



## **INTERREG V A FRANCE-SUISSE 2014-2020**

(2014 - 2020)

Axe prioritaire-Priorité d'investissement-Objectif spécifique 2-1-2

AXE 2 : Protéger et valoriser le patrimoine naturel et culturel

6.c En conservant, protégeant, favorisant et développant le patrimoine naturel et culturel

OS 4 = Préserver et restaurer les écosystèmes fragilisés de l'espace transfrontalier

### **SYNAQUA**

(Ref : 2369 / 2016-36)

SYNérgie transfrontalière pour la bio-surveillance et la préservation des écosystèmes AQUAtiques

#### **LIVRABLE 39657**

WP4.1 : Cartographie de qualité des zones côtières du Léman

Responsable : INRA – UMR CARRETEL



## **Cartographie haut-débit de la qualité des rives du Léman**

---

Dans le cadre de SYNAQUA, une cartographie haut-débit de la qualité des 200 km de côtes du Léman a été établie grâce à un diagnostic environnemental innovant basé sur l'ADN des diatomées. En effet, les diatomées, micro-algues très abondantes dans les biofilms au bord du lac, sont d'excellentes "sentinelles de l'environnement" : en analysant la composition des espèces de diatomées présentes dans les biofilms, on peut donc déterminer avec précision le niveau de pollution du site prélevé.

La carte de qualité a été réalisée grâce à des prélèvements de diatomées effectués courant Juin 2017 en 153 points côtiers tout autour du Léman. Elle est basée sur le signal bioindicateur fourni par l'ADN des diatomées présentes dans les biofilms dans chacun des sites de prélèvements. Les sites littoraux ont ainsi pu être regroupés en plusieurs classes de qualité présentant chacune des diatomées dont les écologies sont similaires et des caractéristiques physico-chimiques proches.

C'est grâce au séquençage haut-débit de l'ADN -une technologie récente de séquençage- qui permet d'identifier rapidement les diatomées, qu'un maillage aussi fin a pu être atteint. Il s'agit des premiers travaux sur la qualité écologique des rives du Léman utilisant des outils novateurs tels que le séquençage haut-débit et qui permet un premier aperçu de la qualité de ces rives à une échelle aussi fine. Cette cartographie haute-définition servira ensuite de base à une concertation entre acteurs de la gestion environnementale du Léman qui pourront s'en saisir pour élaborer et proposer des actions pour la préservation/restauration des zones les plus « à risque ».

### **1- Contexte**

---

Les lacs sont régulièrement surveillés via des points de prélèvements centraux (situés généralement au-dessus de la zone la plus profonde du lac). Le Léman est surveillé via 2 points (GE3 et SHL2) par, respectivement, l'état de Genève et l'INRA (<https://www6.inra.fr/soere-ola/>) pour le compte de la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (<http://www.cipel.org/>) et des service en charge de l'environnement de France (Dreal, Agences de l'eau, Ministère en charge de l'environnement) et Suisse (Service cantonaux en charge de l'environnement).

Les côtes sont des zones où s'exercent les pressions locales ou en provenance du bassin-versant, pressions qui impactent par la suite la qualité globale du lac. Il est donc important de prendre ces zones littorales en compte dans le cadre de l'évaluation de la qualité des lacs en vue du maintien de leur qualité.

Dans le cadre du projet SYNAQUA, l'objectif est d'évaluer la qualité écologique de la zone littorale (et non d'évaluer la qualité des eaux pour la baignade ou pour la potabilité). Cette qualité écologique caractérise le fonctionnement et la santé de l'écosystème.

La qualité écologique des lacs est évaluée à l'aide de bio-indicateurs, organismes dont la présence renseigne sur la présence de pollutions. Contrairement à une mesure chimique de l'eau (concentrations en phosphore, nitrates, pH...), les bio-indicateurs permettent :

- De mesurer l'impact des polluants sur le vivant,
- D'intégrer dans le temps l'impact de polluants,
- De mesurer l'intégrité écologique des écosystèmes

Parmi les bio-indicateurs requis par la directive cadre sur l'eau (DCE <http://www.rapportage.eaufrance.fr/dce/introduction>) en France ou par le système modulaire gradué en Suisse (VSA, <http://www.systeme-modulaire-gradue.ch>) figurent les diatomées qui sont des micro-algues unicellulaires et entourées d'un exo-squelette en silice qui produisent un biofilm brun (couche visqueuse) sur les surfaces immergées et intègrent l'effet des polluants présents dans l'environnement (Figure 1).



