



**HAL**  
open science

# Observatoire des lacs d'altitude : mise en place d'un suivi à long terme : comparaison de 20 lacs de haute montagne

Raphaëlle Napoléoni

## ► To cite this version:

Raphaëlle Napoléoni. Observatoire des lacs d'altitude : mise en place d'un suivi à long terme : comparaison de 20 lacs de haute montagne. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. dumas-01677211

**HAL Id: dumas-01677211**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01677211v1>**

Submitted on 10 Jan 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## L'Observatoire des lacs d'altitude :

Mise en place d'un suivi à long terme  
Comparaison de 20 lacs de haute montagne



Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur ENGEES  
Dominante d'approfondissement Gestion des Milieux Naturels

Raphaëlle NAPOLEONI

2016/2017

*Stage effectué du 03/04/2017 au 29/09/2017*

Maîtres de stage :

Carole BIRCK et Jean-Baptiste BOSSON (Asters)  
Isabelle DOMAIZON et  
Florent ARTHAUD (UMR-CARTEL)

Enseignants référents :

Philippe DURANT (AgroParisTech)  
Jean-Nicolas BEISEL (ENGEES)



- 1 :** Lac Leynir, Parc national du Grand Paradis, Italie (8 juillet 2017, R. Napoleoni)
- 2 :** Lac du Goléon, Parc national des Ecrins (14 juillet 2017, R. Napoleoni)
- 3 :** Lac de Pétarel, Parc national des Ecrins (17 août 2017 R. Napoleoni)
- 4 :** Lac de Pétarel, Parc national des Ecrins (17 août 2017, R. Napoleoni)
- 5 :** Lac Leynir, Parc national du Grand Paradis, Italie (8 juillet 2017, R. Napoleoni)

## L'Observatoire des lacs d'altitude :

Mise en place d'un suivi à long terme  
Comparaison de 20 lacs de haute montagne





## Résumé

Situés en haute montagne, les lacs d'altitude sont des écosystèmes remarquables. Bien qu'éloignés des villes et des principales sources de pollutions, leur évolution est directement modifiée par les changements climatiques et atmosphériques. D'une faible résilience, ils ont un rôle de sentinelles vis-à-vis des changements globaux.

Pourtant, les lacs d'altitude constituent un patrimoine naturel d'exception, tant d'un point de vue écologique et paysager que social et culturel. Dans les espaces protégés, l'enjeu est d'allier la préservation de ces écosystèmes fragiles et les activités humaines comme le pastoralisme, la randonnée, la pêche...

Le réseau « Lacs sentinelles » étudie le fonctionnement des lacs de montagne afin de mieux discerner les évolutions naturelles et celle liées aux changements locaux ou globaux. Pour cela, un suivi à long terme a été mis en place en 2015 avec la création de l'Observatoire des lacs d'altitude. Depuis deux ans, des données similaires sont recueillies dans 20 lacs des Alpes françaises. Elles permettent de connaître l'état écologique grâce à des mesures physico-chimiques et biologiques ainsi que la dynamique thermique annuelle des lacs. Chaque année ces analyses sont compilées dans un rapport.

Grâce aux résultats des années 2015 et 2016, une première comparaison des 20 lacs est possible. Des liens peuvent être formulés entre les paramètres mesurés et les caractéristiques des lacs et de leurs bassins versants. Bien qu'ils soient tous situés en altitude, les 20 lacs semblent offrir une grande diversité de milieux autant d'un point de vu physico-chimique que biologique.

## Abstract

Located in high altitude, high mountains lakes are outstanding ecosystems. Although situated in remote places far away from cities or pollution sources, they are impacted directly by climate change and atmospheric pollution. As they are not strongly resilient they are sentinels in regards to global changes.

Nevertheless, high mountains lakes are natural heritages from different points of views: ecologic and scenic and also cultural and social patrimony. To combine preservation of such sensitive environment and human activities as pastoralism, hiking or fishing is the objective in protected areas.

The network "Sentinels Lakes" studies mountain lakes behaviours to better discern natural changes and those caused by global or local changes. That's why they created the Observatory of mountain lakes and began a long term monitoring. Since 2015, similar data has been recorded in 20 lakes in the French Alps. With the data we can know the ecological status with physicochemical and biologic analysis as well as the annual thermic dynamic of the lakes. Every year, a report summarizes the analysis.

With the results from 2015 and 2016, a first comparison of the 20 lakes is possible. Links can be proposed between the characterisation of the lake or the watershed and water parameters. Although the 20 lakes are situated in high altitude, they seem to be really different in terms of physico-chemistry or biology.



## ① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

## ② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

## ④ Engagement :

Je soussignée Raphaëlle Napoleoni,  
Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Thonon-les-Bains, le 11/09/2017,

Signature : R. Napoleoni





## Remerciements

Je tiens à remercier les nombreuses personnes qui m'ont permis de réaliser ce stage dans de très bonnes conditions.

*Merci à toute l'équipe d'Asters pour son accueil à Pringy.*

*Merci à tous les membres de l'UMR-CARTELE de Thonon, j'ai été très bien accueillie dans ce magnifique domaine. Le logement pour les stagiaires est une vraie aide, je vous en remercie.*

Je souhaite remercier tout particulièrement mes maîtres de stage :

Carole BIRCK, chargée de mission expertise scientifique et technique, Asters,

pour son aide et son appui pour mieux comprendre l'organisation du réseau « Lacs sentinelles ». Merci pour la participation aux Rencontres internationales des lacs de montagnes en Italie, c'est un très bon souvenir et une belle vision de la coopération scientifique internationale. (Merci enfin pour les repas en lien avec les thématiques du jour).

Florent ARTHAUD, maître de conférences à l'Université de Savoie Mont Blanc,

pour ses connaissances et son aide sur le logiciel R, pour les analyses statistiques ainsi que pour son accueil à l'Université Savoie Mont Blanc.

Isabelle DOMAIZON, directrice de recherche à l'UMR CARTELE,

pour son accueil à Thonon et son aide précieuse pour répondre à mes questions à propos des études sur les lacs.

Jean-Baptiste BOSSON, chargé de projet scientifique, programme « Lacs sentinelles »,

pour avoir renforcé l'équipe des lacs sentinelles et pour sa participation à l'encadrement de mon stage, notamment pour la mise en page des fiches lac, les analyses des bassins versant et les exposés sur les glaciers.

Un grand merci pour votre accueil, votre confiance et vos relectures attentives. Grâce à ce stage, j'ai acquis de meilleures connaissances sur les lacs de haute montagne et leurs suivis scientifiques.

Je souhaite également remercier Aude SOUREILLAT, chargée d'étude à Asters pour son accueil au début de mon stage.

Je tiens à remercier tous les membres du réseau « Lacs sentinelles » : Clotilde SAGOT, Vincent CHANUDET, Vincent AUGÉ, Marie-France LECCIA et Frédéric RIMET pour les retours suite à mes nombreuses questions et les relectures du rapport du monitoring pour y déceler toutes les erreurs ou des points d'amélioration.

J'espère que ma présentation aux Rencontres du réseau « Lacs sentinelles » permettra de vous présenter ce travail plus en détail. Merci encore pour cette invitation.



# Table des matières

Remerciements.....	1
Table des figures.....	4
Table des tableaux.....	4
Liste des sigles et abréviations.....	5
<b>Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>A. Objectifs du stage.....</b>	<b>8</b>
<b>B. Contexte de l’Observatoire des lacs d’altitude.....</b>	<b>9</b>
1. L’Observatoire, une action phare du réseau Lacs sentinelles.....	9
2. La mise en place d’un suivi à long terme sur les lacs d’altitude.....	10
3. Partenariats et financements.....	11
<b>C. Les lacs de haute montagne, des écosystèmes complexes.....</b>	<b>13</b>
1. Dynamique thermique des lacs.....	13
2. Lacs, bassin versants et activités associées : conséquences sur la physico-chimie.....	15
3. Ecologie des lacs.....	17
4. Lacs de hautes montagnes et changements globaux.....	21
<b>D. Les outils mis en place par l’Observatoire des lacs d’altitude.....</b>	<b>22</b>
1. Le protocole commun.....	22
2. Base de données.....	24
3. Rapport annuel du monitoring.....	24
<b>E. Difficultés liées à la mise en place du suivi à long terme.....</b>	<b>30</b>
1. La réalisation du protocole.....	30
2. La perte de continuité avec les mesures passées.....	31
3. L’utilisation des données.....	31
<b>F. Comparaison des lacs.....</b>	<b>32</b>
1. Caractéristiques physiques des lacs.....	32
2. Comparaison de la dynamique thermique.....	40
3. Caractéristiques physico-chimiques de l’eau.....	43
4. Paramètres liés au réseau trophique du lac.....	46
5. Synthèse.....	49
<b>Conclusion.....</b>	<b>51</b>
Bibliographie.....	52
Liste de contact.....	54
Glossaire.....	55
ANNEXES.....	56

## Table des figures

Figure 1: Les membres du GIS Lacs sentinelles et leurs rôles .....	9
Figure 2: Localisation des lacs et lien avec les gestionnaires .....	11
Figure 3: Evolution de la température dans un lac selon la profondeur (PiburgerSee, juin 2015) .....	13
Figure 4 : Evolution des températures de surface et du fond du lac Cornu entre septembre 2014 et septembre 2016 .....	14
Figure 5: Evolution des différentes couches d'un lac dimictique dans l'année .....	15
Figure 6: Schématisation simplifiée du système lacustre dans son ensemble .....	16
Figure 7: Réseau trophique pélagique simplifié d'un lac .....	17
Figure 8 : Les cascades trophiques dans le réseau trophique des lacs .....	18
Figure 9: Différence de couleur du Lac Closell suite à l'élimination des poissons .....	18
Figure 10: Conséquences de l'apport excédentaire de nutriment sur le fonctionnement du lac .....	19
Figure 11: Disposition des capteurs de température permanents dans les lacs .....	24
Figure 12 : Méthodologie suivie pour créer le rapport monitoring 2016 .....	25
Figure 13 : Lac Blanc du Carro .....	25
Figure 14: Graphique présenté dans la fiche lac, évolution des températures du lac de Corne entre septembre 2015 et septembre 2016.....	26
Figure 15: Résultat de l'ACP sur la morphologie et la localisation des lacs (axe 1 et 2).....	34
Figure 16: Résultat de l'ACP sur la morphologie et la localisation des lacs (axe 1 et 3).....	35
Figure 17: Les variables et modalités retenues pour la caractérisation des bassins versants .....	36
Figure 18: Traces de moraines du petit âge glaciaire, étude du paysage à Argentièrre .....	37
Figure 19: Résultats de l'AFC : Carte factorielle des correspondances .....	38
Figure 20: Inertie expliquée par les axes, .....	38
Figure 21: Classification des lacs selon les caractéristiques du bassin versant .....	39
Figure 22: Définition des dates et périodes comparées entre les lacs.....	40
Figure 23: Résumé des corrélations entre la dynamique thermique des lacs et les caractéristiques physiques.....	42
Figure 24: Classement des lacs selon le $\Delta$ de concentration en $O_2$ .....	43
Figure 25: valeurs du pH mesuré dans les lacs les deux années .....	44
Figure 26: Classement des lacs selon la conductivité .....	45
Figure 27 : Concentration en chlorophylle-a des lacs d'Asters et d'EDF, mesures de 2015 et 2016 .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 28 : Concentrations en phosphore total des lacs d'Asters et d'EDF, mesures de 2015 et 2016 .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 29 : Comparaison de la richesse et de l'abondance en phytoplancton des lacs .....	48
Figure 30: Comparaison de la richesse et de l'abondance en zooplancton des lacs .....	48
Figure 31: Les 5 groupes de lacs différenciés selon les variables du lac et du bassin versant.....	49

## Table des tableaux

Tableau 1 : Limites de l'OECD pour définir les différents niveaux trophiques .....	20
Tableau 2: Résultats du test de corrélation (test de Spearman) entre les paramètres liés à la stratification hivernale et les caractéristiques des lacs .....	41
Tableau 3: Résultats du test de corrélation (test de Spearman) entre les paramètres liés à la température estivale et les caractéristiques des lacs .....	41
Tableau 4: Détermination de l'état de stratification des lacs selon l'année .....	43



## Liste des sigles et abréviations

<b>AFB :</b>	Agence française pour la biodiversité
<b>ACP :</b>	Analyse en composantes principales
<b>AFC :</b>	Analyse factorielle des correspondances
<b>AllEnvi :</b>	Alliance nationale de recherche pour l'environnement
<b>BV :</b>	Bassin versant
<b>CAH :</b>	Classification ascendante hiérarchique
<b>CEN :</b>	Conservatoire d'espaces naturels
<b>GIS :</b>	Groupeement d'intérêt scientifique
<b>OECD :</b>	Organisation de coopération et de développement économique
<b>OLA :</b>	Observatoire des lacs alpins
<b>ONEMA :</b>	Office national de l'eau et des milieux aquatiques
<b>PNE :</b>	Parc national des Ecrins
<b>PNM :</b>	Parc national du Mercantour
<b>PNV :</b>	Parc national de la Vanoise
<b>SI :</b>	Système d'information. Plateforme de stockage des données
<b>SOERE :</b>	Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement
<b>Thermistor :</b>	Capteur de température haute-fréquence
<b>UMR-CARTEL :</b>	Unité mixte de recherche – Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques des écosystèmes lacustres
<b>UMR-IMBE :</b>	Unité mixte de recherche – Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale





## Introduction

En montagne, les lacs attirent les randonneurs, les pêcheurs, les photographes... ils ont le sentiment de se retrouver face à un environnement d'exception. Les lacs d'altitude représentent un patrimoine à la fois naturel, culturel et social. Ce sont des écosystèmes singuliers qui font face à des conditions climatiques particulières du fait de leur localisation. Situés au moins à 1500m (*Programme inter-parcs, 1986*), les lacs d'altitude ou de montagne, sont définis comme des plans d'eau permanents (*CEMAGREF, 1985*) peu profonds et recouverts de glace pendant une longue période de l'année. De ce fait, l'écosystème associé est limité et adapté aux contraintes du milieu (*Chacornac, 1986, Martinot, 1979*). C'est également le lieu d'activités humaines assez diverses : randonnée, pêche, pastoralisme, production d'hydro-électricité. Le paysage lié au lac est un attrait important.

Loin des villes, hauts en altitude, les lacs paraissent naturels et préservés de la pollution anthropique. À juste titre, l'éloignement des lacs d'altitude permet de les protéger des impacts directs des sociétés. Par contre, d'autres conséquences des pollutions humaines atteignent toutefois les lacs. De nombreuses recherches montrent que les lacs d'altitude reçoivent des pollutions atmosphériques telles que des polluants organiques, des acides ou des métaux lourds (*Carrera et al, 2000, Camarero et al, 2009*). De plus, comme tous les écosystèmes, ils sont sensibles aux changements globaux : changement climatique entraînant une modification de la pluviométrie, fonte des glaciers,...qui induisent des modifications de la biodiversité des milieux.

Ainsi les lacs d'altitude jouent un rôle de sentinelles vis-à-vis des changements globaux.

