman (a), du Lac de Garde (b), du Lac Majeur (c) et du Lac Kinneret (d).

Figure 3 : Photos of *Mougeotia* sp. of Lake Geneva (a), Lake Garda (b), Lake Maggiore (c) and Lake Kinneret (d).

L'harmonisation des identifications des espèces du phytoplancton entre laboratoires est un problème récurrent. Ces différences peuvent être liées à l'utilisation d'ouvrages différents, à des microscopes de qualités différentes ou encore à des changements de personnes effectuant les identifications (Straile *et al.* 2013). Le même type de conclusions sont données Baillot (Baillot 2013), qui montre que le premier paramètre expliquant la variabilité des communautés phytoplanctonique des lacs de l'Ouest de la France est l'origine du laboratoire ayant effectué la détermination. Une solution pour palier à ces différences de détermination est d'effectuer des exercices d'intercalibration qui permettent d'harmoniser les pratiques (Kahlert *et al.* 2009, Prygiel *et al.* 2002).

Une autre solution, pour supprimer l'hétérogénéité de données taxonomiques provenant de laboratoires différents, est d'analyser les listes floristiques à un niveau taxonomique générique, ou alors de travailler sur des groupes fonctionnels (Baillot 2013).

Dans le cas de cette étude, nous ne pouvons pas savoir sur base morphologique si les 4 lacs présentent les mêmes espèces de *Mougeotia* et nous avons donc choisi d'utiliser une détermination au niveau générique pour comparer les différents lacs.

La question suivante qui se pose est de savoir si les *Mougeotia* présentes dans les 3 lacs (Garde, Majeur et Kinneret) ont des phénologies et des écologies différentes de celle observée dans le Léman.

3.2 DYNAMIQUE ET ÉCOLOGIE DE *MOUGEOTIA* SP. DANS LE LÉMAN, COMPARAISONS À CELLES DES AUTRES LACS (GARDE, MAJEUR ET KINNERET)

Le schéma d'occurrence de *Mougeotia* sp. présenté en Figure 5 indique clairement que, sur le Léman, *Mougeotia* sp. était présent avec des biomasses relativement faibles dans les années 1974 à 1982. Puis de 1983 jusqu'au début des années 90, *Mougeotia* sp. est devenue rare. C'est à partir du milieu des années 90 et surtout à partir de 2001 que ce taxon est devenu abondant et présentait des blooms certaines années (2001, 2007 et 2009). Dans le lac Majeur, *Mougeotia* sp. est présent tout au long de la chronique et a présenté un bloom à la fin du printemps et au début de l'été 2011. Sur le lac de Garde, des biomasses importantes sont observées tout au cours de la chronique interannuelle. Enfin pour le Lac Kinneret la dynamique interannuelle est claire : c'est à partir de 2004 que *Mougeotia* sp. présente des biomasses importantes.