*Fig. 1 : Biofilm composé de diatomées au bord du Léman (juin 2017). Photo : J. Guéguen*

Il existe plus de 100 000 espèces de diatomées (Guiry, 2012 ; Pandey et al. 2017), chacune d'elles présentant une préférence particulière par rapport aux polluants (Smol & Stoermer 2010). Elles sont présentes dans tous les habitats soumis à la lumière (lacs, rivières, océans, surface des sols). Ces caractéristiques font des diatomées de très bons bio-indicateurs qui permettent d'évaluer le niveau en nutriments et en matières organiques des milieux aquatiques, et c'est dans ce cadre qu'elles ont été utilisées dans le projet SYNAQUA.

Habituellement, les diatomées sont identifiées taxonomiquement au niveau de l'espèce en se basant sur la forme de leur exo-squelette en silice. Pour cela, les scientifiques utilisent un microscope. Après avoir identifiées et dénombrées les diatomées présentes dans un échantillon de biofilm, il est possible d'affecter une qualité écologique au site dans lequel cet échantillon a été prélevé sur la base de l'écologie des espèces inventoriées (Coste et al., 2009). Cependant, compte tenu de leur extrême biodiversité, l'identification des diatomées demande une forte expertise car de nombreuses espèces ont des formes très proches. Ceci en fait une approche longue et coûteuse reposant sur un petit nombre d'experts.

Une nouvelle méthode de biologie moléculaire basée sur l'ADN a été développée au cours de la dernière décennie pour identifier les espèces sur la base de critères génétiques plutôt que sur des critères morphologiques : le métabarcoding (Figure 2).

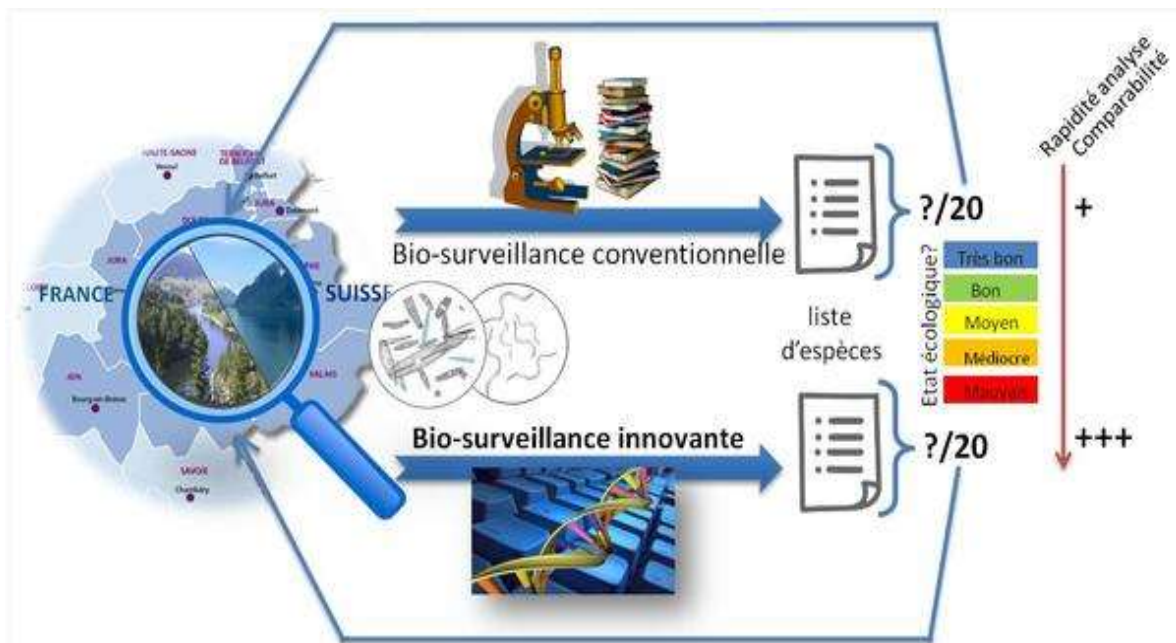


Fig. 2 : Comparaison entre méthodes conventionnelle (microscope) et innovante (ADN haut-débit).