Grâce à la détermination d'un groupe de scientifiques et de gestionnaires d'espaces protégés, le réseau « Lacs sentinelles » a été mis en place pour étudier les lacs d'altitude. En effet, en comparaison aux lacs de plaine, peu de connaissances sont disponibles.

Les grandes questions auxquelles cherchent à répondre le réseau sont les suivantes :

- > *Comment évoluent ces milieux ?*
- > *Quels sont les impacts des activités humaines sur ces écosystèmes ?*
- > *Quelle place tient le changement climatique dans leurs évolutions ?*
- > *Comment diagnostiquer et réagir à d'éventuels dysfonctionnements ?*

Pour se faire, le réseau a mis en place un Observatoire des lacs d'altitude en 2015. Le but est d'homogénéiser les données recueillies afin de pouvoir réaliser un suivi à long terme de l'évolution de ces lacs dans les années à venir. Le suivi permettra d'étudier l'écologie du lac, autant sur la qualité physico-chimique de l'eau que sur la biologie.

Les suivis à long terme permettent d'étudier l'évolution des milieux, l'impact des changements globaux et la réponse des écosystèmes. Comme le dit J. Magnuson dans son article *The invisible present* (« *le présent invisible* », *Magnuson, 1990*), « tout autour de nous change sans arrêt ». Il est impossible d'interpréter les causes de ces changements du présent, elles sont très complexes car elles sont dues à de nombreux phénomènes à différentes échelles spatiales et temporelles. À l'inverse des observations actuelles, les suivis de long terme permettent de s'affranchir de certaines variables. Ainsi, dans le cadre des études liées aux changements globaux, seuls des suivis à long terme permettent de dissocier les fluctuations « naturelles » des conséquences liées aux activités humaines. Les suivis à long terme permettent d'éviter des erreurs d'interprétation et aident à une meilleure compréhension du fonctionnement du « présent invisible ».

Ce mémoire de stage de fin d'étude a pour but de détailler la mise en place du suivi à long terme des lacs d'altitude et de proposer une première comparaison des lacs étudiés. Les outils de l'Observatoire ainsi que les difficultés liées à sa mise en place sont explicitées. Les premières données recueillies permettent ensuite de réaliser une comparaison des lacs.

## A. Objectifs du stage

Le sujet de mon stage, proposé par le réseau « Lacs sentinelles » est la *Synthèse des données de l'Observatoire des lacs d'altitude et une analyse critique des protocoles*.

Depuis deux ans, les moyens mis en place par le réseau *Lacs sentinelles* permettent de réaliser un suivi annuel de 20 lacs de montagne situés dans les Alpes françaises. Pour continuer ce programme et valoriser les résultats, Asters (Conservatoire des espaces naturels de Haute-Savoie) et l'UMR-CARTELE (Unité mixte de recherche – Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques des écosystèmes lacustres) ont proposé un stage de six mois ayant pour objectifs :

- La réalisation du rapport annuel présentant les résultats 2016 pour les 20 lacs
- L'analyse des résultats et une comparaison entre les années 2015 et 2016
- L'évaluation de la pertinence et des biais du protocole commun

Asters est une association type loi 1901 qui œuvre pour la préservation, la connaissance et la gestion des espaces naturels et des espèces de Haute-Savoie, ainsi que pour l'information et la sensibilisation du public à propos de ces sujets. La connaissance des milieux naturels passe par une acquisition de données sur le terrain et une mise en relation avec des chercheurs. Asters est gestionnaires de 41 sites dont les 9 réserves naturelles de Haute-Savoie.

Le CARTELE est un laboratoire de recherche situé à Thonon-les-Bains et au Bourget du lac. C'est un établissement issu de la collaboration entre l'Institut national de recherche agronomique (INRA) et l'Université Savoie-Mont Blanc. Leur spécialisation est la recherche sur les écosystèmes lacustres, historiquement dans les grands lacs alpins (lac du Bourget, lac d'Annecy et lac Léman) et plus récemment sur les lacs d'altitude.

La première étape a été la création du rapport sur le monitoring de l'année 2016. La méthode de réalisation a été modifiée et une nouvelle forme finale du rapport, différente de la version 2015, a été proposée. Cette phase a nécessité la modification et la mise au point d'un code *RStudio* réalisé lors du stage de Louise Fritz (Fritz, 2016) et la prise en main du logiciel de mise en page *Indesign*. De plus, les données que j'utilisais n'étaient pas toutes disponibles, il a été nécessaire de contacter de nombreux partenaires afin de disposer du jeu de données complet.

En parallèle, j'ai réalisé des analyses de comparaison entre les données des années 2015 et 2016 pour les 20 lacs suivis, afin d'évaluer les différences inter-annuelles et inter-lac. Un grand nombre de données sont disponibles sur la physico-chimie de l'eau, la biologie ainsi que sur les températures des lacs. Les comparaisons ont nécessité l'utilisation d'outils statistiques. Le but n'était pas de détailler les connaissances acquises sur chaque lac mais de donner une vue d'ensemble du statut des lacs.

Ce travail de comparaison des lacs s'intègre dans une volonté de créer une typologie des lacs de montagne. C'est une première étape vers l'utilisation des données recueillies durant ces deux années.

Enfin, un des fils conducteurs de ce stage était une réflexion sur la pertinence du protocole. L'utilisation des données pour le rapport du monitoring et pour la comparaison des lacs a mis en lumière certaines limites dans le protocole actuel. Cette partie a fait l'objet de discussions avec les membres du réseau et d'un rapport spécifique. De plus, les différences de protocole mises en lumière ont rendu certaines analyses prévues non pertinentes (notamment pour les données relatives au niveau trophique du lac : planctons et concentrations en chlorophylle-a).

J'ai également eu la chance de participer aux Rencontres internationales sur la conservation des lacs de haute montagne à Ceresole dans le Parc national du Grand Paradis. Durant deux jours, des intervenants européens et américains ont détaillé des travaux de recherche et de gestion sur les lacs d'altitude. Avec Carole Brick, nous avons pu présenter le réseau *Lacs sentinelles* et les premiers résultats de comparaison des lacs. Enfin, il est prévu que je présente mon travail à tous les membres du réseau, lors des Rencontres annuelles du réseau *Lacs sentinelles* en octobre 2017.

## B. Contexte de l'Observatoire des lacs d'altitude

### 1. L'Observatoire, une action phare du réseau Lacs sentinelles

Le réseau *Lacs sentinelles* a pour vocation de coordonner les recherches sur les lacs d'altitude des Alpes françaises pour améliorer la connaissance et suivre l'évolution de ces milieux.

À la suite d'un projet sur la ressource en eau dans les aires protégées de l'Arc alpin (programme européen Aqua), les scientifiques et gestionnaires d'espaces naturels ont identifié la nécessité de créer une structure commune pour mutualiser les moyens et les connaissances autour des lacs de montagne. En 2010, les premières rencontres du réseau *Lacs sentinelles* sont organisées et c'est en 2012 que le Groupement d'intérêt scientifique (GIS) *Lacs sentinelles* est créé.

Le GIS est un dispositif contractuel de collaboration, il permet de fédérer des moyens et de déployer des actions de recherche sur une thématique définie, par le biais d'une convention constitutive.

#### **Les acteurs :**

Le réseau réunit des scientifiques, des gestionnaires d'espaces naturels et des usagers des lacs d'altitude (cf. Figure 1).

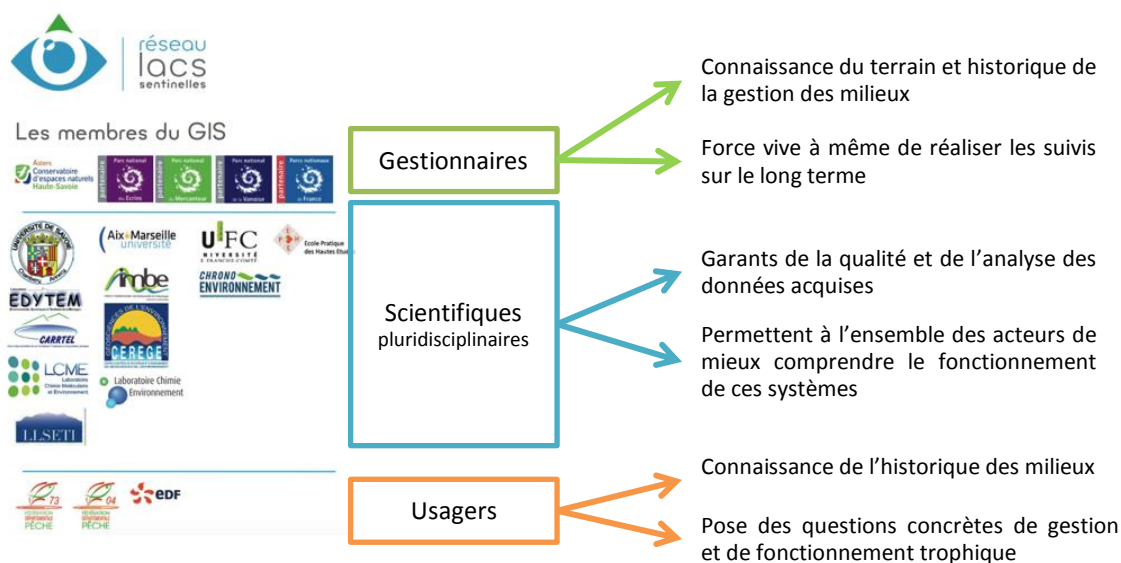


Figure 1: Les membres du GIS Lacs sentinelles et leurs rôles

Chaque année des rencontres du réseau *Lacs sentinelles* sont organisées. Le but est de réunir tous les membres du GIS, cela permet d'avoir une vision globale sur les avancées de l'année et c'est aussi l'occasion d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherche.

#### **Organisation :**

Le GIS est constitué de trois instances :

- > Le Conseil de groupement
- > La Commission de coordination scientifique
- > Le Secrétariat pour l'animation et la coordination.

Le Conseil de groupement est l'instance décisionnelle concernant les activités et les financements. La Commission de coordination scientifique est un organe consultatif composé de chercheurs, son rôle est de proposer des actions et d'être garant de la pertinence et de la qualité des activités du GIS. Enfin le secrétariat assure l'animation et la coordination du GIS, il est porté par le Conservatoire des espaces naturels de Haute-Savoie (Asters).

### **Les actions majeures du réseau :**

- Veille scientifique

Le réseau regroupe les connaissances acquises sur les lacs de montagne, pour cela une veille scientifique de nouveaux articles est réalisée par les membres. Tous les articles scientifiques ou rapports d'activités sont regroupés sur le site internet du réseau.

- Observatoire des lacs d'altitude des Alpes françaises (cf. B.2. *La mise en place d'un suivi à long terme sur les lacs d'altitude*)

- Recherche spécifique sur des sites ateliers

Sur certains lacs, des scientifiques mènent des recherches sur un thème particulier. Le lac concerné est alors doté de nombreux appareils de mesure pour répondre à cette question de recherche.

- Communication

Des flyers et des posters présentant les lacs sont disponibles dans les offices de tourisme ou dans les refuges de montagne. Le site internet est accessible à tous, le but est d'informer au maximum de la fragilité des milieux. Le réseau a également participé à plusieurs films documentaires toujours dans l'optique de sensibiliser le grand public.



Un autre volet de la communication est la participation à des grands rendez-vous comme une présentation à la COP 21 ou à la journée d'échange de la SFE (Société Française d'Ecologie) ou encore aux Rencontres internationales sur la conservation des lacs de haute montagne en Italie au mois de juillet 2017.

## **2. La mise en place d'un suivi à long terme sur les lacs d'altitude**

Les lacs d'altitude sont des milieux peu étudiés par rapport au lacs de plaine. Ce sont pourtant des milieux pertinents pour étudier les changements globaux. Ils sont sensibles aux modifications du climat et aux pollutions atmosphériques.

Dans les lacs d'altitude, les bassins versants sont relativement protégés de la pollution diffuse d'origine anthropique par rapport aux systèmes de plaines, même si dans certaines zones, le pastoralisme et les rejets des refuges ont un impact. De ce fait, les changements observés qui diffèrent de l'évolution naturelle du lac, peuvent être en (grande) partie imputés aux changements climatiques et aux pollutions atmosphériques. Les lacs d'altitude sont donc des sentinelles des changements globaux.

La mise en place d'un suivi à long terme a pour but d'analyser l'évolution des lacs d'altitude dans les années à venir afin de répondre à des questions liées au réchauffement des eaux en été, aux adaptations du réseau trophique, à la modification de la dynamique annuel du lac ... L'objectif est de suivre la réponse du lac aux changements induits par les hommes.

Le deuxième volet de l'Observatoire est d'étudier des solutions de gestion aux problématiques locales. En plus du dérèglement climatique, d'autres menaces pèsent sur les lacs. Elles sont liées aux usages des lacs et de leurs bassins versants : pastoralisme, tourisme, pêche et introduction de poissons. Des solutions pérennes, conciliant respect de la biodiversité et activités humaines, peuvent être apportées en ce qui concerne la gestion du bassin versant.

C'est dans ce contexte que le réseau *Lacs sentinelles* a mis en place un Observatoire des lacs d'altitude, pour effectuer un suivi à long terme de l'évolution des lacs. Vingt lacs ont été choisis dans les Alpes françaises (cf. Figure 2).

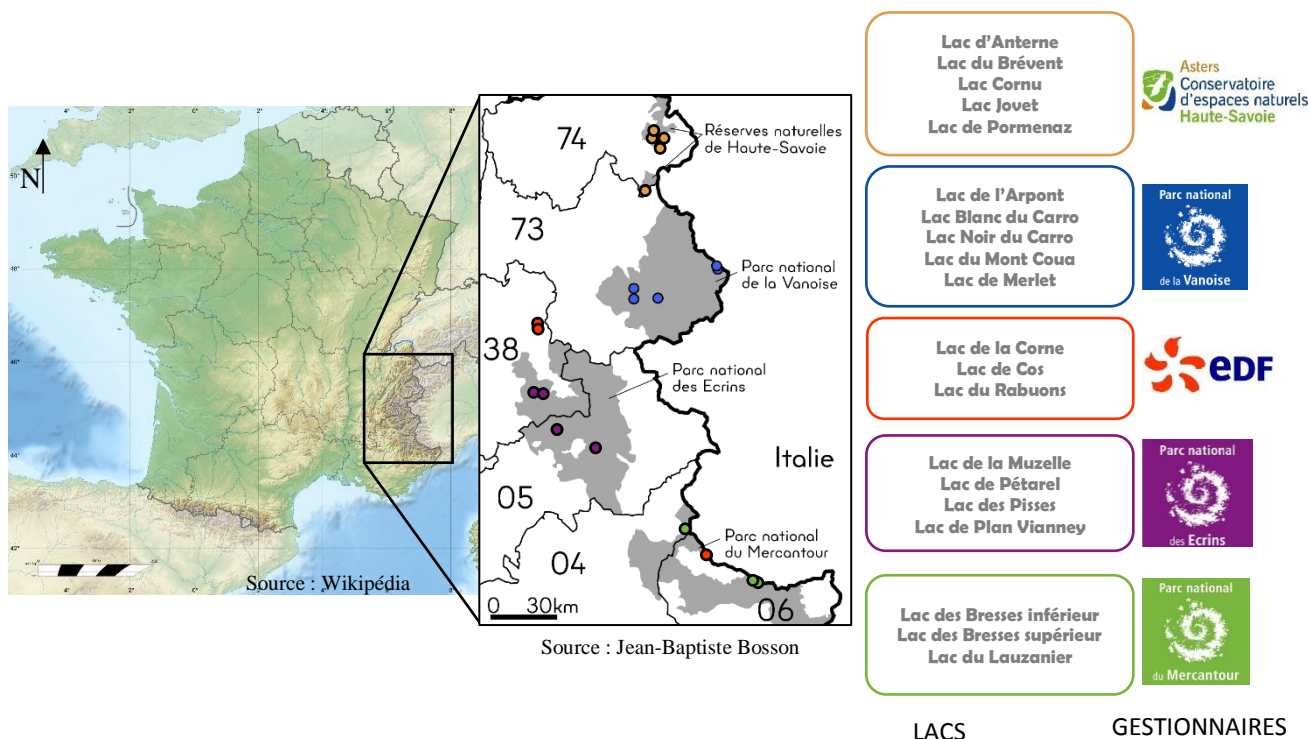


Figure 2: Localisation des lacs et lien avec les gestionnaires

Le réseau a mis en place un protocole commun d'analyse et un regroupement de toutes les données disponibles sur une base de données commune (cf. *D. Les outils mis en place par l'Observatoire des lacs d'altitude*).