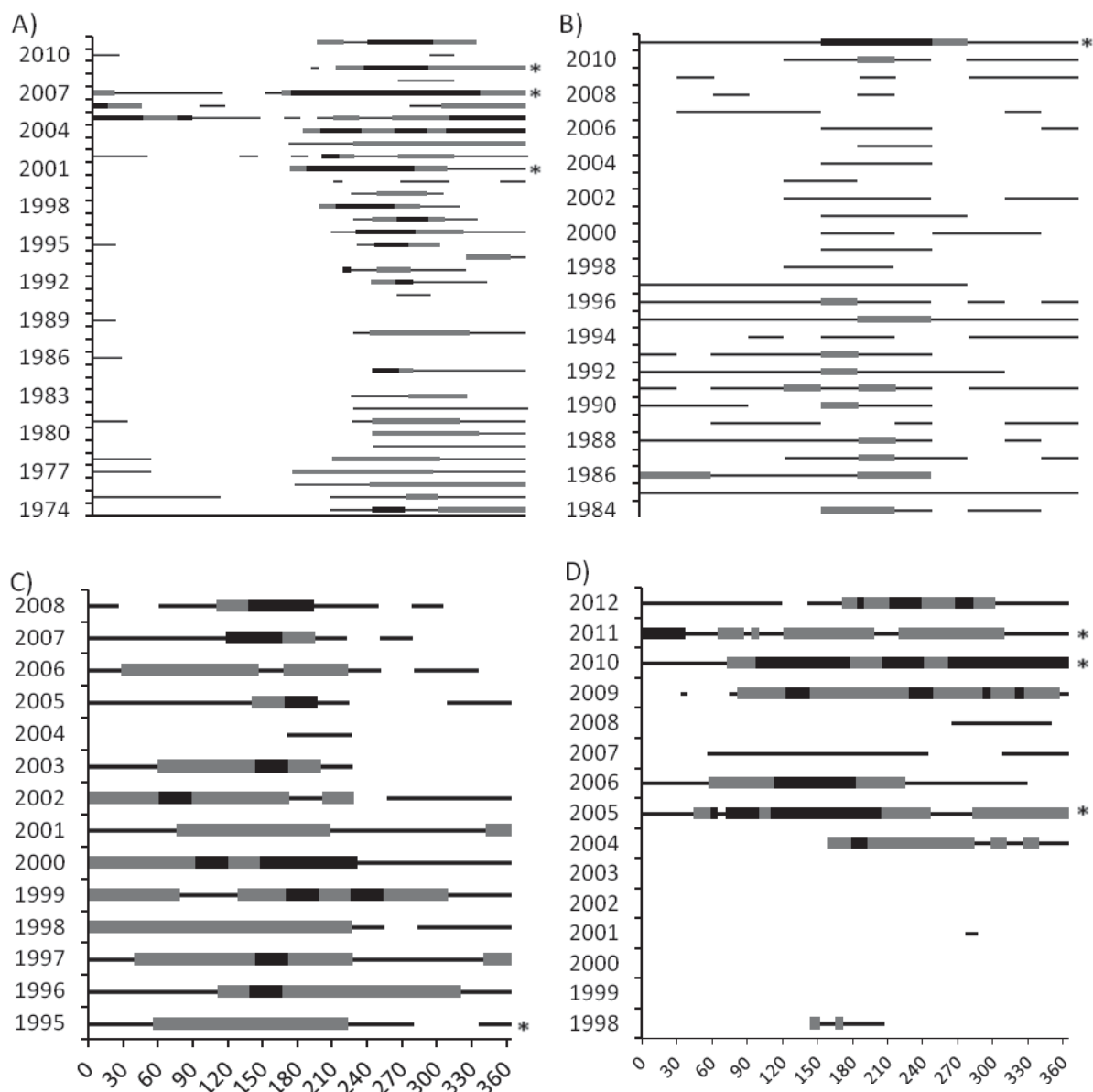


Figure 4 : Changement à long-terme des patrons saisonniers de la biomasse de *Mougeotia* sp. : A) Léman, B) Lac Majeur, C) Lac de Garde, D) Lac Kinneret; * : indique les années où les pics de *Mougeotia* sp. atteignent plus de 80% de la biomasse phytoplanctonique totale pour au moins un échantillon. Ligne simple : 1 à 100 µg/L, ligne large grise : 100 à 1000 µg/L, ligne large noire : plus de 1000 µg/L.

Figure 4 : Long-term change of the seasonal patterns of the *Mougeotia* sp. biomass A) Lake Geneva B) Lake Maggiore, C) Lake Garda, D) Lake Kinneret; * Indicates years when *Mougeotia* sp. peaks reached more than 80 % of the total phytoplankton biomass for at least one sample. Single line: 1-100 ug / L, wide grey line: 100 to 1,000 mcg / L, wide black line: more than 1,000 mg / L.

Les dynamiques interannuelles de *Mougeotia* sp. sont à rapprocher de l'évolution à long-terme des concentrations en phosphore total. C'est lorsque la concentration en phosphore (exprimée en moyenne annuelle dans les 20 premiers mètres) approche 15 µg/L que des biomasses importantes surviennent dans le lac Kinneret et le Léman. Dans le cas des lacs de Garde et Majeur, les niveaux en phosphore sont stationnaires (proches de 10 µg/L) sur la chronique étudiée et correspondent aux concentrations favorisant le développement de *Mougeotia* sp., ce qui expliquerait l'absence de dynamique interannuelle claire, mais sa présence régulière.

D'après ces résultats, les concentrations en phosphore semble être un élément déterminant pour la présence de *Mougeotia* sp.. La gamme de valeur doit osciller entre 5 et 15 µg/L de phosphore pour que le taxon soit présent en quantité importante (Figure 6).

Ceci est confirmé par plusieurs publications qui considèrent le genre *Mougeotia* comme électif des lacs meso à oligotrophes (Salmaso 2002). Le succès de ce taxon réside dans sa capacité à être un bon compétiteur pour le phosphore lorsque les concentrations en phosphore commencent à devenir faibles (Padisak 2003). C'est également un phénomène qui a été observé dans le Lac de Lugano (grand lac péri-alpin d'Italie) : *Mougeotia* sp. présentait des biomasses importantes lorsque le lac a commencé à s'eutrophiser dans les années 55-58, puis a disparu pendant les années de forte eutrophisation ; lorsque le lac a retrouvé des niveaux en phosphore plus faibles en 1986, *Mougeotia* sp. a présenté à nouveau des biomasses élevées. Mais depuis 1988, ce taxon est rare en raison des faibles concentrations en phosphore (Polli & Simona 1992).