Cette méthode est particulièrement intéressante car elle permet de pallier au manque d'expertise et aux besoins croissants en surveillance des milieux aquatiques en particulier. C'est pour cela que l'INRA de Thonon-les-Bains et l'Université de Genève ont développé le métabarcoding (Figure 2) adapté aux diatomées, qui permet une identification des diatomées en utilisant leur ADN avec des techniques de séquençage à haut-débit et des outils bioinformatiques (Kermarrec et al. 2013 ; Apotheloz et al. 2017 ; Vasselon et al. 2018 ; Keck et al. 2018 ; Rivera et al. 2018). Cet indicateur a été validé sur des échantillons de rivière dans le cadre de SYNAQUA (voir Livrables 39628 – WP1.1 et 39635 – WP2.2.1) puis appliqué sur les zones côtières du Léman.

## 2- Méthodologie

Le programme SYNAQUA propose d'utiliser le haut-débit permis par les nouvelles technologies de séquençage ADN pour déterminer la qualité écologique tout au long des rives du Léman. 153 sites littoraux (Figure 3) ont ainsi été suivis au mois de Juin 2017 (période la plus favorable pour évaluer les pressions littorales grâce aux diatomées (Rimet et al. 2015). En complément, un suivi de la qualité des sédiments a été réalisé grâce au oligochètes sur un nombre restreint de sites. Les travaux réalisés sur ce compartiment biotique ont permis de mieux développer l'approche encore en construction (voir Livrables 39628 – WP1.1 et 39635 – WP2.2.1).

Les prélèvements ont été effectués à distance régulière sur tout le périmètre du lac, et densifiés dans les zones présentant potentiellement le plus de pressions anthropiques, telles que les zones de rejets de stations d'épuration, les embouchures des principaux affluents (Dranse, Venoge, Foron, Rhône ...) ou encore les ports (Lausanne, Evian, Thonon-les-Bains, Genève, ...).



Fig. 3 : sites littoraux du Léman suivis lors du projet SYNAQUA.

A chaque site de prélèvement il a été effectué :

- Un prélèvement de biofilm dans lequel se trouvent les diatomées bio-indicatrices de la qualité écologique ([https://youtu.be/Y\\_3YaOc6WWo](https://youtu.be/Y_3YaOc6WWo); <https://youtu.be/6Q48nSMjNA>)
- Un prélèvement d'eau pour mesurer sa qualité physico-chimique (pH, température, phosphore total, nitrites, ...),
- Une caractérisation détaillée du site (substrat, type de site, vitesse d'écoulement, ...).

Chacun des 153 échantillons d'eau a été analysé au laboratoire de chimie de l'INRA de Thonon-les-Bains. De même, l'ADN de chacun des 153 échantillons de biofilm a été extrait au laboratoire de biologie moléculaire à l'INRA de Thonon-les-Bains, afin de les analyser par metabarcoding ADN (ex : Vasselon et al. 2018). Le séquençage de l'ADN a été effectué à l'Université de Genève. Des traitements bio-informatiques des données ont permis d'analyser les séquences des diatomées. Les détails des prélèvements et de leurs analyses ont été réalisés dans le cadre du WP1 du projet SYNAQUA et sont disponibles dans le livrable 39629 (WP1.2). En croisant les 3 types d'informations (qualité de l'eau, composition en diatomées, caractérisation des sites) on peut regrouper les sites en groupes cohérents en terme de qualité de l'eau et d'écologie des diatomées.