### 3. Partenariats et financements

La mise en place d'un suivi sur le long terme nécessite différents partenariats entre :

- Les gestionnaires : pour la réalisation des mesures et des prélèvements sur le terrain
- Les laboratoires : pour l'analyse des échantillons du lac
- Les scientifiques : pour l'interprétation des résultats

Aujourd'hui, le réseau compte cinq gestionnaires : Asters, le Parc national de la Vanoise (PNV), le Parc national des Ecrins (PNE), le Parc national du Mercantour (PNM) et le Centre d'ingénierie hydraulique d'EDF (CIH-EDF). Deux laboratoires réalisent les analyses : l'Unité mixte de recherche du Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et écosystèmes lacustres (UMR-CARTEL) à Thonon-les-Bains et l'Unité mixte de recherche de l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (UMR-IMBE) à Marseille.

D'autres collaborations sont envisagées pour agrandir le réseau et le nombre de lacs étudiés, notamment avec le Parc national des Pyrénées et le Parc naturel régional de Corse. Un partenariat est en cours avec le Parc national Suisse qui a mis en place le même protocole sur certains lacs suisses.

Enfin, un projet de recherche européen incluant les Alpes française, italiennes et suisses devrait voir le jour en 2018. Un des thèmes est les observatoires d'espaces sentinelles : lacs, alpages, refuges, rivières ... Avec ce projet, le réseau *Lacs sentinelles* aurait la possibilité de s'étendre à d'autres régions alpines.

#### Financements :

Depuis la création du réseau, en 2010, les financements pour le fonctionnement du réseau et pour l'Observatoire sont obtenus grâce à trois partenaires majeurs : l'Union européenne, l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et EDF.

D'autres instances financent en partie le projet comme la région PACA (Provences Alpes Côte d'Azur), le CGET (Commissariat général à l'égalité des territoires), l'AFB (Agence française pour la biodiversité ex-ONEMA), le département de Haute-Savoie, le Fonds National d'aménagement et de développement du territoire, la Fondation de France et la Fondation Caisse d'épargne Rhône-Alpes.

Le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional) permet de financer des projets via un Programme opérationnel interrégional du massif des Alpes (POIA) tel que le projet *Lacs sentinelles*.

Le nom du projet est : « Les lacs d'altitude, sentinelles pour le suivi des changements globaux des Alpes françaises ». Ce financement implique de nombreuses attentes comme le partage des connaissances obtenues, l'accessibilité des données, la diffusion des résultats au grand public ... Des retours précis sur l'utilisation du budget alloué sont également attendus. Les aides permettent d'acheter du matériel (comme des sondes ou capteurs), de financer les moyens humains (poste d'animation du réseau, projet de recherche, thèses...) et la réalisation des analyses par les laboratoires.



D'autres réseaux s'appuient sur un fonctionnement différent. Par exemple, l'Observatoire des Lacs alpins (OLA) est un observatoire labellisé SOERE (cf. encadré ci-contre) par AllEnvi (Alliance nationale de recherche pour l'environnement). Ce label permet d'acquiescer d'autres financements que ceux des organismes portant le projet, comme des aides du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Pour exemple, OLA fait des suivis depuis les années 1960 sur le lac Léman.

L'Observatoire des lacs d'altitude n'est pas labellisé SOERE et n'a pas vocation à le devenir. La différence majeure entre l'Observatoire des lacs alpins (labellisé SOERE) et l'Observatoire des lacs d'altitude est que le premier est porté par des laboratoires de recherche alors que le second est une initiative des gestionnaires. L'Observatoire des lacs d'altitude ne peut donc pas recevoir de financement attribué à la recherche car il réalise uniquement le premier volet de la démarche soutenue par AllEnvi : Observation – Expérimentation – Modélisation. À l'heure actuelle, seule l'observation des lacs d'altitude est réalisée, il n'y a ni expérimentation ni modélisation.

L'Observatoire des lacs d'altitude a donc un fonctionnement différent de OLA. Il est prévu que les scientifiques partenaires du réseau s'approprient les données recueillies et publient des résultats. En effet, les écosystèmes lacustres d'altitude sont aujourd'hui bien moins étudiés que ceux des plaines. Ce sont pourtant des milieux au fonctionnement particulier du fait de leur situation en tête de bassin versant.

### Qu'est-ce qu'un SOERE ?

Un Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement.

C'est un dispositif national, mis en place par le programme AllEnvi pour *Programmer et coordonner la recherche environnementale française*. La recherche sur l'environnement nécessite un investissement sur le long terme pour étudier les variabilités spatiales et temporelles des écosystèmes. La démarche soutenue par AllEnvi est Observation- Expérimentation-Modélisation. Le but est également de répondre aux problèmes récurrents relatifs aux partages, à la représentativité des données et à l'interopérabilité entre bases de données. Pour cela, les SOERE ont pour objectif de stocker les données recueillies sur un système d'information (SI).

Source :

<https://www.allenvi.fr/groupe-transversaux/infrastructures-de-recherche/les-soere/que-sont-les-soere>

## C. Les lacs de haute montagne, des écosystèmes complexes

Les lacs sont des écosystèmes complexes, dont l'état écologique dépend de nombreux paramètres. Leur fonctionnement général dépend des conditions morphologiques et des conditions géographiques du lac mais également de paramètres en lien avec géologie, l'occupation du bassin versant et la productivité biologique.

Trois points majeurs pour comprendre le fonctionnement d'un lac sont présentés ci-dessous.

- > La dynamique thermique qui contribue à la régulation du fonctionnement hydrologique du lac.
- > Les paramètres liés au bassin versant et leurs conséquences sur la physico-chimie de l'eau.
- > L'écologie des lacs et le lien avec le bon état des masses d'eau défini par la DCE.

Les spécificités pour les lacs de montagne seront précisées.

### 1. Dynamique thermique des lacs

Les propriétés physiques de l'eau engendrent une dynamique particulière dans les lacs, liée à la température ainsi qu'à la densité de l'eau. C'est à la température de 4°C que la densité de l'eau est maximale.

#### a. La stratification verticale

En observant un profil de température estivale réalisé dans la colonne d'eau de certains lacs, la stratification thermique du lac peut être observée (cf. Figure 3).

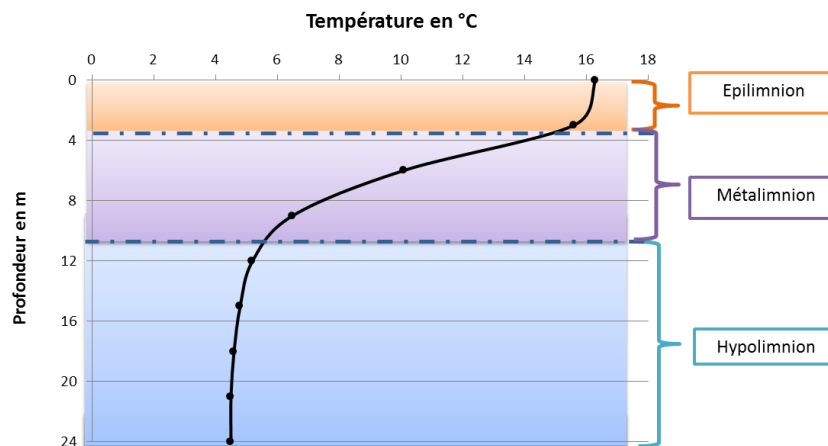


Figure 3: Evolution de la température dans un lac selon la profondeur (PiburgerSee, juin 2015)

De la surface aux eaux plus profondes, on distingue trois zones :

- > L'épilimnion : C'est la couche de surface. Elle est régulièrement brassée par des courants engendrés par les vents. La température de l'eau est élevée en été du fait du contact avec l'atmosphère. En hiver, c'est à la surface que les températures les plus froides sont enregistrées.
- > Le métalimnion : C'est une couche de transition entre l'épilimnion et l'hypolimnion. La température descend rapidement. Dans les lacs riches en nutriments, la décomposition des matières organiques en fait une zone faible en oxygène. À l'inverse, si la lumière peut pénétrer jusqu'à cette profondeur, la photosynthèse est possible et la concentration en oxygène est élevée.
- > L'hypolimnion : Plus en profondeur, l'hypolimnion est une couche épaisse et homogène. La température de l'eau influe directement sur sa densité. C'est à 4°C que l'eau est la plus dense, en profondeur la température minimum est donc de 4°C.

Au niveau du métalimnion, la zone de forte transition thermique est appelée la thermocline (gradient thermique). Elle est définie par une diminution de 1°C par mètre au minimum. Plus en profondeur, entre l'épilimnion et l'hypolimnion, la zone de transition est la chemocline car les concentrations chimiques en éléments sont différentes entre les deux couches (gradient chimique).

## b. Evolution annuelle pour les lacs dimictiques

Dans les lacs du réseau, des capteurs mesurent en permanence la température à différentes profondeurs. Ce type de dispositif permet de suivre la dynamique thermique sur l'année. La Figure 4 montre l'évolution des températures entre septembre 2014 et septembre 2016 dans le lac Cornu. Plusieurs périodes sont facilement repérées sur ce type de graphique.

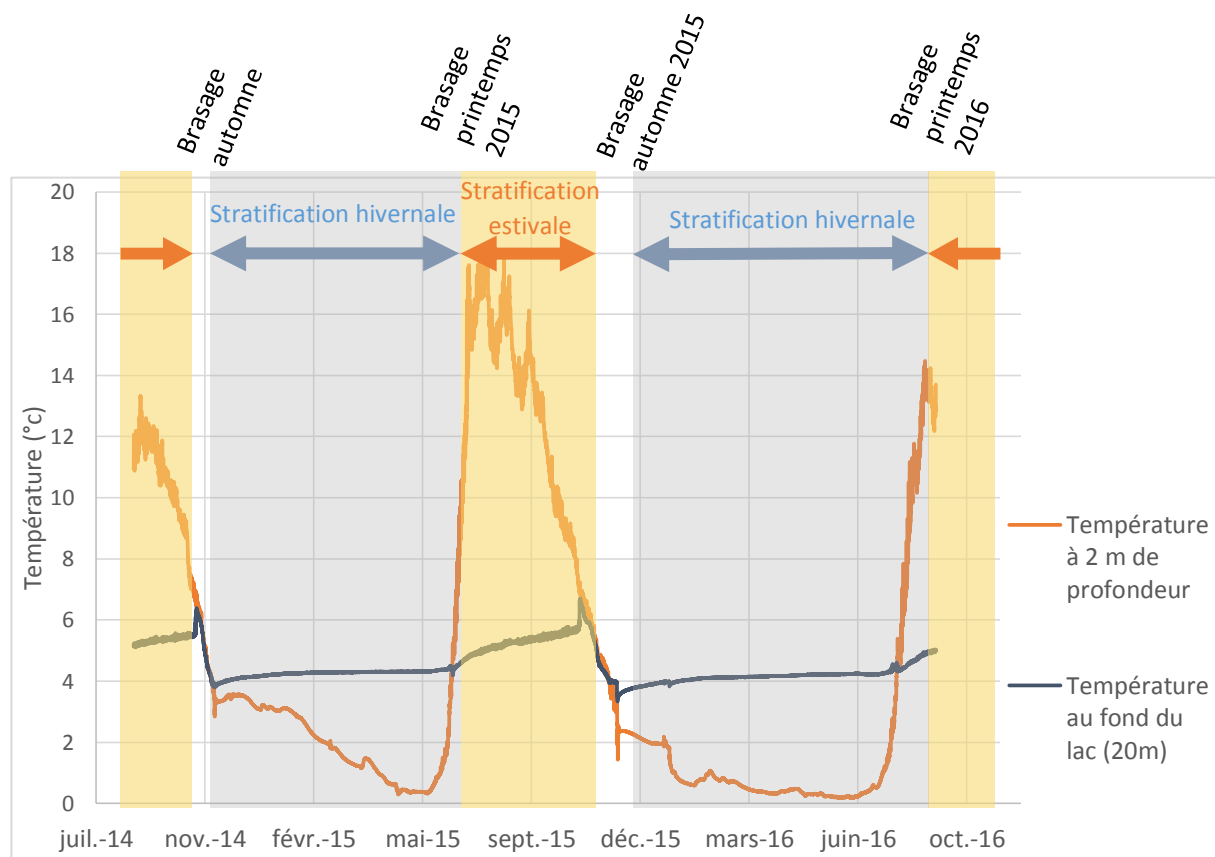


Figure 4 : Evolution des températures de surface et du fond du lac Cornu entre septembre 2014 et septembre 2016

La présence de périodes de mélange et de stratification est due aux différences de densité entre les couches d'eau, principalement liées aux écarts de température.

**La stratification estivale :** La température de surface est assez élevée alors que la température en profondeur reste stable. L'eau de surface est donc peu dense, elle ne peut pas être emmenée au-delà d'une limite déterminée par l'énergie du vent par rapport aux forces créées par la densité des eaux. Cette limite correspond à la limite basse de la couche épilimnion. Dans les lacs de plaine, la température en profondeur augmente en été. Dans les lacs de montagne, l'eau du fond du lac reste à la température de 4°C. C'est à cette époque de l'année que l'on peut distinguer au mieux les couches liées à la stratification verticale.

**Le brassage automnal :** Les orages de fin d'été et les vents associés engendrent une période de brassage car les eaux de surface se refroidissent et atteignent la même température et donc la même densité que les eaux en profondeur. Le moteur du mélange des eaux est la force induite par le vent en surface. C'est un processus progressif qui dure plusieurs jours et jusqu'à plusieurs semaines en montagne.

**La stratification hivernale** Les eaux superficielles sont plus froides que les eaux profondes. Les eaux profondes gardent une température de 4 °C alors que les eaux de surface refroidissent du fait des faibles températures extérieures. Dans les cas des lacs de montagne, cette stratification est renforcée par la présence d'une épaisse couche de glace en surface.