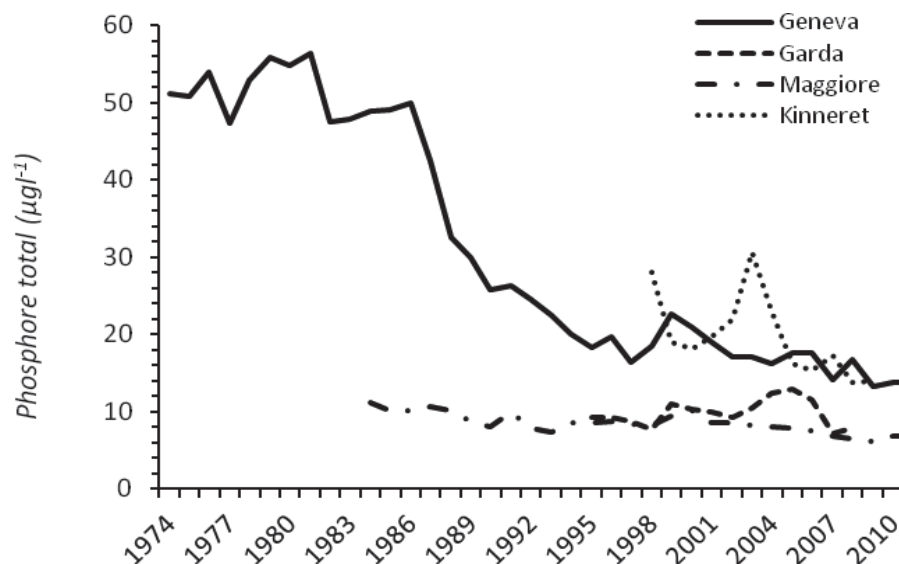


Figure 5 : Evolution à long-terme des concentrations en phosphore total (moyenne annuelle) dans la couche 0-20 m des 4 lacs.

Figure 5 : Long-term trend of total phosphorus concentrations (annual mean) in the 0-20 m layer of the four lakes.

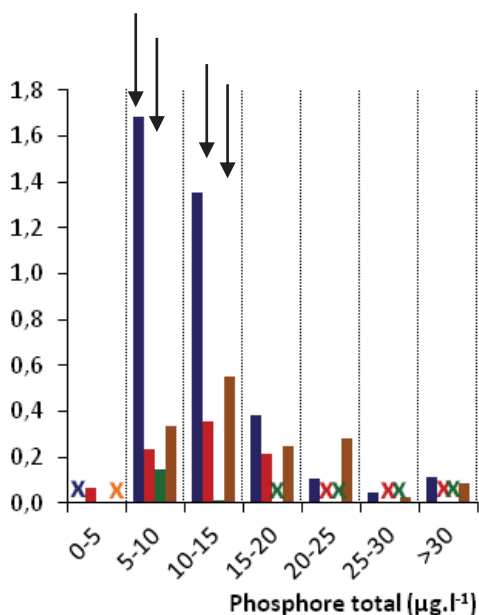


Figure 6 : Optima de *Mougeotia* sp. pour le phosphore total (moyenne annuelle sur les 0-20 m). Léman en bleu, Lac de Garda en rouge, lac Majeur en vert, lac Kinneret en marron. x: pas de *Mougeotia* sp. Les flèches indiquent les biomasses maximales rencontrées dans chaque lac.

Figure 6 : Optima of *Mougeotia* sp. for total phosphorus (mean over the 0-20 m layer). Lake Geneva in blue, Lake Garda in red, Lake Maggiore in green and Lake Kinneret in brown. x: no *Mougeotia* sp. The arrows show the maximum biomass encountered in each lake.

La dynamique saisonnière de *Mougeotia* sp. dans le Léman (Figure 5) indique qu'il s'agissait d'un taxon apparaissant à la fin de l'été et en automne. Mais à partir des années 90, cette dynamique se modifia et depuis 2000, *Mougeotia* apparaît dès le mois de juin et peut parfois se maintenir en période hivernale et printanière. Pour le lac de Garde il s'agit plutôt d'un taxon apparaissant en fin de printemps et disparaissant au cours de l'été ; pour le lac Majeur, elle apparaît plutôt en été. Enfin, pour le lac Kinneret, le taxon est présent toute l'année, mais les plus fortes biomasses sont retrouvées en été.

Pour le Léman, le changement inter-annuel de la dynamique saisonnière sont probablement liés à l'évolution inter-annuelle des profils verticaux de phosphore (Anneville et al., 2001). La dynamique saisonnière quant à elle, est probablement à relier à la stratification de la masse d'eau (Figure 7) et aux traits fonctionnels de cette espèce qui lui confèrent la possibilité d'être compétitive aux faibles intensités lumineuses. En effet, le point commun entre les 4 lacs pour expliquer la dynamique saisonnière de *Mougeotia* sp. est qu'elle se développe lorsque le lac est stratifié : la stratification apparaît plus tôt dans l'année pour le lac de Garde et le lac Kinneret (mois de juin et juillet) que pour le Léman (juillet, août), ce qui peut expliquer la précocité de l'apparition de *Mougeotia* sp. dans ces deux lacs par rapport au Léman. Plusieurs auteurs indiquent que la stratification de la colonne d'eau est déterminante pour expliquer la présence de *Mougeotia* : ce taxon trouve sa niche écologique dans les épilimnions clairs des lacs profonds (Reynolds et al. 2002, Padisak et al. 2009). Ces épilimnions apparaissent lorsque la stratification des eaux est en place, et ils doivent présenter des conditions homogènes sur toute leur épaisseur pour favoriser le développement de *Mougeotia* sp. Ce taxon tolère des faibles luminosités, ce qui lui permet de se développer dans des zones relativement profondes de l'épilimnion, c'est à dire à l'interface avec le métalimnion. Ces couches d'eau sont en contact avec les couches plus profondes des lacs qui sont plus riches en nutriments et dont *Mougeotia* sp. peut bénéficier. Cette capacité à se développer dans les faibles luminosités, est facilitée par la faculté d'orienter son chloroplaste lamellaire pour qu'il offre la plus grande surface à la lumière (Wagner & Klein 1981).