### 3- Carte de qualité écologique des zones littorales du Léman

Sur cette base, une carte de qualité écologique a ainsi été produite (Figure 4), et mise à disposition en 2019 sur le site du projet SYNAQUA :

<https://www6.inra.fr/synaqua/Actions/Cartographie/Cartographie-des-rives-du-Leman>

Une version interactive de cette carte peut également être téléchargée :

[https://www6.inra.fr/synaqua/content/download/3602/34721/version/2/file/carte\\_composition\\_V2.html](https://www6.inra.fr/synaqua/content/download/3602/34721/version/2/file/carte_composition_V2.html)

Les 153 sites présentant des communautés de diatomées similaires en terme de séquences ADN ont pu être regroupés en 3 groupes distincts. Chacun des 3 groupes, décrit ci-après, présente des diatomées dont les écologies sont similaires ainsi que des conditions physico-chimiques cohérentes.

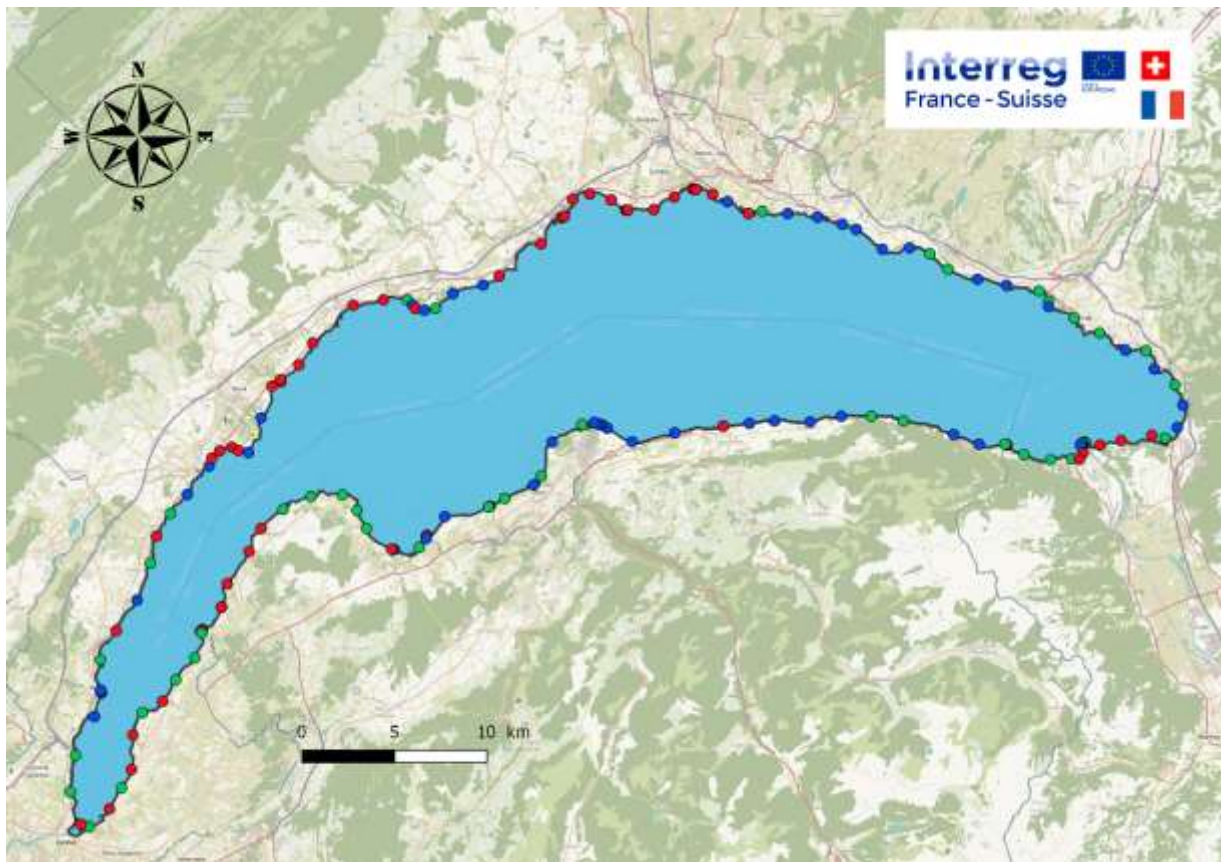


Fig. 4 : Carte de la qualité des rives du Léman réalisée par le projet SYNAQUA. Le code couleur est décrit ci-après.