**Le brassage printanier :** Au printemps, l'eau de surface se réchauffe grâce aux rayons du soleil et sa température passe au-dessus de 4 °C. Elle est alors à la même densité que l'eau de l'hypolimnion, le brassage des eaux peut avoir lieu. Les courants provoqués par les vents permettent de mélanger



les couches du lac. Dans le cas des lacs de montagne, ce processus est lié à la fonte de la couche de glace et à une importante arrivée d'eau liée à la fonte des neiges du bassin versant. Dans les lacs de plaine, c'est un processus assez instable qui dure plusieurs semaines, dû à une alternance de période de début de stratification puis de légers brassages. En montagne, c'est beaucoup plus rapide, en maximum quelques jours, le brassage est effectué et la stratification estivale se met en place.

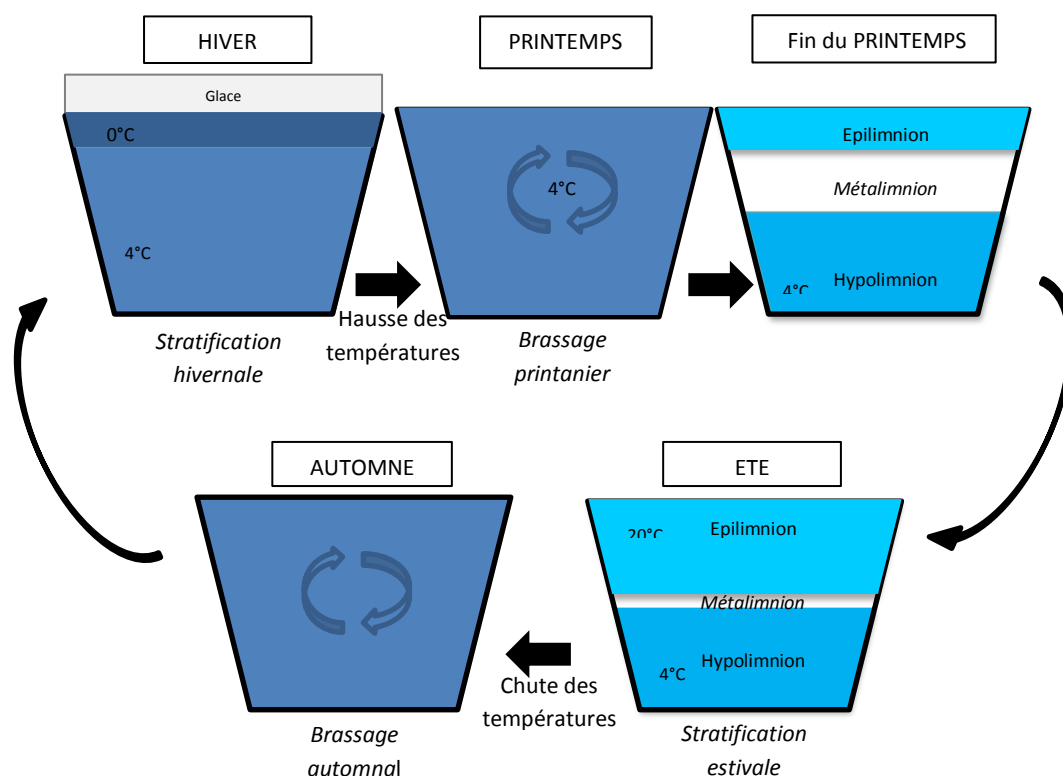


Figure 5: Evolution des différentes couches d'un lac dimictique dans l'année

De manière plus générale, le nombre de mélange par an varie selon le type de lac. Les lacs monomictiques subissent une seule période de brassage, en saison froide. Les lacs dimictiques sont mélangés à l'automne et au printemps (cf. Figure 5). Il existe également des lacs polymictiques qui ont plusieurs périodes de brassages dans l'année et des lacs stratifiés en permanence. Ces derniers sont peu communs, ce sont des lacs profonds.

Les lacs de l'Observatoire semblent être tous des lacs dimictiques (au vu de deux années de données). La plupart des lacs d'altitude sont en fait des lacs dimictiques ou polymictiques. En effet, la présence de glace en hiver engendre un brassage avant la prise en glace et un brassage lors du dégel. D'autres brassages peuvent survenir car l'eau froide provenant des affluents peut modifier la stratification.

## 2. Lacs, bassin versants et activités associées : conséquences sur la physico-chimie

Les lacs sont des écosystèmes complexes, ils interfèrent avec le milieu alentour. Les apports liés à l'atmosphère, au bassin versant et aux sédiments modifient la composition des eaux du lac (cf. Figure 6). Les précipitations peuvent apporter au lac différentes pollutions contenues dans l'air. C'est le cas de pollution actuelle mais également de pollution ancienne. La concentration en métaux lourds dans l'atmosphère a été multipliée par 1,5 depuis l'époque pré-industrielle, les concentrations en métaux dans les lacs ont de ce fait également augmenté. Dans les lacs alpins européens, le plomb et le mercure sont les éléments les plus abondants (Camarero et al, 2009). Dans les lacs d'altitude, une grande partie des précipitations est d'abord transformé en neige avant de rejoindre le lac. La neige piège les polluants de

type PCB (polychlorobiphényles) et HCH (insecticide organochloré) (Carerra et al, 2001). Lorsqu'elle fond, elle devient une source de pollution à ces composés pour les lacs d'altitude (Catalan et al, 2009). L'eau issue des précipitations, de la fonte des neiges et des glaciers traverse le bassin versant pour arriver au lac. Toutes les caractéristiques du bassin versant ont des conséquences sur les propriétés des eaux du lac. La géologie explique la minéralisation du lac, c'est-à-dire la présence des ions issus de la dissolution des roches. Les concentrations des eaux en nutriments dépendent de l'occupation du sol car les apports d'azote et de phosphore proviennent majoritairement du sol et de la dégradation de la matière organique. Dans les lacs de plaine, une partie des nutriments apportés au lac sont dû à l'amendement des terres agricoles du bassin versant et aux rejets des stations de traitements. Dans le cas des lacs de montagne, l'occupation du sol et la présence de pâtures sont les deux principales causes d'apports. Les zones végétalisées génèrent des débris qui augmentent la matière organique dans le lac en se dégradant. La présence de moutons ou de vaches favorise le transfert du phosphore et de l'azote dans les eaux. Ces nutriments sont essentiels à la productivité biologique dans le lac mais ils constituent également une menace d'eutrophisation (cf. C. 3. c. Le « bon état » d'un lac). Selon les concentrations en nutriments du lac, les sédiments peuvent stocker ou relarguer certains composés, comme le phosphore par exemple

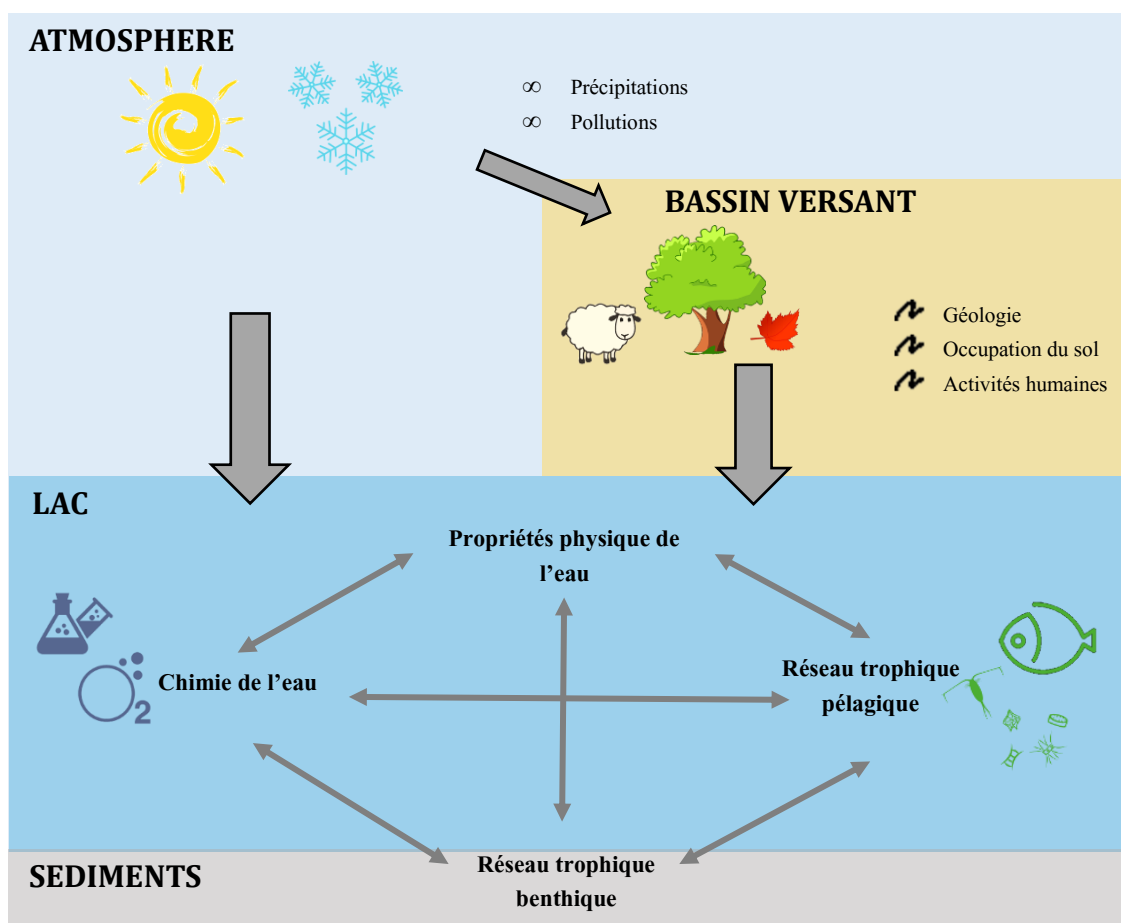


Figure 6: Schématisation simplifiée du système lacustre dans son ensemble

Dans le cas des lacs de montagne, les bassins versants sont petits et peu occupés par les activités humaines.

Les eaux du lac sont relativement pauvres en nutriment, ils sont d'une faible résilience face aux apports de phosphore ou d'azote supplémentaires.

### 3. Ecologie des lacs

Les milieux aquatiques sont de manière générale des milieux riches en biodiversité. Les lacs abritent une grande richesse : végétaux, micro-organisme, planctons, poissons, amphibiens, insectes ...

Cependant, les lacs de montagne montrent généralement une faible productivité biologique. Une des explications est liée aux conditions climatiques extrêmes qui caractérisent ces environnements (Chacornac, 1986). De plus ce sont des systèmes isolés car ils sont situés en tête de bassin versant, ce qui limite la probabilité de dispersion des espèces .

#### a. Le réseau trophique

Le réseau trophique est l'ensemble des interactions biotiques entre les espèces présentes (c'est-à-dire la biocénose) permettant d'identifier les voies de transfert de matière et d'énergie dans l'écosystème. Cela inclue donc notamment les relations de prédation, parasitismes, saprophytisme, recyclage et décomposition de matière organique.

Le réseau trophique pélagique simplifié dans un lac est schématisé sur la Figure 7. Les premiers maillons de la chaîne sont le phytoplancton qui se nourrit des nutriments minéraux et réalise la photosynthèse. La concentration en chlorophylle-a en été est directement dépendante de la concentration en phosphore au printemps (Dillon et Riglet, 1974). La présence de phosphore en forte concentration engendre un meilleur développement du phytoplancton et donc une hausse de la concentration en chlorophylle-a.

Le phytoplancton est une ressource importante pour le zooplancton (filtreurs herbivores en particulier). Le zooplancton est la base de l'alimentation des poissons planctivores, consommés par les poissons piscivores.

Cependant, en plus de cette chaîne linéaire herbivore, il est important de prendre en compte le rôle des bactéries qui décomposent la matière organique et recyclent donc les éléments nutritifs, ainsi que le rôle de la boucle microbienne qui via la présence des bactériovores créé un lien trophique entre bactéries et zooplancton. Par ailleurs, les interactions parasitaires participent à la régulation de leurs hôtes.

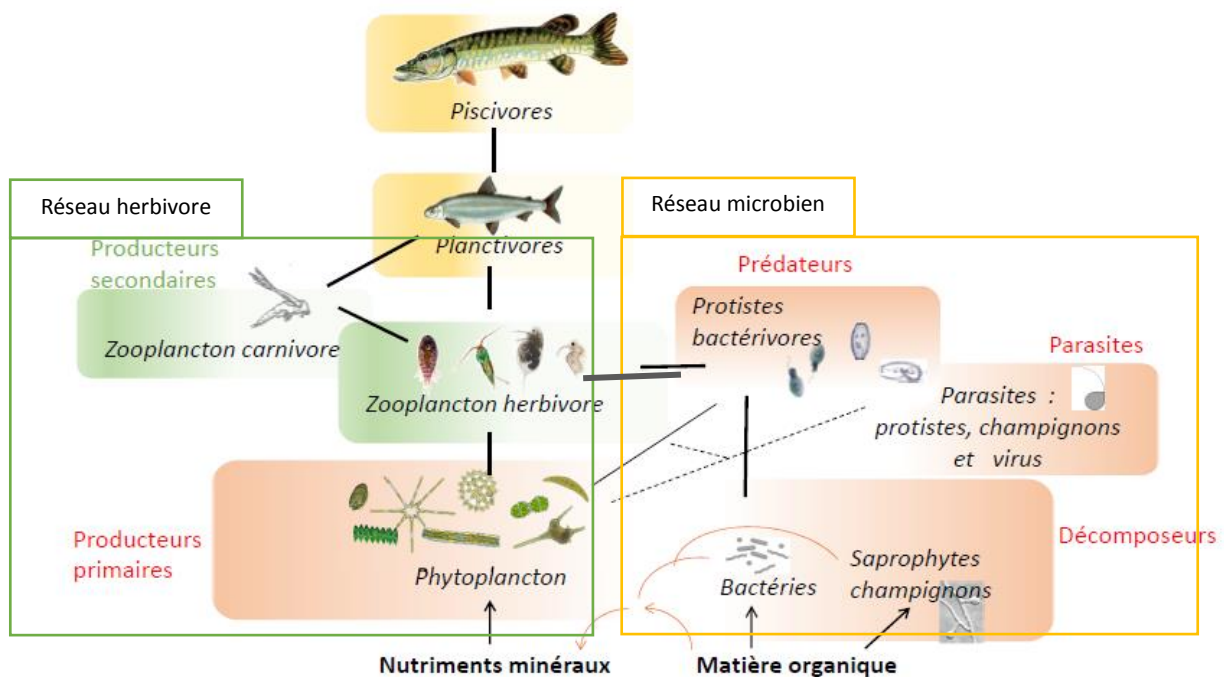


Figure 7: Réseau trophique pélagique simplifié d'un lac  
(Source : Isabelle Domaizon, UMR CARTELE)

Le réseau trophique est contrôlé à la fois par les ressources disponibles pour les producteurs primaires et par l'abondance des prédateurs. Ce sont les effets Bottom up et Top down.