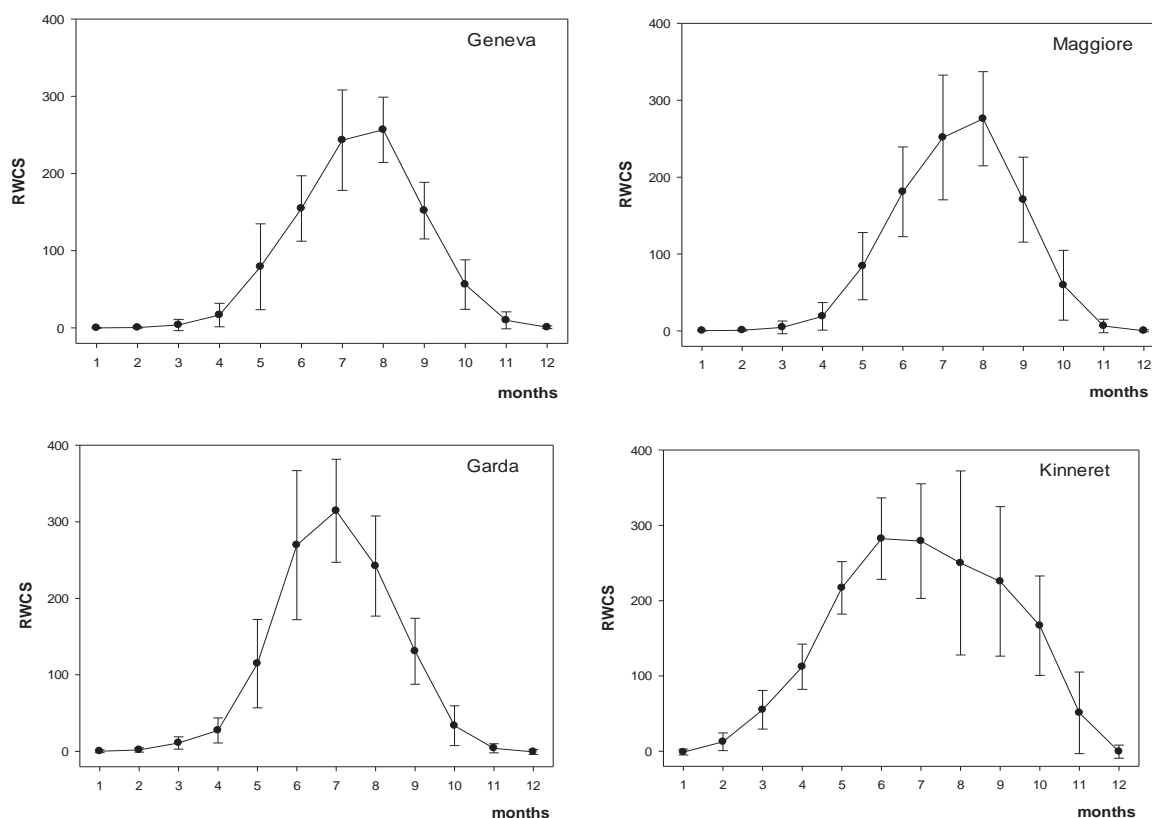


Figure 7 : Dynamique saisonnière de la stabilité de la masse d'eau (RWCS, Relative Water Column Stability). Des moyennes ont été calculées pour chaque mois. Les points correspondent aux moyennes interannuelles, et les barres à l'écart type.

Figure 7 : Seasonal dynamics of stability of the water body (RWCS, Relative Water Column Stability). Mean were calculated for each month. Points correspond to inter-annual averages and bars, the standard deviation.

Nous pouvons donc résumer cette partie en listant les paramètres qui favorisent la présence de *Mougeotia* sp. :

- une concentration en phosphore oscillant entre 5 et 15 µg/l
- un lac stratifié permettant la présence d'un épilimnion
- Un épilimnion profond et clair pour permettre d'avoir un métalimnion recevant de la lumière.

Pour identifier les conditions environnementales favorables au développement des blooms à *Mougeotia* sp., nous nous sommes centrés sur le Léman et les paramètres énoncés ci-dessus à savoir : concentration annuelle en phosphore, profondeur de la thermocline, intensité de la thermocline, profondeur du Secchi.