- Les **sites « bleus »** sont de **bonne qualité écologique**. Les diatomées qui composent ce groupe sont des **espèces de grande taille adaptées aux milieux pauvres en nutriments**. Les eaux des sites composant ce groupe sont peu turbides et ont des concentrations faibles en chlorophylle.
- Les **sites « verts »** sont de **qualité écologique moyenne (intermédiaire)**. Les diatomées qui composent ce groupe sont des **espèces mobiles vivant dans des biofilms assez épais**. Ce groupe est constitué de sites avec un niveau intermédiaire en nutriments, incluant en particulier des sites proches des embouchures. Les rives sont plutôt composées d'enrochements.
- Les **sites « rouges »** sont de **qualité écologique plus dégradée**. Les diatomées qui composent ce groupe sont des **espèces de petite taille adaptées aux eaux présentant plus de nutriments**. Les eaux des sites composant ce groupe sont riches en nutriments avec une majorité de sites proches de rivières et de ports. Les rives sont souvent composées d'enrochements ou de murs.

Il est possible de raffiner ce signal de qualité et de caractériser plus finement ces 3 groupes en les déclinant en 11 groupes de qualité (Figure 5).

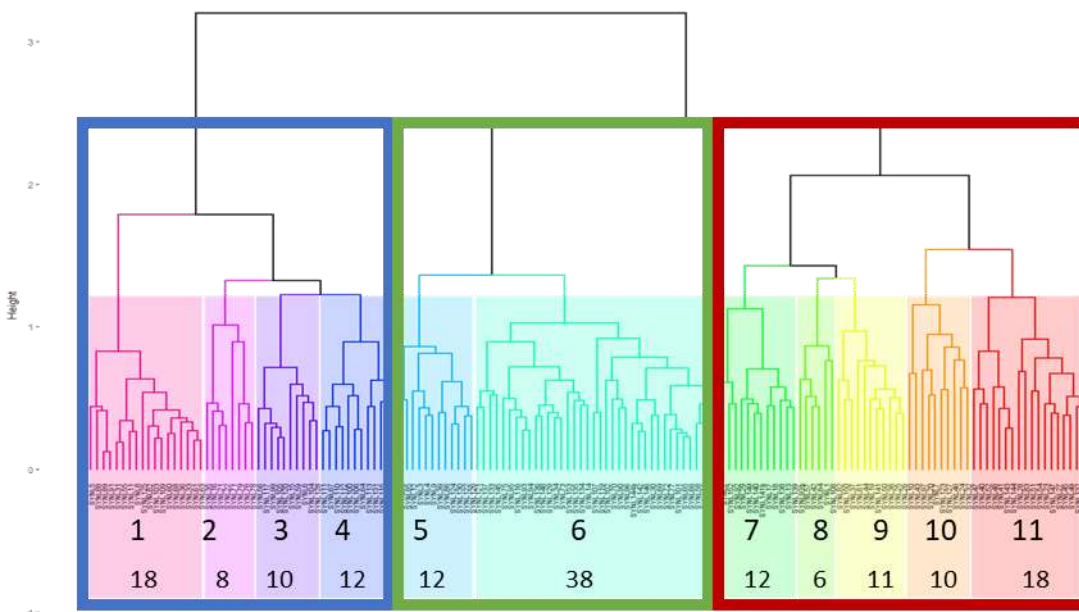


Fig. 5 : 11 groupes de qualité des rives du Léman. Les 3 grands groupes décrits sur la carte de la Figure 3 sont regroupés chacun dans un rectangle de la couleur qui les caractérise (bleu, vert, rouge)