- > Effet Bottom up : La richesse du milieu en nutriments est essentielle pour le développement des premiers maillons de la chaîne, qui nourrissent ensuite les autres (cf. Figure 7).
- > Effet Top down : L'abondance d'un niveau du réseau est régie par la présence du prédateur. C'est le principe de la cascade trophique (Figure 8) : les effets sur un maillon de la chaîne engendrent des conséquences sur tous les maillons inférieurs.

Par exemple, les poissons planctivores peuvent favoriser le développement du phytoplancton en consommant une grande part du zooplancton.

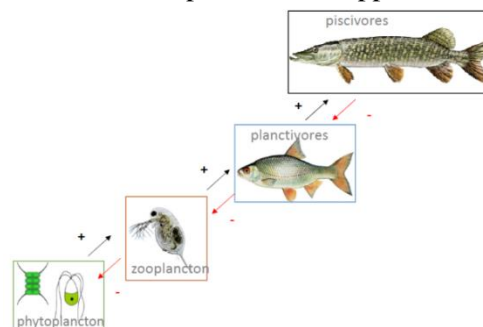


Figure 8 : Les cascades trophiques dans le réseau trophique des lacs, d'après Carpenter et Kitchell, 1993

Les lacs de montagne sont des environnements avec une faible productivité. Les organismes vivant dans ces lacs sont confrontés à une ressource en nutriments limitée, de faible température, une période de croissance assez courte (3 à 5 mois), une grande amplitude de luminosité selon la saison et des périodes de forte radiation solaire (Winder, 2002).

Une deuxième cause est leur éloignement par rapport à des systèmes semblables (autres lacs et rivières). Ainsi, dans la plupart des lacs de haute montagne naturel, la chaîne trophique aquatique s'arrête au zooplancton ou aux macro-invertébrés. En effet, les poissons ne peuvent pas toujours remonter les rivières jusqu'au lac. Les ressources nutritives étant peu abondantes, elles limitent par conséquent la production primaire assurée par les organismes purement photo-autotrophes. Le réseau microbien hétérotrophe devrait jouer un rôle important dans le soutien de la production secondaire (Callieri et al, 1999) ; toutefois peu d'étude ont pour l'instant décrit la dynamique saisonnière et le fonctionnement des réseaux trophiques de ces lacs.

Cependant, aujourd'hui tous les lacs du réseau *Lacs sentinelles* sont ou ont été alevinés ; ils contiennent donc un stock de poissons qui a modifié la dynamique trophique naturelle du lac.

### b. La présence de poissons dans les lacs de montagne, une problématique importante

La pêche sportive en montagne est une activité couramment pratiquée. Les fédérations de pêche réalisent pour cela des actions de repeuplement ou de maintien des populations de poisson. Même si dans l'opinion publique, les poissons sont un signe de bon état général des rivières et des lacs, dans les lacs d'altitude l'empoisonnement non raisonné est un risque d'altération globale du lac.

La présence des poissons modifie totalement la chaîne trophique. Les effectifs de zooplancton sont réduits et le phytoplancton se développe en conséquence (Winder, 2002, Schindler et al, 2001). Ainsi, la transparence du lac diminue, comme le montre cet exemple d'un lac des Pyrénées (lac Closell, Lleida) sur la Figure 9. La photo de gauche correspond au lac empoisonné en vairons depuis les années 1980. La photo de droite a été prise 2015 après deux ans d'actions pour éliminer les poissons (Projet Life+ LimnoPirineus).



Figure 9: Différence de couleur du Lac Closell suite à l'élimination des poissons

Source : [www.lifelimnopirineus.eu/en/blog/noticies/lake-closell-recovers-its-natural-transparency-life-limnopirineus-action](http://www.lifelimnopirineus.eu/en/blog/noticies/lake-closell-recovers-its-natural-transparency-life-limnopirineus-action)

Les cycles de nutriments sont modifiés par la présence des poissons. L'introduction de truite stimule la production du phytoplancton par régénération des nutriments d'origine benthiques et terrestres (*Schindler et al, 2001*).

La présence de poissons signifie également des prédateurs supplémentaires, notamment pour les macro-invertébrés et pour les amphibiens. Comme dans tout écosystème, la disparition ou la réduction d'un niveau du réseau trophique engendre des conséquences sur les autres espèces.

Les répercussions de la présence de poissons dans ces lacs pauvres en nutriments sont connues et explicitées depuis de nombreuses années dans les Alpes. Les travaux de Martinot (*Martinot, 1976*) recommandent des pratiques de gestion piscicole pour limiter les impacts des poissons dans les lacs du Parc national de la Vanoise. Mais la pratique de la pêche reste une activité phare sur les lacs de montagne. La protection des lacs prend peu en compte cette thématique dans les lacs d'altitude français. Dans d'autres régions, par exemple au Parc national du Grand Paradis en Italie, certains lacs sont empoisonnés alors que d'autres sont entièrement protégés. Des projets d'élimination de poissons ont même été réalisés (Projet Life+ Bioaqua).

### c. Le « bon état » d'un lac

L'une des menaces majeures actuelles sur les lacs est l'eutrophisation (*Smith et al, 2006*). C'est-à-dire lorsque le lac s'enrichit anormalement en éléments nutritifs.

Les facteurs limitants du développement de la vie aquatique dans les lacs diffèrent selon la saison :

- Lumière et température en automne- hiver
- Les concentrations en azote et en phosphore, au printemps et en été.

Ainsi, un apport excessif de nutriments (phosphore ou azote) en période estivale est susceptible d'engendrer un déséquilibre dans le cycle naturel, schématisé sur la Figure 10. Il y a alors un développement accru de la végétation, créant une source de matière organique engendrant un développement de l'activité des bactéries aérobies en été. Dans les zones peu renouvelées des lacs stratifiés (au fond du lac), l'activité de ces bactéries crée un appauvrissement des eaux en  $O_2$ . Les bactéries aérobies ne peuvent plus consommer toute la matière organique, et celle-ci va s'accumuler sur le fond, dans un milieu de plus en plus dépourvu en oxygène.

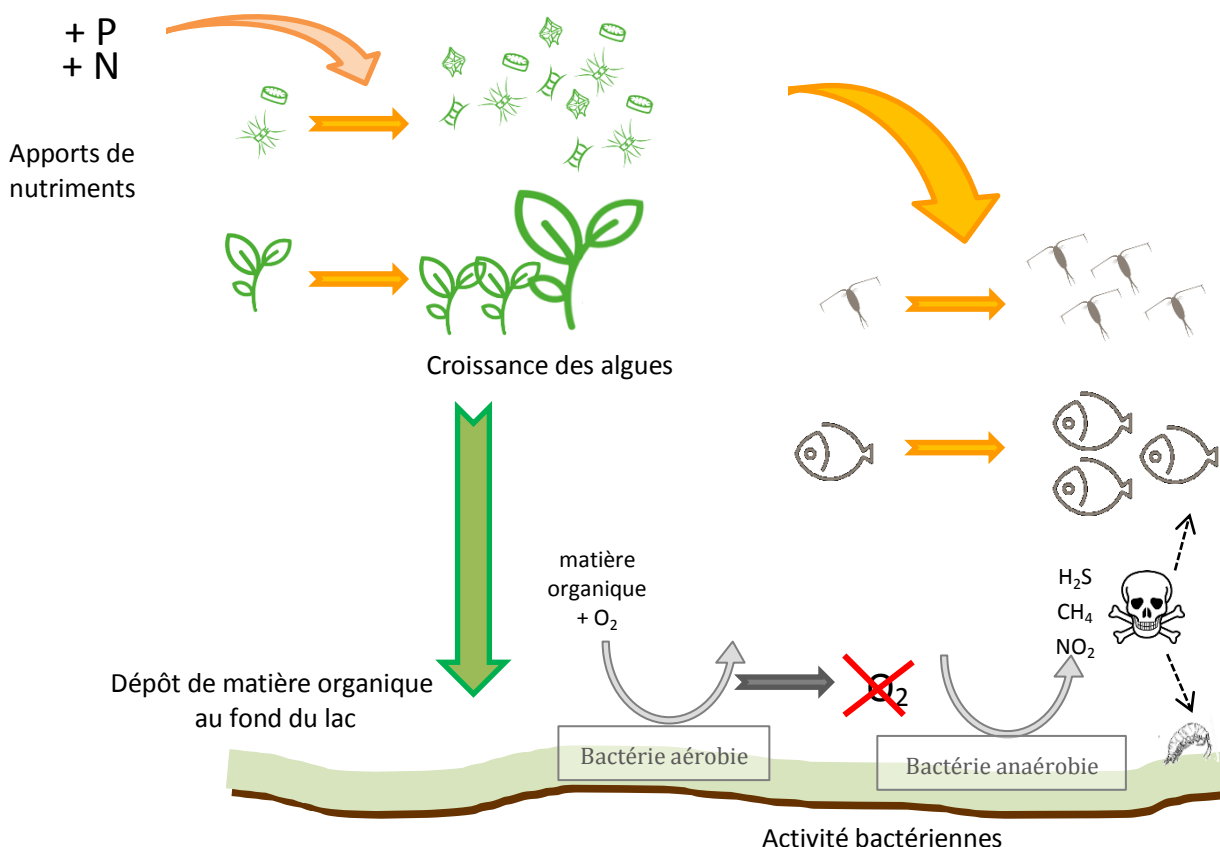


Figure 10: Conséquences de l'apport excédentaire de nutriment sur le fonctionnement du lac

Au fond du lac, le développement de bactéries anaérobies va entraîner la fermentation anaérobie des dépôts, source de dégagement gazeux comme du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), du méthane (CH<sub>4</sub>) et de l'ammoniac (NH<sub>2</sub>).

Actuellement, l'eutrophisation des lacs est en grande partie, due aux activités humaines : rejets de station de traitement des eaux usées, amendements utilisés dans les champs, ...L'apport de phosphore et d'azote en grande quantité peut engendrer le bouleversement total de l'équilibre du lac.

Selon ce constat, l'OECD (Organisation de Coopération et de Développement Économique) a proposé une classification des lacs selon le niveau trophique : de hyper-eutrophe à hyper-oligotrophe (cf. Tableau 1). Elle est basée sur trois points :

- > La concentration en phosphore totale : renseigne sur la quantité de nutriments dans les eaux.
- > La concentration en chlorophylle-a : indique la productivité primaire du phytoplancton.
- > La transparence de l'eau, via le mesure au disque de Secchi : plus un lac est transparent moins il est riche en phytoplancton.

Tableau 1 : Limites de l'OECD pour définir les différents niveaux trophiques

Niveau trophique	Transparence de l'eau Mesure du disque de Secchi (m)	Concentration moyenne en chlorophylle-a (µg/l)	Concentration moyenne en phosphore total (µg/l)
<i>Ultra-oligotrophe</i>	>12	< 1	< 4
<i>Oligotrophe</i>	>6	< 2,5	< 10
<i>Mésotrophe</i>	6 - 3	2,5 – 8	10 – 35
<i>Eutrophe</i>	3 - 1,5	8 - 25	35 – 100
<i>Hyper-eutrophe</i>	< 1,5	>25	>100

La classification est un atout majeur car elle permet de se rendre compte de l'état du lac et d'apporter une réflexion sur les mesures à prendre pour protéger ce milieu. L'eutrophisation du lac n'est pas irréversible. Des travaux à l'échelle du lac et du bassin versant peuvent permettre une restauration de son état. Par exemple au lac du Bourget, les rejets dans le lac dans les années 1940-1960 ont engendrés une forte eutrophisation du lac. Puis d'importants progrès en matière de traitement des eaux et d'aménagement du bassin versant ont permis une amélioration. Les efforts pour limiter les apports de phosphore dans les lacs ont permis une nette réduction de la concentration en phosphore dans le lac (*Jacquet et al, 2012*) qui a été visible plus de 10 ans après les travaux entrepris.

Après la classification proposée par l'OECD, la réglementation européenne a mis en place une évaluation de l'état écologique des masses d'eau par le biais de la DCE (Directive Cadre sur l'Eau). La DCE est une approche globale de la gestion de l'eau incluant des politiques communautaires, elle provient de la directive européenne 2000/60/CE votée par le Parlement européen en octobre 2000. Elle a été transposée en droit français par une loi (2004-338) en 2004 et par deux décrets d'application. La DCE a plusieurs objectifs dont la reconquête du bon état des masses d'eau.

Pour les eaux de surface, la classification en *Très bon /Bon/Moyen/Médiocre* ou *Mauvais état* passe par une étude de l'état écologique et de l'état chimique. L'état écologique comprend des études sur la biologie grâce aux bioindicateurs (calcul d'indice utilisant les diatomées, les macro-invertébrés, les poissons...) et sur la qualité physico-chimique de l'eau (concentrations en nutriments, matières organiques ...). Les seuils de concentrations déterminant les limites de classes sont dépendants de la profondeur moyenne du lac. L'état chimique repose sur des normes de qualité environnementales pour 41 substances prioritaires, comme des métaux lourds ou des pesticides (*Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2016*).

La DCE ne s'applique pas pour les lacs inférieurs à 50ha, donc les lacs du réseau ne sont pas directement concernés. Cependant, si le protocole DCE était suivi, les lacs seraient sûrement tous classés en « *Très bon état* » car globalement il y a peu de pollutions et ils sont pauvres en nutriments du fait de l'altitude. Pourtant certains lacs sont dans un état assez éloigné de leur « état naturel ». La DCE est très générale, son référentiel est donc peu applicable aux lacs de montagne. Les dégradations des lacs d'altitude ne

seraient pas observables par une analyse DCE. Déjà en 1979, Martinot (*Martinot, 1979*) montrait que les paramètres classiques pour indiquer l'état des plans d'eau ne sont pas directement applicables aux lacs de montagne. C'est pourquoi un des objectifs du réseau *Lacs sentinelles* est de créer un outil déterminant des seuils de classement pour l'état écologique des lacs de montagne.

#### 4. Lacs de hautes montagnes et changements globaux

Les changements globaux sont toutes les conséquences directes ou indirectes des activités humaines sur la Terre. C'est l'empreinte écologique des sociétés humaines : rejet de gaz à effets de serre dû à l'utilisation des ressources fossiles, pollutions des milieux et de l'atmosphère, urbanisation massive des terres, fragmentation des habitats, surexploitation des ressources ...

Les changements globaux affectent tous les milieux naturels. Dans les grands lacs, par exemple au lac Léman, des études montrent des augmentations notables de la température des eaux au cours des 30 dernières années (*Jacquet et al, 2012*). Cela engendre une stratification verticale du lac plus marquée. Les pollutions organiques apportées au lac ont été réduites mais d'autres composants sont toujours problématiques (pesticides, métaux, ..).

Dans les petits lacs d'altitude, l'évolution majeure attendue est liée à des changements hydrologiques. En effet, les apports en eaux des affluents pourraient être modifiés par une hausse des températures atmosphériques. Les lacs pourraient être englacés moins longtemps en hiver.