3.3 IDENTIFICATION DES CONDITIONS ENTRAÎNANT DES BLOOMS À *MOUGEOTIA* SP. DANS LE LÉMAN

L'identification des paramètres clés associés à l'apparition de blooms de *Mougeotia* sp. dans le Léman, a été réalisée sur la période 2000 à 2011. Les années ont été regroupées en trois classes en fonction de l'abondance de *Mougeotia* sp. au moment de son pic de biomasse (répartition en quartiles). Une 1^{ère} classe (inférieur au premier quartile) rassemble les années présentant des biomasses faibles, variant de 5.6 à 361 µg/L (2000, 2003, 2008 et 2010), une 2^{ème} classe (entre le 1er et le 3ème quartile) rassemble les années présentant des biomasses moyennes variant de 788 à 2267 µg/L (2002, 2004, 2005, 2006 et 2011), enfin une 3^{ème} classe (supérieur au 3ème quartile) rassemble les années présentant des biomasses élevées dont les valeurs varient entre 11900 et 39029 µg/L (2001, 2007 et 2009). Nous avons ensuite cherché à mettre en évidence les paramètres environnementaux discriminant au mieux ces trois classes. Nous avons conduit une analyse discriminante sur les valeurs des paramètres physico-chimiques de la période correspondant au début du développement de *Mougeotia* sp. Les paramètres suivants ont été sélectionnés pour l'analyse sur la base des résultats du paragraphe précédent :

- l'intensité de la thermocline : comme la stratification est un élément essentiel pour expliquer la présence de *Mougeotia* sp., nous avons émis l'hypothèse qu'il devait être important pour discriminer ces trois types d'années. La valeur avant le développement de *Mougeotia* sp. a été sélectionnée.
- la profondeur de la thermocline : puisque *Mougeotia* sp. est un taxon qui est capable de se développer dans les eaux profondes dans des lumières faibles, ce paramètre doit également être déterminant pour la discrimination. La valeur avant le développement de *Mougeotia* sp. a été sélectionnée.
- la profondeur du Secchi : puisque plusieurs études montrent que *Mougeotia* sp. est un taxon qui se développe dans les eaux profondes dans des lumières faibles (Reynolds *et al.* 2002), nous émettons l'hypothèse que ce paramètre doit avoir des valeurs précises pour favoriser le développement de *Mougeotia* sp. La valeur avant le développement de *Mougeotia* sp. a été sélectionnée.
- la vitesse moyenne du vent en juin : le vent affecte les processus hydrodynamiques et par ce fait la dynamique des apports en nutriments, le vent influence également la stratification en favorisant l'établissement d'une thermocline et d'une zone euphotique profonde en brassant et homogénéisant le lac sur les 10 premiers mètres avant son développement, c'est à dire au mois de juin. Le vent sud-ouest a été retenu pour cette étude car une analyse préliminaire indiquait une forte correspondance avec l'abondance de *Mougeotia* uniquement pour ce type de vent, qui avec la bise, constitue les vents dominants sur le Léman.
- la biomasse en *Mougeotia* sp. en juin : nous avons émis l'hypothèse que les blooms étaient favorisés lorsqu'un inoculum en *Mougeotia* sp. était présent en juin. Plus cet inoculum était abondant et plus le bloom avait de chance d'être important.
- Enfin, nous avons utilisé la concentration en phosphore soluble lors du brassage des eaux : en effet, *Mougeotia* sp. correspond à un état méso-oligotrophe des lacs (Polli & Simona 1992). Nous l'avons également montré pour le Léman avec la dynamique inter-annuelle. La concentration en phosphore soluble lors du brassage des eaux est un bon indicateur inter-annuel de l'état trophique du lac et a donc été testée.

Une analyse discriminante a été réalisée. Une bonne discrimination des années présentant des blooms à *Mougeotia* sp. par rapport aux années n'en présentant pas est observée (Fig. 8).

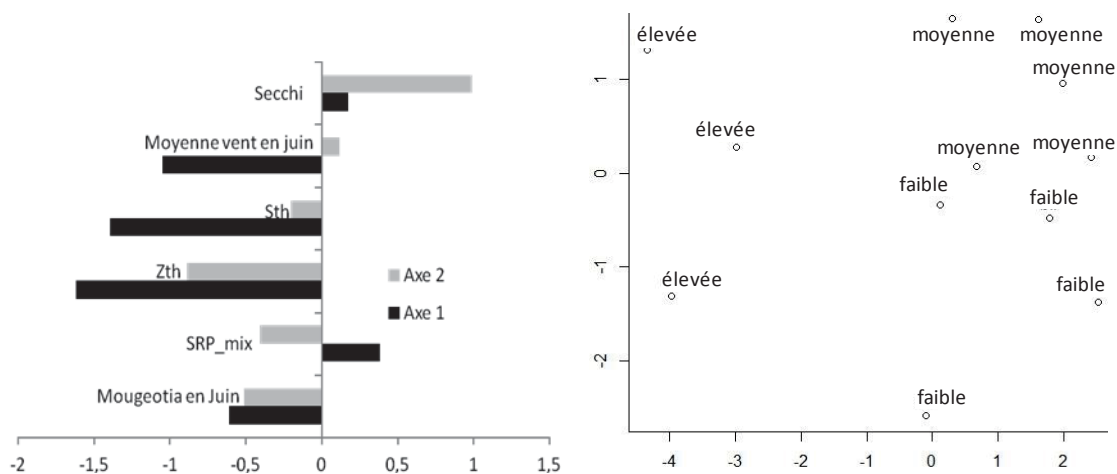


Figure 8 : Analyse discriminante linéaire réalisée à partir de la profondeur du Secchi au moment du démarrage du développement de *Mougeotia* sp. (Secchi), de la moyenne de la vitesse vent Sud-Ouest en Juin (Moyenne vent en juin), de l'intensité de la thermocline (Sth), de la profondeur de la thermocline (Zth), de la concentration du phosphore soluble en hiver (SRP_mix), de la biomasse en *Mougeotia* sp. en Juin (*Mougeotia* en juin).