#### Sites « bleus » :

- Groupe 1/11 (18 sites) sites oligotrophes mais légèrement turbides, caractérisés par une charge en matière minérale,
- Groupe 2/11 (8 sites) sites oligotrophes régulièrement dans ou proches des embouchures,
- Groupe 3/11 (10 sites) sites oligotrophes dans des zones très faiblement anthropisées,
- Groupe 4/11 (12 sites) sites oligotrophes présentant légèrement plus de chlorophylle que ceux des groupes 1 et 3,

#### Sites « verts » :

- Groupe 5/11 (12 sites) sites mésotrophes proches d'embouchures.
- Groupe 6/11 (38 sites) sites plutôt oligotrophes présentant des caractéristiques mésologiques typiques du lac

#### Sites « rouges » :

- Groupe 7/11 (12 sites) : sites anthropisés du petit lac, de type mésotrophes
- Groupe 8/11 (6 sites) : sites situés dans des ports, de type mésotrophes
- Groupe 9/11 (11 sites) : sites eutrophes avec prédominance de fond sableux-limoneux
- Groupe 10/11 (10 sites) : sites plus eutrophes d'embouchures
- Groupe 11/11 (18 sites) : sites eutrophes généralement proches d'embouchures

Compte-tenu du faible nombre d'échantillons sur lequel repose la caractérisation de chacun des 11 groupes, il convient de considérer ces résultats comme préliminaires.

## 4- Quelques focus sur des groupes de qualité

### Groupe 3/11

Ce groupe appartient au grand groupe de sites « bleus » identifiés comme étant de « bonne qualité écologique ». Il contient 11 sites littoraux (Figure 6).



Fig. 6 : sites appartenant au groupe de qualité N° 3 des rives du Léman.

Ce groupe est caractérisé par (Figure 7) :

- Une faible turbidité, peu de chlorophylle,
- Une grande proportion de sites avec berges naturelles,
- Des taxons de diatomées abondants qui sont indicateurs de milieux oligotrophes (*Encyonema ventricosum*, *Diatoma ehrenbergii*, *Gomphonema pumilum* var. *pumilum*).



Fig. 7 : exemples de sites appartenant au groupe de qualité N° 3 (Photos J. Gueguen), et de taxons de diatomées représentatifs (*Diatoma ehrenbergii*, *Encyonema ventricosum*. Photos : F. Rimet).



## Groupe 8/11

Ce groupe appartient au grand groupe de sites « rouges » identifiés comme étant de « qualité écologique plus dégradée ». Il contient 6 sites littoraux (Figure 8).



Fig. 8 : sites appartenant au groupe de qualité N° 8 des rives du Léman.

Ce groupe est caractérisé par (Figure 9):

- Des sites situés à l'intérieur des ports avec des fonds constitués de blocs ou de sable,
- Beaucoup de taxons de diatomées indicateurs qui sont de grande taille et vivants sur la vase (*Iconella*, *Surirella*, *Diploneis*, *Nitzschia sigmoidea*).



Fig. 9 : exemples de sites appartenant au groupe de qualité N°8 (Photos J. Gueguen), et de taxons de diatomées représentatifs (*Surirella bifrons*. Photo F. Rimet)

## Groupes 10 et 11 /11

Les groupes 10 et 11 appartiennent au grand groupe de sites « rouges » identifiés comme étant de « qualité écologique plus dégradée ». Ils contiennent respectivement 10 et 18 sites littoraux (Figure 10), et présentent majoritairement des sites d'embouchure ou à proximité.