Les lacs d'altitude font face à un nombre restreint de pressions par rapport aux grands lacs. Leur bassin versant est, dans la plupart des cas, peu impacté par les activités humaines directes. Par contre, ils sont de très bons indicateurs face aux changements globaux. Ils sont situés en altitude où l'effet du changement climatique est plus important et ce sont des milieux peu résilients (*Thompson et al, 2005*). Les changements dans la qualité de l'eau et dans le réseau trophique sont relativement rapides (*Tolotti et al, 2006*).

Enfin, comme dans les lacs de plaine, les sédiments du fond des lacs constituent des archives sur les conditions passées. L'analyse de carottes sédimentaires permet de réaliser des études paléo-écologiques afin de connaître les évolutions du lac et du climat par le passé.

Ces trois points font des lacs d'altitude des sentinelles remarquables des changements globaux.

## D. Les outils mis en place par l'Observatoire des lacs d'altitude

L'Observatoire des lacs d'altitude a pour but d'acquérir des données et de centraliser des connaissances sur les lacs de haute montagne des Alpes françaises.

Différents outils sont mis en place par le réseau et sont présentés dans les paragraphes suivants.

### 1. Le protocole commun

L'Observatoire des lacs d'altitude a pour vocation de réaliser un suivi à long terme des lacs de montagne. Pour cela, un protocole commun a été lancé en septembre 2015 sur 20 lacs des Alpes françaises. Des discussions entre chercheurs et gestionnaires ont eu lieu depuis plusieurs années et ont permis de fixer un protocole comportant des paramètres obligatoires et des paramètres optionnels.

Le protocole doit être le plus complet possible, tout en étant facile à mettre en œuvre, au vue de la localisation des lacs et des conditions d'accès difficiles. Il a aussi fallu prendre en compte le temps limité des agents de terrain et les coûts des missions sur les lacs, ainsi que les compétences d'analyses des laboratoires partenaires.

Plusieurs choix ont donc été faits :

- Une campagne par an réalisée au mois de septembre

Plusieurs campagnes sur l'année seraient difficiles à réaliser à cause des contraintes d'accès (distance, enneigement, etc.) et du budget. Le mois de septembre a été choisi car il correspond à la fin de la période d'activité biologique maximale dans les lacs montagne.

- Un matériel de prélèvement optimisé

Le matériel utilisé doit permettre de réaliser le protocole commun le plus facilement possible car les conditions de réalisation sur les lacs sont exigeantes. De plus, les lacs étant situés en haute montagne, l'accès se fait majoritairement à pied. Le poids du matériel à transporter est donc un choix crucial. Enfin, le matériel doit être adapté à la situation : bateau gonflable léger, peu de temps sur le terrain, environnements humides...

- Un temps variable de rapatriement des échantillons

Deux laboratoires de recherches réalisent les analyses. Le temps de rapatriement des échantillons vers les laboratoires peut être très long (descente du lac puis transport de plusieurs heures en voiture). Pour les analyses chimiques, les prélèvements doivent être emportés au laboratoire le plus rapidement possible. Pour certains lacs trop éloignés des laboratoires, le délai est trop long et les analyses chimiques ne peuvent pas être réalisées.

Aujourd'hui, le protocole commun permet de récolter deux types de données :

- > Les données ponctuelles : mesures et échantillons collectés lors de la mission terrain en septembre.
- > Les données continues : données issues des capteurs haute fréquence placés à différentes profondeurs dans le lac. Les capteurs haute fréquence permettent de mesurer un paramètre en continue (une mesure toutes les heures par exemple).

Lors de la sortie en septembre, les prélèvements sont réalisés au niveau de la zone la plus profonde du lac, à différentes profondeurs grâce à l'utilisation d'une bouteille spécifique.

- > Au fond du lac : La bouteille de prélèvement est utilisée pour prélever 1L d'eau dans la zone la plus profonde. Cet échantillon sert ensuite à réaliser des analyses physico-chimiques.
- > En surface : La zone de prélèvement en surface est assez étendue. La méthode utilisée est de réaliser cinq prélèvements à différentes profondeurs proches de la surface (par exemple un prélèvement tous les mètres de 0 à 5m de profondeur). Les cinq litres sont homogénéisés dans un seau puis les prélèvements des échantillons sont réalisés.

Les prélèvements proches de la surface permettent de réaliser des mesures dans la zone éclairée, donc dans la zone potentielle de production. L'autre prélèvement réalisé au fond renseigne sur la physico-chimie des zones où la lumière ne pénètre pas, marquées par les processus de recyclages des éléments.



## ANALYSES AU MOIS DE SEPTEMBRE

### Paramètres obligatoires pour tous les lacs

#### Transparence de l'eau



Pour mesurer la transparence de l'eau, le disque de Secchi est utilisé. La méthode consiste à descendre un disque bicolore dans la colonne d'eau et à noter la profondeur où le noir et le blanc ne peuvent plus être dissociés. La mesure est répétée trois fois et la moyenne des valeurs est retenue. C'est une mesure qui peut varier en fonction des conditions météorologiques et en partie de l'observateur.

#### Profils sonde-multi paramètres



Une seule sonde de mesure des quatre paramètres : concentration en oxygène, pH, conductivité et température, permet de réaliser des profils sur toute la colonne d'eau. Pour certains lacs, un capteur de pigments chlorophylliens est associé à la sonde, il permet de connaître la profondeur du pic de concentration en chlorophylle.

Les capteurs doivent être calibrés avant l'utilisation sur le terrain. Les valeurs sont ramenées à une conductivité à 25°C.

La sonde est placée à la surface de l'eau puis est descendue lentement jusqu'au fond.

### Paramètres optionnels

#### Chlorophylle-a



Le prélèvement d'eau de surface est filtré afin de concentrer les particules algales sur une membrane qui est ensuite placée dans une glacière puis congelée. La filtration a lieu au bord du lac.

Au laboratoire, le filtre est placé dans l'acétone puis dans un appareil provoquant des ultra-sons permettant d'extraire la chlorophylle des cellules. Des mesures spectrophotométriques sont ensuite effectuées sur l'extrait chlorophyllien. Une deuxième mesure sur l'échantillon acidifié est nécessaire. En effet, la première valeur détermine la somme chlorophylle-a et phéophytine. L'ajout d'acide converti la chlorophylle en phéophytine (pigments dégradés). Un calcul entre les deux mesures permet d'accéder au résultat voulu, c'est-à-dire la chlorophylle-a active.

#### Chimie



Un échantillon est prélevé dans le mélange des eaux de surface et un autre échantillon dans le prélèvement de profondeur.

Les flacons doivent être placés dans une glacière puis emmenés au laboratoire dans les deux jours pour que toutes les analyses puissent être réalisées dans des conditions optimales.

Paramètres mesurés au laboratoire :

- TAC (Titre alcalimétrique complet)
- COT (Carbone organique total)
- Nutriments :  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_{\text{tot}}$ ,  $\text{P}_{\text{ortho}}$  et  $\text{P}_{\text{tot}}$
- Ions :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+/3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$

#### Plancton



Phytoplancton :

Un flacon est rempli avec l'eau de surface et quelques gouttes de lugol sont ajoutées pour fixer la forme du phytoplancton et arrêter les processus biologiques. Un spécialiste dans le dénombrement phytoplanctonique réalise ensuite les comptages selon la méthode Utermöhl (NF EN 15204, AFNOR, 2006)

Zooplancton :

Un filet à plancton de maille 50µm est utilisé pour réaliser un trait de filet sur toute la colonne d'eau. Les échantillons sont fixés au lugol puis analysés par un spécialiste.

## DONNEES CONTINUES

Une chaîne de thermistors (capteurs permanents mesurant la température) est installée dans tous les lacs au point le plus profond. Chaque lac est équipé, au minimum, d'un capteur à 2m de profondeur et d'un capteur au fond (cf. Figure 11). Dans certains lacs, d'autres capteurs sont installés à différentes profondeurs intermédiaires (par exemple à 4m de profondeur).

Lors de la mission terrain en septembre, les thermistors doivent être sortis de l'eau afin de récupérer les données récoltées durant toute l'année.

Les capteurs prennent une mesure toutes les heures.

L'Observatoire a comme objectif d'ajouter des capteurs haute fréquence pour la mesure de l'oxygène au fond des lacs.

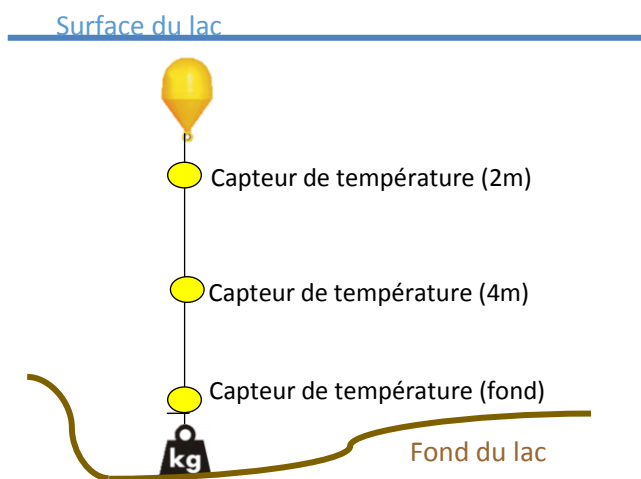


Figure 11: Disposition des capteurs de température permanents dans les lacs

## 2. Base de données

Les données récoltées sur le terrain sont ensuite regroupées dans une base de données commune. Le SOERE OLA a mis en place un système d'information pour les grands lacs alpins. L'Observatoire des lacs d'altitude utilise également cette même plateforme grâce à un partenariat. Le système d'information (SI) est essentiel pour uniformiser les données. En effet, chaque gestionnaire doit mettre en forme les résultats pour les

insérer sur la base de données (1 Figure 12). Des fichiers types sont utilisés pour entrer les données de manière uniforme, seules les données haute fréquence des capteurs de températures ne sont pas encore disponibles sur le SI.

C'est un point essentiel car la plupart des données sont ainsi stockées et téléchargeable par tous. J'ai pu m'en rendre compte d'autant plus lorsque je me suis intéressée aux données des capteurs de températures (non disponibles sur le SI). Le temps passé pour récupérer les données auprès des gestionnaires, enlever les valeurs aberrantes et les mettre en forme de manière homogène a été plus long que prévu. Cette étape a nécessité l'utilisation de logiciel de nettoyage des données haute fréquence comme B3 et DataStandardizer.



Observatory on alpine LAkes

L'Observatoire des Lacs alpins (OLA), administré par l'UMR CARTELL regroupe initialement les données scientifiques collectées sur le suivi écologique des trois grands lacs périalpins : lac d'Annecy, lac du Bourget et lac Léman. Une extension a été faite pour les lacs d'altitude. L'objectif des recherches menées est de comprendre et modéliser l'état et le fonctionnement écologique des systèmes lacustres.

(Source : <http://www6.inra.fr/soere-ola/>)

La base de données commune du SI est un outil essentiel pour le suivi à long terme. Elle permet un accès facile aux données et une mise en forme homogène des fichiers.

## 3. Rapport annuel du monitoring

Le réseau *Lacs sentinelles* réalise chaque année un rapport en guise de retour sur les analyses effectuées. Il donne un aperçu de l'« état de santé » de chaque lac ; une fiche par lac est réalisée. Un des objectifs de mon stage était la création de ce rapport pour l'année 2016. Le but étant de réaliser les fiches lacs chaque année, il a été choisi de créer des outils permettant d'automatiser les procédures.

## a. Méthodologie pour créer le rapport du monitoring

Un premier rapport de ce type avait été réalisé en 2015, grâce à la création d'un script sous *RStudio*, permettant d'effectuer une analyse « automatisée » des données.

Cette année, l'enjeu était de reproduire ce rapport pour l'année 2016 en améliorant la méthode de création et la forme du rapport (cf. Figure 12).

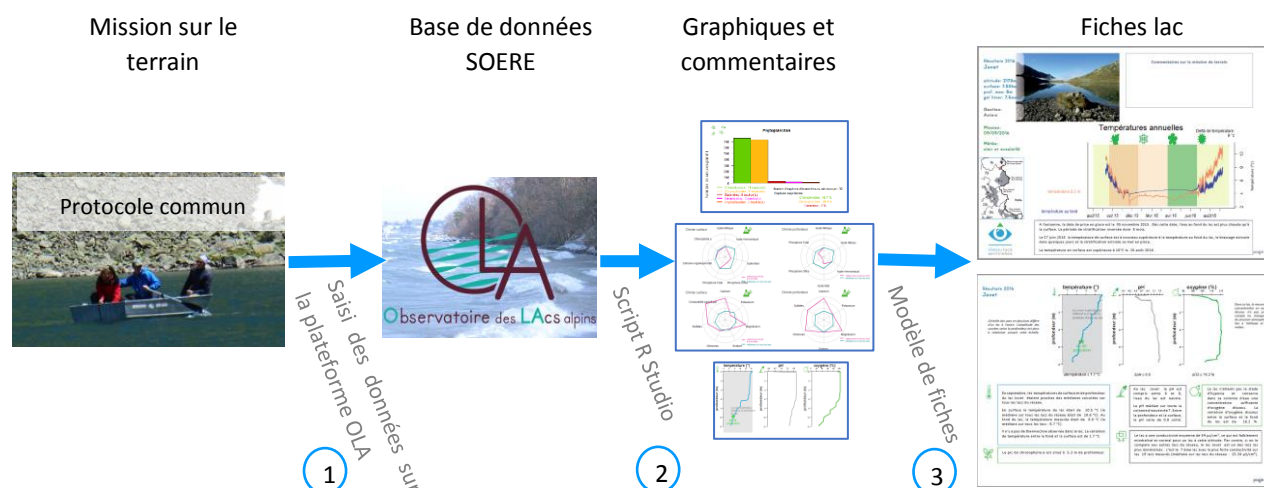


Figure 12 : Méthodologie suivie pour créer le rapport monitoring 2016

2

Une fois les données uniformisées par le biais de la plateforme OLA, un script R élaboré durant le stage de Louise Fritz en juin 2016, permet de créer des graphiques et des commentaires sur les paramètres mesurés.

Dans un premier temps, une mise à jour du script était nécessaire afin que les données issues du SI-SOERE soient directement utilisées. En effet, en 2015, les données étaient collectées auprès des gestionnaires directement puis Asters se chargeait d'homogénéiser et de mettre en forme les données de tous les lacs. Cette étape est très chronophage car la plupart des données n'étaient pas sous le même format. En 2016, le script a été modifié pour que les données d'entrées soient celles publiées sur le SI. Cela permet que chaque gestionnaire soit responsable de la publication des données et que la personne créant le rapport n'ait qu'à les télécharger.

Dans un second temps, les commentaires relatifs aux graphiques et aux analyses ont été revus et complétés avec les informations rédigées dans le paragraphe suivant *D.3.B. Contenu d'une fiche lac*.

Pour cette étape, j'ai dû mettre à jour mes connaissances pour le codage sous *RStudio*, le script fait à présent 1600 lignes.

3

La troisième étape est la création des fiches lac. Le logiciel de mise en page *Indesign* a été utilisé pour créer un modèle de fiche simple, structuré et qui reprend tous les résultats de l'année. Avec ce logiciel, la mise en page est beaucoup plus rapide. Pour créer les fiches lacs, il reste uniquement à remplir le modèle avec les graphiques et les commentaires. C'est une méthode rapide et qui permet une mise en page plus attrayante.