Figure 8 : Linear discriminant analysis made from the Secchi depth at the start of *Mougeotia* sp. development (Secchi), mean South-west wind speed in June (mean wind in June), intensity of the thermocline (Sth), depth of the thermocline (Zth), concentration of soluble phosphorus in winter (SRP_mix) of *Mougeotia* sp. biomass in June (*Mougeotia* in June).

Il apparait que pour qu'il y ait des blooms à *Mougeotia* sp. il faut que les conditions suivantes soient réunies. En premier lieu, il faut que le lac soit dans un état méso-oligotrophe (5 et 15 $\mu\text{g/L}$ dans la couche 0-20 m). Ensuite, il faut que la thermocline soit bien marquée au moment du développement de *Mougeotia* sp., c'est à dire au mois Juin. Par ailleurs, cette stratification importante de la masse d'eau doit être associée à une profondeur de 10 m pour la zone euphotique et une forte intensité de la thermocline (Fig. 9). C'est à cette profondeur que *Mougeotia* sp. trouve tous ses avantages compétitifs par rapport aux autres algues, puisqu'elle est capable de profiter de son avantage pour les faibles luminosités, elle est également capable de résister à la sédimentation grâce à sa forme filamenteuse. Ces conditions de stratification importante et profonde sont favorisées par des vents forts au mois de juin (moyenne pour les années présentant des blooms : 16.32 m/s, contre 11.93 m/s pour les années présentant des biomasses moyennes et 8.44 m/s pour les années présentant des biomasses faibles), qui vont apporter l'énergie nécessaire pour homogénéiser profondément la masse d'eau (jusqu'à 10 m) mais qui peuvent également contribuer à des apports en nutriments en générant des remontées d'eau profondes et riches en phosphore.

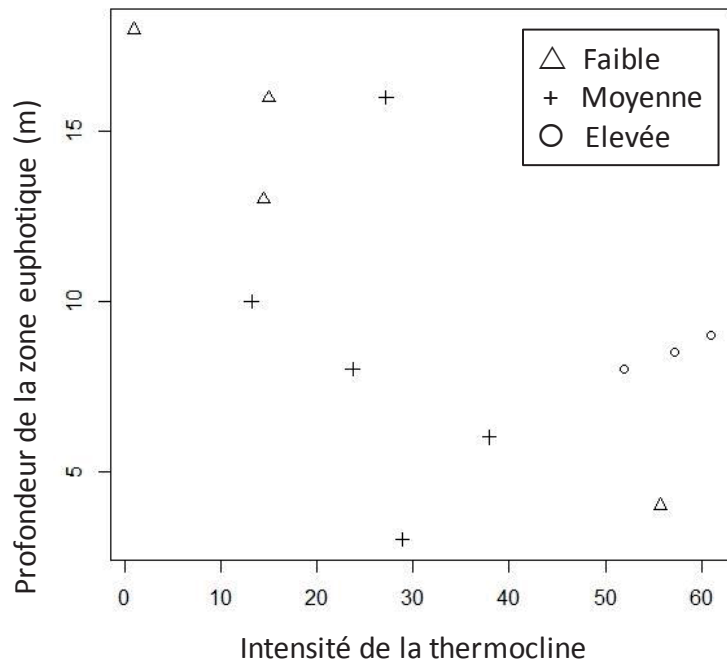


Figure 9 : Relation entre la profondeur de la zone euphotique, l'intensité de la thermocline et l'intensité de la biomasse en *Mougeotia* sp.

Figure 9 : Relationship between the depth of the photic zone, thermocline intensity and *Mougeotia* sp. biomass intensity.

Enfin, un dernier paramètre va favoriser l'apparition des blooms à *Mougeotia* sp., il s'agit de l'inoculum en *Mougeotia* sp. au mois de juin (juste avant le développement de *Mougeotia* sp.). Plus cet inoculum est important en juin, plus la probabilité d'avoir un bloom sera importante.

La figure 10 résume les conditions du mois de juin favorisant la probabilité d'apparition des blooms à *Mougeotia* sp.