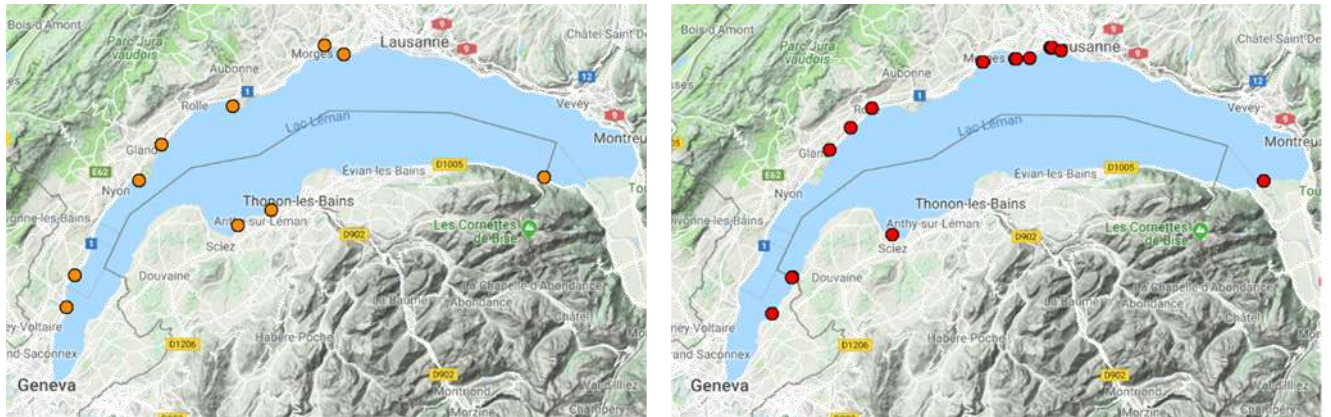


Fig. 10 : sites appartenant aux groupes de qualité N° 10 et 11 des rives du Léman.

Ils sont caractérisés (Figure 11) par :

- Des concentrations en nutriments et en chlorophylle plus élevées,
- Des taxons indicateurs qui sont typiques de milieux eutrophes et qui forment des biofilms épais (*Mayamaea permitis*, *Fistulifera saprophila*) et mésotrophes (*Nitzschia linearis*).

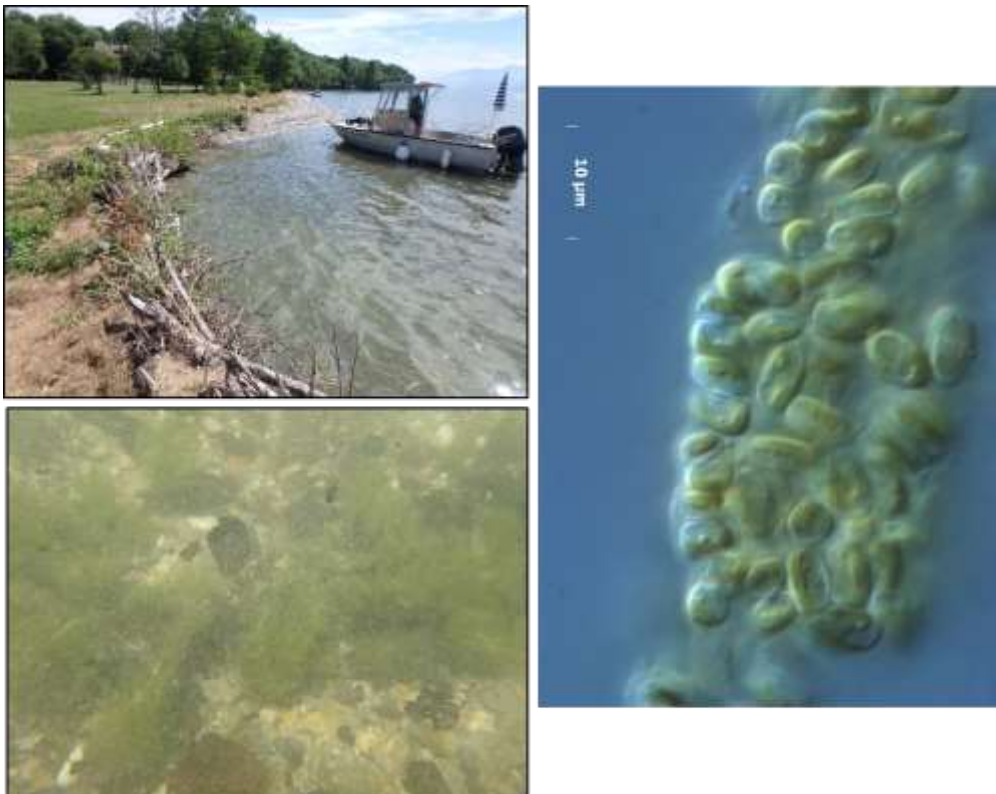


Fig. 11 : exemples de sites appartenant aux groupes de qualité N°10 et 11 (Photos J. Gueguen), et de taxons de diatomées représentatifs. (*Fistulifera saprophila*. Photo F. Rimet)