## b. Contenu d'une fiche lac

Les paragraphes suivants reprennent les informations contenues dans les fiches lacs et explicitent l'intérêt des mesures réalisées.

Sur la première page, les caractéristiques des lacs, une photo ainsi que sa localisation permettent de replacer le lac dans un contexte général.



Figure 13 : Lac Blanc du Carro  
(Source : [www.lacs-sentiennes.org](http://www.lacs-sentiennes.org))

Les données issues des capteurs de température en continue sont ensuite présentées sous la forme d'un graphique des températures annuelles et des dates spécifiques de la dynamique thermique sont présentées (cf. Figure 14).

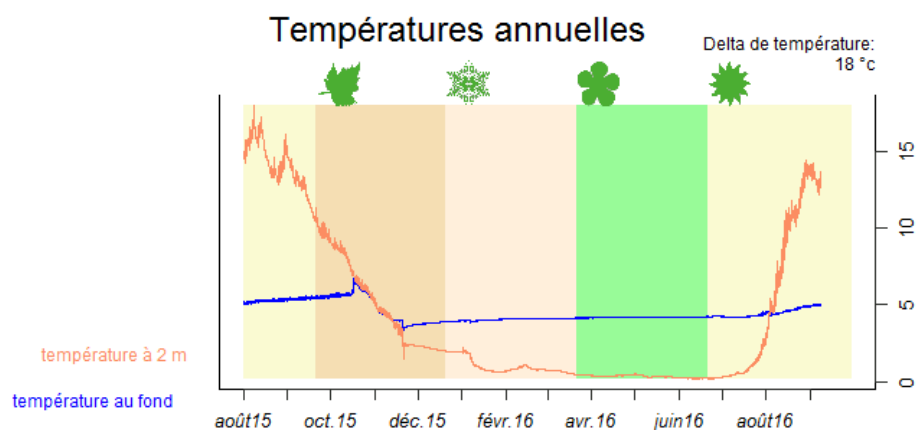


Figure 14: Graphique présenté dans la fiche lac, évolution des températures du lac de Corne entre septembre 2015 et septembre 2016

Les mesures des thermistors permettent de connaître la dynamique thermique du lac sur l'année. Une procédure automatique a été mise en place dans le script qui permet de connaître facilement des dates clés :

- > La date de prise en glace correspond à la mise en place de la stratification hivernale. C'est la date à laquelle la température de surface est inférieure à la fois à 4 °C et à la température du fond.
- > La date de déprise en glace correspond au brassage printanier. C'est lorsque la température en surface devient supérieure à la température du fond du lac.
- > La date où la température en surface devient assez élevée, le seuil choisi est de 10°C.

La deuxième page de la fiche lac utilise les données issues des mesures de la sonde multi-paramètres, c'est-à-dire des profils de mesure dans la colonne d'eau de la température, de la saturation en oxygène, du pH et de la concentration en chlorophylle. Un commentaire relatif à la conductivité est également associé à cette partie (cf. page 26).

La page suivante est dédiée aux analyses chimiques de l'eau. Des graphiques en radar permettent de comparer les valeurs du lac aux valeurs médianes mesurées sur les 20 lacs (cf. page 27). Les données ont été, au préalable, centrées puis normées afin de pouvoir les comparer entre les paramètres et entre les lacs. Les explications données sur les origines des différents éléments sont valables pour les lacs d'altitude, pour les lacs de plaine d'autres explications pourraient être proposées. En effet, la présence de certains éléments chimiques dans les lacs de plaine peut, en grande partie, être expliquée par les pollutions anthropiques émises sur le bassin versant.

La quatrième page concerne les données biologiques sur le phytoplancton, le zooplancton et la concentration en chlorophylle-a. Des histogrammes détaillent les résultats des comptages des planctons et des commentaires détaillent les classes et les espèces majoritaires (cf. page 28).

Enfin la dernière page comprend un tableau des données de chimie de l'eau. Il permet de connaître les concentrations pour le lac en question ainsi que les valeurs maximum, minimum et médianes sur les 20 lacs mesurés.

Un extrait du rapport du monitoring 2016 est disponible en annexe 1.

Les pages suivantes regroupent les informations qui ont permis de coder le script afin que des commentaires appropriés accompagnent les graphiques.

Les gestionnaires sont très intéressés par ce rapport car il permet de mieux connaître les lacs. C'est un retour sur les mesures qu'ils ont faites dans l'année. Il est également diffusé auprès d'autres instances liés aux territoires (fédérations de pêche, élus locaux, associations ...) Enfin, ce rapport est aussi un appui pour les financeurs du réseau comme l'Agence de l'eau.

## Profils réalisés par la sonde multi-paramètres sur le lac de Cos en septembre 2016

Le profil de sonde de température permet de connaître la température de surface et la température en profondeur. Ces deux données permettent de calculer le  $\Delta(T_{\text{surf}} - T_{\text{fond}})$  et donc d'en déduire l'état de stratification. Pour une analyse synthétique, nous dirons que le lac est brassé si  $\Delta < 5^\circ\text{C}$  et le lac est stratifié si  $\Delta > 5^\circ\text{C}$ .

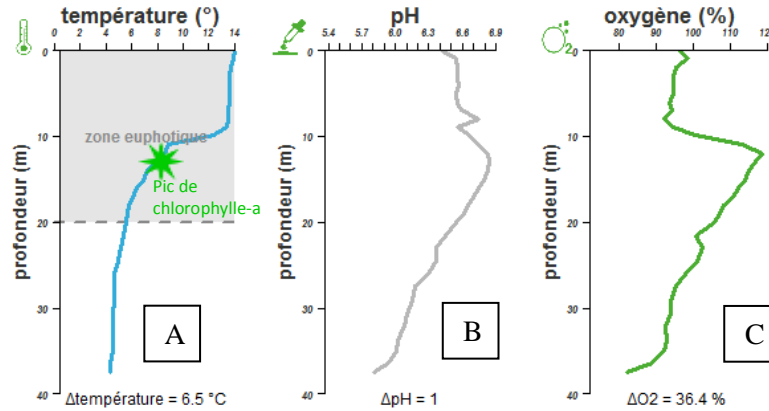
Enfin, le script calcule également la profondeur de la thermocline. Elle est déterminée par une diminution de la température d'au moins  $1^\circ\text{C}$  par mètre. La thermocline n'est pas visible dans tous les lacs.

Sur le graphique A apparaît une étoile correspondant à la profondeur du maximum de concentration en chlorophylle. La zone grise correspond à la zone euphotique. Elle est calculée à partir de la mesure de la transparence de l'eau avec le disque de Secchi.

Zone euphotique =  $2,5 \times$  profondeur du disque de Secchi

La zone euphotique est la couche supérieure du lac où la pénétration de la lumière est suffisante pour permettre une activité photosynthétique.

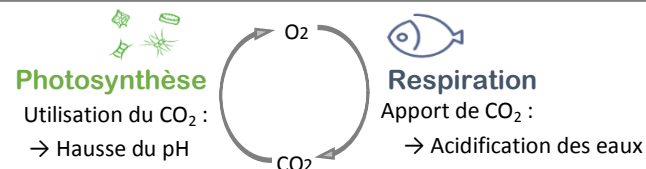
Pour certains lacs, le calcul montre que la zone euphotique dépasse la profondeur du lac. Cela signifie qu'il y a potentiellement une activité de production primaire par les organismes phototrophes dans toute la colonne d'eau.



Le pH détermine l'acidité des eaux du lac, liée à la géologie et à la composition des sols du bassin versant mais aussi à l'activité photosynthétique de la journée. La photosynthèse du phytoplancton engendre une hausse du pH alors que la respiration engendre une acidification des eaux (cf. Schéma ci-dessous).

Le pH peut également être modifié par des pollutions atmosphériques. La valeur de pH influence la quantité de nutriments disponibles (ex : dans une eau acide les sédiments relarguent des orthophosphates directement disponible pour les organismes aquatiques) et de métaux lourds (ex : dans une eau acide le plomb contenu dans les sédiments est libéré dans l'eau).

Le commentaire rédigé décrit le pH moyen et la variation de pH entre le fond et la surface du lac. L'eau est dite alcaline si le pH est supérieur à 8 et acide si le pH est inférieur à 6. Entre 6 et 8, le pH est neutre. Si la variation est inférieure au seuil de 0,4, il a été choisi de commenter qu'il n'y a pas de variation de pH sur la colonne d'eau.



L'oxygène dissous en concentration suffisante est essentiel pour la respiration des organismes. La concentration en  $\text{O}_2$  dissous dépend des échanges eau-air et de l'intensité de la photosynthèse. Cette mesure dépend donc fortement du moment de mesure dans la journée.

Le profil de sonde permet d'observer la saturation en oxygène dans la colonne d'eau. Il permet de déterminer si des zones hypoxique ou anoxique sont présentes. Il permet également de calculer le delta d'oxygène (concentration en  $\text{O}_2$  dissous en surface – concentration en  $\text{O}_2$  dissous en profondeur). Une valeur de delta élevée est généralement associée à une stratification thermique marquée.

La mesure de la conductivité renseigne sur la minéralisation du lac. Elle dépend donc majoritairement de la géologie du bassin versant. Par exemple :

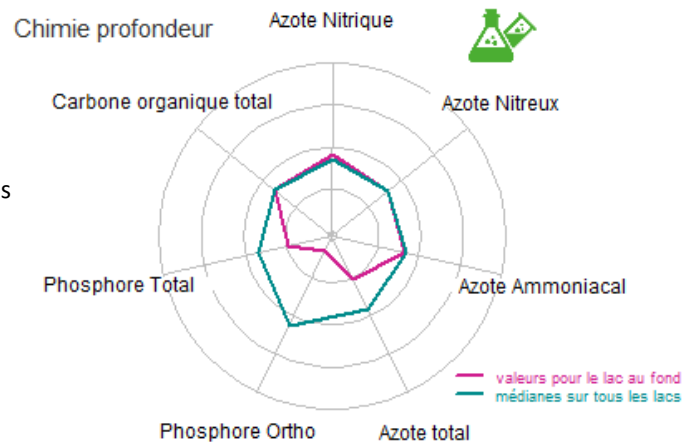
Roche calcaire -> eau riche en minéraux

Roche granitique -> eau peu minéralisée

Mais elle est également liée à l'activité biologique, la production primaire réduit la minéralisation car elle transforme la matière minérale en matière organique. Dans certains cas, l'activité bactérienne peut à l'inverse reminéraliser la matière minérale en matière organique. C'est l'activité des bactéries chimio-organotrophe. Cela engendre une augmentation de la minéralisation.

Dans la fiche lac, le commentaire donne la valeur moyenne de la mesure de conductivité sur toute la colonne d'eau.

Analyses chimiques  
Lac d'Anterne,  
septembre 2016



**COT** : Somme des composés organiques carbonés naturels et anthropiques. C'est un indicateur de la production biologique du milieu ou des apports de matière organique via le bassin versant.

**Ptot** : Le phosphore total est la somme du phosphore particulaire et du phosphore dissous. Le phosphore est un élément essentiel pour la production primaire, mais à forte concentration c'est un marqueur de haut niveau trophique. C'est un paramètre qui permet de déterminer le niveau trophique du lac d'après les seuils de l'OECD.

**Portho** : C'est le phosphore sous sa forme dissous et biodisponible, c'est à dire sous forme d'orthophosphates :  $H_2PO_4$  et  $HPO_4^-$ .

**Ntot** : C'est la somme des concentrations en azote ( $NO_3$ ,  $NO_2$ ,  $NH_4$  et  $N_{organique}$ ). Cette valeur permet d'en déduire la teneur en azote organique par différence avec les valeurs mesurées en  $NO_2$ ,  $NO_3$  et  $NH_4^+$ .

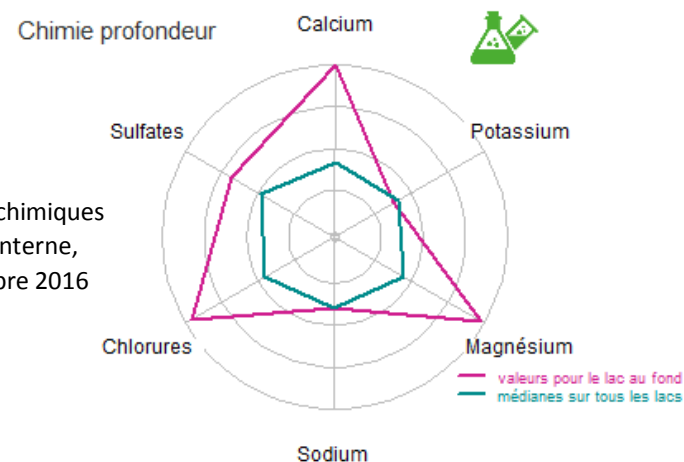
**$NH_4$**  : La présence de  $NH_4^+$  peut venir d'une zone anoxique : la minéralisation de la matière organique naturelle produit de l'azote ammoniacal. C'est un élément toxique pour les macro-organismes (poissons, macro-invertébrés ...)

Cependant, d'autres origines sont possibles : eaux météoriques, pollution humaine. Enfin, la réduction des nitrates par des bactéries autotrophes ou par des ions ferreux peut également produire du  $NH_4^+$ . C'est une des formes d'azote utilisée pour la production primaire.

**$NO_2$**  : Dans un lac en « bon état » les nitrites sont très peu présents. Dans les zones anoxiques, les bactéries captent l'oxygène du  $NO_3$ , ce qui crée du  $NO_2$ . De fortes concentration en  $NO_2$  sont associées à une dégradation de la qualité microbiologique d'une eau, due à une diminution de la saturation en oxygène et sont toxique pour certains organismes vivants. D'autres origines sont néanmoins possibles : le  $NO_2$  peut être présents en quantité importante au moment de la fonte des neiges (pollution atmosphérique par oxydes d'azote).

**$NO_3$**  : La présence de  $NO_3$  est synonyme de pollution majoritairement d'origine atmosphérique. C'est un marqueur de l'eutrophisation car il est produit par la minéralisation de la matière organique. Le  $NO_3$  est utilisé par les macrophytes.

Analyses chimiques  
Lac d'Anterne,  
septembre 2016



**$SO_4$**  : Ces ions sont majoritairement issus de la dissolution des roches mais une fraction peut également provenir de la pollution atmosphérique.