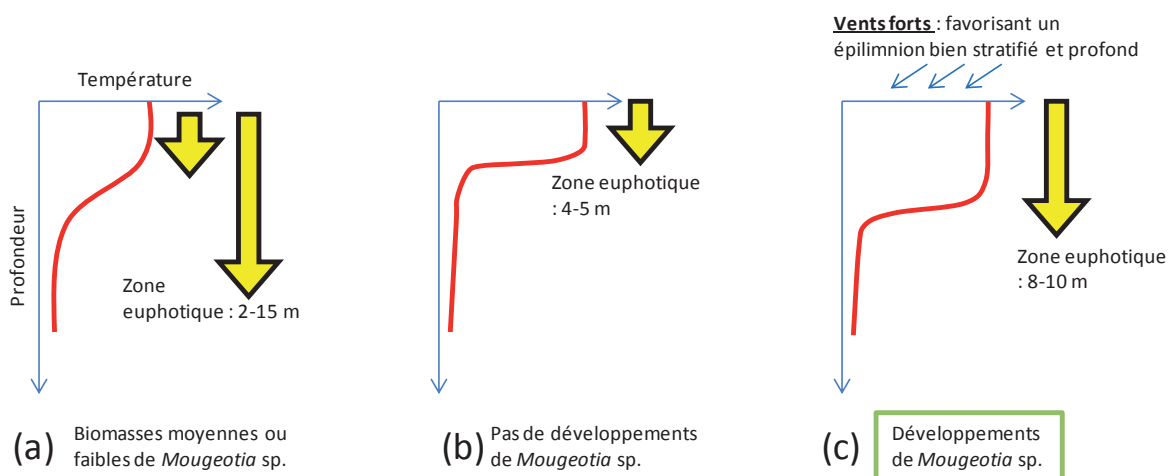


Figure 10 : Résumé des combinaisons de paramètres provoquant des blooms à *Mougeotia* sp. La ligne rouge représente la température en fonction de la profondeur et les flèches jaunes la profondeur de la zone euphotique. (a) biomasses moyennes à faibles : thermocline peu marquée, zone euphotique variable, (b) biomasses faible : thermocline marquée, mais zone euphotique peu profonde, (c) biomasses fortes : thermocline marquée, vents forts, zone euphotique profonde.

Figure 10 : Summary of parameter combinations causing *Mougeotia* sp. blooms. The red line represents the temperature depending on the depth and the yellow arrows, the depth of the photic zone. (a) Low to average biomasses: slightly marked thermocline, variable photic zone, (b) low biomass: thermocline marked, but shallow euphotic zone, (c) high biomasses: thermocline marked, high winds, deep photic zone.

4. CONCLUSIONS

Mougeotia sp. est un taxon filamenteux qui va trouver ses avantages compétitifs par rapport aux autres algues lorsque les intensités lumineuses sont faibles (Reynolds 2006). En effet ce taxon dispose de chloroplastes lamellaires qui peuvent s'orienter pour présenter la plus grande surface par rapport aux rayons lumineux (Wagner & Klein 1981). D'autre part, sa forme filamenteuse lui permet de résister à la sédimentation et donc d'être adapté aux milieux stratifiés. Enfin, il s'agit d'un taxon préférant les eaux des lacs lorsqu'ils sont oligo-mésotrophes (Polli & Simona 1992).

Pour que cette algue apparaisse et prolifère en blooms, les conditions suivantes doivent être réunies :

- le lac doit être en premier lieu dans un état oligo-mésotrophe (la moyenne annuelle entre 5 et 15 $\mu\text{g/L}$ de phosphore soluble dans les 20 premiers mètres), ce qui est le cas dans le Léman actuellement, mais aussi dans d'autres lac (Lac de Garde, Lac Majeur et Lac Kinneret). En dehors de ces concentrations, d'autres taxons sont plus compétitifs que *Mougeotia* sp.
- la zone euphotique doit s'étendre jusqu'à une dizaine de mètres et correspondre à la profondeur de l'épilimnion.
- La masse d'eau doit être fortement stratifiée jusqu'à 10 mètres de profondeur, profondeur à partir de laquelle se développe *Mougeotia*. En effet, à cette profondeur, cette algue se trouve dans le métalimnion à l'interface de l'épilimnion (caractérisé par des eaux claires mais pauvres en nutriments) et de l'hypolimnion présentant des eaux riches en nutriments.
- des vents forts en juin qui vont favoriser l'établissement de conditions hydrologiques favorables pour le développement de blooms de *Mougeotia* (c'est ce qu'il s'est passé en 2001, 2007 et 2009 dans le Léman). Par ailleurs, la présence de vent forts pourrait également favoriser des remontées en nutriments et enrichir la zone euphotique déjà appauvrie en début d'été et ainsi enrichir le stock en nutriments disponibles dans la zone euphotique pour la saison estivale à venir.

Si les concentrations en phosphore total descendent en dessous de 5 µg/L dans la zone 0-20 m, la probabilité d'apparition de blooms dans le Léman devrait être faible. Or actuellement en 2013, les concentrations mesurées dans cette zone sont de l'ordre de 15 µg/L. Il se peut donc que dans les prochaines années, si la combinaison de conditions météorologiques énumérées ci-dessus se rencontre à nouveau, des blooms à *Mougeotia* sp. surviennent, puisque les concentrations en phosphore sont toujours adaptées à ses préférences écologiques.