## 5- Bilan

---

Il est important de noter que les notions de qualité écologique utilisées ici sont un référentiel adapté exclusivement à l'échelle du Léman. Ces qualités écologiques n'ont pas été construites pour comparer le Léman à d'autres lacs, comme c'est le cas des indicateurs utilisés dans le cadre de la DCE. Elles sont proposées comme un « tableau de bord » à destination des gestionnaires de l'environnement autour du Léman. Cette carte a ainsi été présentée par les scientifiques de SYNAQUA à la CIPEL et aux gestionnaires environnementaux en avril 2019 (voir WP4.2 - livrable 39658).

Basés sur une seule campagne d'échantillonnage réalisée en juin 2017, cette carte demande à être affinée par des campagnes complémentaires. En outre, les développements en cours dans le cadre de SYNAQUA pour caractériser la qualité écologique des sédiments lacustres grâce aux oligochètes seront prochainement à même de compléter cette carte de qualité écologique. Tous ces résultats, obtenus grâce aux nouvelles approches ADN, apportent une meilleure connaissance de la qualité écologique des rives du Léman à une précision jamais obtenue jusque-là.

### Références

---

- Coste, M., S. Boutry, J. Tison-Rosebery, et F. Delmas. 2009. « Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006) ». *Ecological Indicators* 9 (4): 621-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.06.003>.
- Guiry, Michael. 2012. How many species of algae are there? Vol. 48. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x>.
- Keck, François, Valentin Vasselon, Frédéric Rimet, Agnès Bouchez, et Maria Kahlert. 2018. « Boosting DNA metabarcoding for biomonitoring with phylogenetic estimation of operational taxonomic units' ecological profiles ». *Molecular Ecology Resources* 18 (6): 1299-1309. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12919>.
- Kermarrec, Lenaïg, Alain Franc, Frédéric Rimet, Philippe Chaumeil, Jean-François Humbert, et Agnès Bouchez. 2013. « Next-generation sequencing to inventory taxonomic diversity in eukaryotic communities: A test for freshwater diatoms » 13 (avril). <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12105>.
- Pandey, Lalit K., Elizabeth A. Bergey, Jie Lyu, Jihae Park, Soyeon Choi, Hojun Lee, Stephen Depuydt, Young-Tae Oh, Sung-Mo Lee, et Taejun Han. 2017. « The use of diatoms in ecotoxicology and bioassessment: Insights, advances and challenges ». *Water Research* 118 (Supplement C): 39-58. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.062>.
- Rimet, Frédéric, Agnès Bouchez, et Bernard Montuelle. 2015. « Benthic diatoms and phytoplankton to assess nutrients in a large lake: Complementarity of their use in Lake Geneva (France–Switzerland) ». *Ecological Indicators* 53 (juin): 231-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.008>.
- Rivera, S. F., V. Vasselon, S. Jacquet, A. Bouchez, D. Ariztegui, et F. Rimet. 2018. « Metabarcoding of Lake Benthic Diatoms: From Structure Assemblages to Ecological Assessment ». *Hydrobiologia* 807 (1): 37-51. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3381-2>.
- Smol, J. P., et Eugene F. Stoermer, éd. 2010. *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*. 2nd ed. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- Vasselon, Valentin, Agnès Bouchez, Frédéric Rimet, Stéphan Jacquet, Rosa Trobajo, Méline Corniquel, Kálmán Tapolczai, et Isabelle Domaizon. 2018. « Avoiding quantification bias in metabarcoding: Application of a cell biovolume correction factor in diatom molecular biomonitoring ». *Methods in Ecology and Evolution* 9 (4): 1060-69. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12960>.