Par conséquent, dans de telles conditions environnementales adaptées aux proliférations de *Mougeotia*, il semblerait qu'une régulation de ce taxon par un contrôle descendant puisse être une alternative permettant de limiter sa prolifération. En effet, l'abondance du zooplancton n'a pas été prise en compte dans cette étude, mais divers éléments tendent à montrer que dans le Léman, les poissons planctonophages exercent une pression sur le zooplancton et les années présentant de faibles abondances en *Mougeotia* sont également associées à des années riches en zooplancton mais pauvres en planctonophages (Perga, Gillet, Anneville communications personnelles). L'influence d'un potentiel forçage par le haut sur la dynamique des efflorescences en *Mougeotia* serait donc à considérer dans de futurs travaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Anneville O., Ginot V. & Angeli N. (2001) Evolution de l'état de santé du Léman évaluée par l'analyse des séries chronologiques du phytoplancton. Rapport de la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la pollution. Campagne 2000, 161-189.
- Baillet S (2013). Utilisation des groupes morpho-fonctionnels du phytoplancton pour le diagnostic écologique des plans d'eau du bassin Loire-Bretagne. Rapport. Ecole Pratique de Hautes Etudes. 121 p.
- Cantonati M., Tardio M., Tolotti M., & Corradini F. (2003) Blooms of the Dinoflagellate *Glenodinium sanguineum* obtained during enclosure experiments in Lake Tovel (N. Italy). *Journal of Limnology* 62: 79-87.
- Druart J. C. & Balvay G. (2007) Le Léman et sa vie microscopique, Editions Quae.
- Graham J. M., Arancibia-Avila P., & Graham L. E. (1996) Effects of pH and selected metals on growth of the filamentous green algae *Mougeotia* under acidic conditions. *Limnology and Oceanography* 62: 177-189.
- Guiry M. D. & Guiry G. M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 29 March 2012. 2012.
- Havens K. E. (2008) Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. *Advance in Experimental Medicine and Biology* 619: 733-747.
- Kahlert M., Albert R. L., Anttila E. L., Bengtsson R., Bigler C., Eskola T., Galman V., Gottschalk S., Herlitz E., Jarlman A., Kasperoviciene J., Kokocinski M., Luup H., Miettinen J., Paunksnyte I., Piirsoo K., Quintana I., Raunio J., Sandell B., Simola H., Sundberg I., Vilbaste S., & Weckstrom J. (2009) Harmonization is more important than experience-results of the first Nordic-Baltic diatom intercalibration exercise 2007 (stream monitoring). *Journal of Applied Phycology* 21: 471-482.
- Padisak J. (2003) Sinking properties of some phytoplankton shapes and the relation of form resistance to morphological diversity of plankton. *Hydrobiologia* 500: 243-257.
- Padisak J., Crossetti L. O., & Naselli-Flores L. (2009) Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia* 621: 1-19.
- Padisak J., Varkuti K., Stenger-Kovacs C., & Padisak J. (2008) Environmental awareness of the permanent inhabitants of towns and villages on the shores of Lake Balaton with special reference to issues related to global climate change. *Hydrobiologia* 599: 249-257.
- Polli B. & Simona M. (1992) Qualitative and quantitative aspects of the evolution of the planktonic populations in lake Lugano. *Aquatic Sciences* 54: 304-320.

- Prygiel J., Carpentier P., Almeida S., Coste M., Druart J. C., Ector L., Guillard D., Honore M. A., Iserentant R., Ledeganck P., Lalanne-Cassou C., Lesniak C., Mercier I., Moncaut P., Nazart M., Nouchet N., Peres F., Peeters V., Rimet F., Rumeau A., Sabater S., Straub F., Torrisi M., Tudesque L., Van De Vijver B., Vidal H., Vizinet J., & Zydek N. (2002) Determination of the biological diatom index (IBD NF T 90-354): results of an intercomparison exercise. *Journal of Applied Phycology* 14: 27-39.
- Reynolds C. S. (2006) Ecology of phytoplankton, Cambridge University Press edn. New-York.
- Reynolds C. S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., & Melo S. (2002) Toward a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* 24: 417-428.
- Salmaso, N. (2002) Ecological patterns of phytoplankton assemblages in Lake Garda: seasonal, spatial and historical features. *Journal of Limnology* 61(1): 95–115.
- Straile D., Jochimsen M. C., & Kümmerlin R. (2013) The use of long-term monitoring data for studies of phytoplanktonic diversity: a cautionary tale from Swiss lakes. *Freshwater Biology* 58: 1292-1301.
- Utermohl H. (1958) Zür Vervollkommung der quantitative Phytoplankton Methodik. *Mitt.Internat.Ver.Theor.Anqew.Limnol.* 9: 1-38.
- Vollenweider R. A. & Kerekes J. (1982) Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. OECD Cooperative programme on monitoring of inland waters (Eutrophication control). Paris, Environment Directorate, OECD. 154 p.
- Wagner G. & Klein K. (1981) Mechanism of chloroplast movement in *Mougeotia*. *Protoplasma* 109: 169-185.
- Welch, E. B. (1992) Ecological Effects of Wastewater: Applied limnology and pollutant effects. Cambridge University Press, Washington, USA