**$Ca^{2+}$**  : Élément indispensable pour les organismes lacustres. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des roches

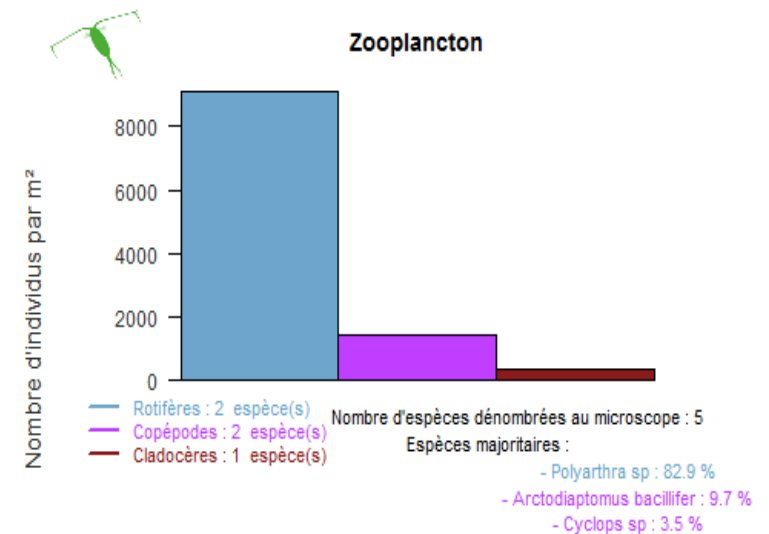
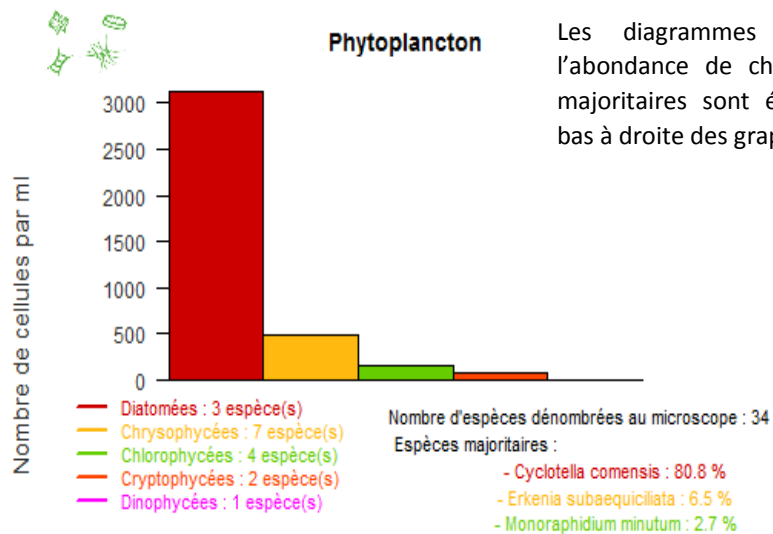
**$K^+$**  : Nutriments essentiels à la vie aquatique

**$Cl^-$**  : Les concentrations naturelles dépendent de la géologie du bassin versant. C'est un traceur anthropique de pollution atmosphérique.

**$Na^+$**  : Nutriments essentiels à la vie aquatique

**$Mg^{2+}$**  : Élément indispensable pour les organismes lacustres. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des roches

## Diagrammes réalisés avec les données recueillies en 2016 sur le lac d'Anterne

**Phytoplancton :**

Les espèces de phytoplancton ont été classées selon neuf classes, les classes algales sensu Bourelly : Cyanobactéries, Dinophycées, Cryptophycées, Euglénophycées, Chrysophycées, Xanthophycées, Diatomées, Chlorophycées, Zygophycées.

Le commentaire associé renseigne sur la classe présente en majorité et sur l'espèce la plus présente ainsi que sur son classement entre nanophytoplancton et microphytoplancton. Le nanophytoplancton est inférieur à 20µm en longueur et son biovolume est plus petit que 10 000 µm<sup>3</sup>.

Les indices de Shannon et de Piélu sont calculés pour connaître la richesse des lacs.

La diversité de Shannon (H') est un indice qui est fonction de la richesse taxonomique et de la proportion relative de chaque taxon. Plus H' est grand plus la diversité est importante. H'=0 signifie qu'une seule espèce est présente.

L'équitabilité de Piélu (E) est le rapport de la diversité de Shannon sur la diversité maximale potentielle.

Il varie entre 0 et 1.

E= 0 : Tous les individus sont de la même espèce.

E= 1 : Toutes les espèces ont la même abondance.

**Zooplancton :**

Les espèces de phytoplancton ont été classées selon les 3 classes habituelles : Rotifères, Cladocères et Copépodes.

Le commentaire renseigne sur la classe présente en majorité et sur l'espèce majoritaire ainsi que sa taille.

Les indices de Shannon et l'équitabilité de Piélu sont également calculés

**Chlorophylle-a :**

La concentration en chlorophylle-a renseigne sur la production primaire : une forte concentration en chlorophylle-a est signe d'une activité photosynthétique importante.

Pour chaque lac, la mesure de la concentration en chlorophylle-a permet de déterminer le niveau trophique selon les seuils de l'OECD.

## **E. Difficultés liées à la mise en place du suivi à long terme**

Les suivis à long terme sont essentiels pour étudier les évolutions des écosystèmes. Seules des études répétées dans le temps permettent de différencier les cycles naturels des changements induits par les hommes. À court terme, il est difficile de connaître les causes des évolutions car de nombreux paramètres entre en jeux. Par contre sur des données à long terme, les évolutions peuvent être expliquées. Il est possible par exemple de distinguer des cycles ou corrélérer des modifications avec des évolutions d'autres paramètres (climat, occupation du bassin versant ...). Les données à long terme permettent de connaître les amplitudes moyennes des paramètres mesurés.

Dans le cadre de l'Observatoire des lacs d'altitude, la mise en place du suivi commun est récente. C'est le résultat d'une forte collaboration entre les gestionnaires et les scientifiques. Les données recueillies aujourd'hui seront étudiées plus précisément dans plusieurs années. Il est donc intéressant de vérifier dès à présent que le protocole mis en place est suffisant pour interpréter les évolutions des lacs.

### **1. La réalisation du protocole**

Tout d'abord, il est important de souligner que le protocole est très complet et qu'il nécessite d'importants efforts pour le réaliser. Les montées aux lacs sont longues et une grande quantité de matériel doit être transportée. L'utilisation des sondes et capteurs ainsi que la décharge des données nécessitent une formation. Enfin, les prélèvements d'eaux doivent être rapidement emmenés au laboratoire ce qui crée un délai supplémentaire. Les lacs sont situés dans des massifs éloignés, ce sont donc des personnes différentes qui réalisent le protocole selon les lacs. Durant ces deux premières années de mise en place, les gestionnaires ont finalement réalisés certains points du protocole différemment. C'est en partie dû à une différence de moyens, mais aussi, car les méthodes habituelles liées à d'anciens travaux de recherche continuent à être utilisées.

Ces légères différences de protocole ont parfois des conséquences sur l'interprétation des données. Pour certains paramètres mesurés, les données sont difficilement comparables entre les lacs. C'est par exemple le cas pour les données de chimie, chlorophylle-a et planctons car la zone de prélèvement en surface est différente selon les lacs. Les données recueillies permettent donc de comparer les résultats d'un même lac entre plusieurs années mais une comparaison inter-lac est difficile.

De manière générale, plusieurs options sont possibles pour mesurer les paramètres. Des choix sont donc nécessaires pour trouver un compromis entre la réalisation d'un protocole relativement « facile » à suivre et l'acquisition de données pertinentes pour les études.

Des critiques du protocole pourront toujours être réalisées. Mais certains points ne pourront pas être résolus, par exemple que les lacs ne sont pas tous échantillonnés au même moment, certains début septembre et d'autres fin septembre. Il y aura toujours des biais possibles dans le protocole, l'important est de les connaître et de les prendre en compte dans l'interprétation des résultats. De même, il serait intéressant de connaître la précision des mesures réalisées. C'est une demande difficile car différents matériels de mesure sont utilisés, ils seraient alors nécessaires de réaliser une vérification des capteurs et des sondes.

Selon l'utilisation des données, la précision demandée est différente. Par exemple, des données approximatives peuvent permettre de comparer deux lacs très différents. Par contre, pour déterminer des évolutions entre années du même lac, plus de précision semble nécessaire.

Enfin, une composante essentielle pour un suivi à long terme est que toutes les analyses soient reproductibles. En effet, plus les mesures sont compliquées à obtenir, plus le suivi risque d'être abandonné par manque de moyens ou manque de temps. L'important est de faire la balance entre un protocole exemplaire mais irréalisable et un protocole rapide mais qui recueillerait des données incomplètes.

Le rapport des limites du protocole et des pistes d'améliorations proposées est disponible en Annexe 2.



## 2. La perte de continuité avec les mesures passées

Ces lacs sont des milieux étudiés depuis de nombreuses années. Certains chercheurs, en collaboration avec les gestionnaires des espaces protégés ont déjà menés des suivis et des études sur les lacs du réseau.

J-M. Chacornac a beaucoup étudié le lac Brévent puis une trentaine de lacs de Haute-Savoie dans les années 1980, J-P. Martinot a proposé une étude poussée sur les lacs de la Vanoise en 1979 et D. Radenen-Girard a réalisé une typologie des lacs et mares du Parc national des Ecrins en 1986. Ces quelques exemples montrent que des suivis sont réalisés dans certains lacs depuis de nombreuses années. Cependant, chaque projet s'est principalement focalisé sur un massif. Certains ont essayé de regrouper ces informations comme J-L. Edouard dans sa thèse sur les lacs d'altitude dans les Alpes française en 1994. Enfin le programme inter-parcs a réalisé une typologie sur 128 lacs des Alpes françaises, de la Haute-Savoie jusqu'à la Corse, grâce à une seule campagne de mesures par lac (*Programme inter-parc, 1986*).

Un des points à souligner est que la plupart des suivis réalisés n'utilisent pas les mêmes méthodes. Les protocoles de mesures diffèrent selon les massifs et les questions scientifiques.

Le changement du protocole de suivi pose la question de la continuité des données. C'est-à-dire que le nouveau protocole proposé par le réseau *Lacs sentinelles* récolte des données différentes de celles recueillies pendant les années précédentes.

Ainsi pour donner un exemple, les lacs de Haute-Savoie sont suivis depuis 1998. Chaque année durant 18 ans, des analyses de phytoplanctons ont été réalisées dans les cinq premiers mètres en dessous de la surface. Aujourd'hui, le nouveau protocole propose de changer la zone d'échantillonnage. Les données actuelles sont donc en partie différentes de celle récoltées par le passé. On peut néanmoins nuancer ce propos, même si les données anciennes et actuelles sont peu comparables en absolu, des tendances devraient pouvoir être observées. C'est une question importante à poser : faut-il poursuivre avec le même protocole et permettre une comparaison inter-annuelle pour un lac ou changer de protocole pour que les données soient comparables entre les lacs ?

## 3. L'utilisation des données

De plus en plus de mesures sont réalisés dans les écosystèmes. Le recueil de données est essentiel mais nécessite également que les données soient stockées de manière durable et qu'elles soient ensuite utilisées.

À l'Observatoire des lacs d'altitude, la plateforme du SOERE-OLA assure une stabilité dans le stockage des données. C'est un maillon essentiel pour le bon fonctionnement du suivi.

Même si ces données ont pour vocation à être utilisées dans plusieurs années, le réseau a choisi de réaliser une courte analyse chaque année des données obtenues grâce au rapport du monitoring. Il permet notamment de faire un retour pour les gestionnaires mais aussi pour les financeurs du projet. En effet, les personnes concernées attendent des résultats mais peu de recherches semblent, pour l'heure, avoir été entamées avec ces données. Plus d'années de mesure seront nécessaires pour interpréter les résultats.

Aujourd'hui, le rapport du monitoring est un outil. Il est une première analyse qui pourra être complétée si besoin. Les limites du rapport monitoring sont connues, des commentaires automatiques peuvent être erronés car toutes les situations n'ont pas forcément été imaginées. L'automatisation de l'analyse est un gain de temps pour les années futures mais il faut rester vigilant aux conclusions apportées.

Enfin, l'utilisation des données est aussi un point majeur quant à la poursuite du suivi. Aujourd'hui des grandes questions servent de lignes directrices pour le suivi. Dans les années à venir, des études sur des points plus précis seront lancées et un plus grand nombre de chercheurs seront moteurs dans l'acquisition de données. Cela pourra permettre de montrer et préciser l'intérêt des mesures réalisées par l'Observatoire. En effet, le recueil de données pourra perdurer si des objectifs clairs de recherches sont détaillés.

Pour conclure sur cette partie, la mise en place d'un suivi à long terme est une longue procédure. Les efforts de l'ensemble des membres du réseau ont déjà permis de créer une structure permettant un travail considérable. Certains points du protocole pourraient être améliorés si l'on souhaite que les données soient comparables entre les lacs. Un des freins majeurs semble être le manque de moyens humains et financiers.

## F. Comparaison des lacs

Les données issues des deux années de monitoring permettent de commencer une comparaison des lacs sur certains points : Caractéristiques physiques du lac et de son bassin versant – Dynamique thermique du lac – Caractéristiques physico-chimique de l'eau – Paramètres liés au réseau trophique.

### 1. Caractéristiques physiques des lacs

Les premières analyses détaillent les caractéristiques physiques des lacs, c'est-à-dire toutes les données relatives à la morphologie des lacs et de leurs bassins versants. C'est une étape essentielle pour mieux comprendre ensuite les différences observées dans les analyses de qualité de l'eau.

#### a. Premières analyses sur les types de lacs

Le document de J.P. Martinot et A. Rivet, *Lacs de Montagne, mieux connaître et bien gérer* est une des références sur la typologie des lacs d'altitude des Alpes français. Basé sur la description du bassin versant, de la morphologie du lac et les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de 130 plans d'eau des Alpes, leur projet de recherche a permis de différencier cinq classes de lacs de montagne. Les critères de classification sont d'ordre « physique », ils concernent la situation du lac, la durée de présence de la glace et la température estivale en surface. Les encadrés suivants détaillent les cinq classes, sur la droite sont positionnés les lacs du réseau. Les critères proposés par la typologie ne sont pas pris comme des critères déclassants, le classement des lacs du réseau est plus une réflexion sur la situation des lacs (altitude, couverture du bassin versant,...) que l'application strict des seuils.

LACS POLAIRES				Lacs du réseau	
Lacs de haute altitude, ce sont les plus froids et les plus « pauvres ». La période de production biologique est très courte, ils ont donc une quasi-absence de végétation aquatique. La présence de matière minérale en suspension leur donne un aspect souvent laiteux.	Altitude moyennes lacs	2620 m		Arpont Pavé	
	Altitude moyenne BV	2880 m			
	Altitude maximale du BV	3420 m			
	Durée de présence de la glace	10 mois			
	Température estivale en surface	< 5°C			
LACS FROIDS				Lacs du réseau	
Ces lacs sont soumis à des conditions climatiques encore rudes. Leur bassin versant est dominé par des roches nues, souvent peu altérables (gneiss, granite ou migmatite). L'eau est donc peu minéralisée et très limpide.	Altitude moyennes lacs	2430 m		Blanc du Carro Bresses inférieur Bresses supérieur Cornu Noir du Carro Mont Coua Pisses Plan Vianney	
	Altitude moyenne BV	2600 m			
	Altitude maximale du BV	29400 m			
	Durée de présence de la glace	8,5 mois			
	Température estivale en surface	< 9°C			
LACS DE PELOUSE				Lacs du réseau	
Le bassin versant est dominé par la présence de pelouse. Le substratum est souvent calcaire, ce qui engendre une minéralisation plus élevée. Ces 2 caractéristiques du bassin versant permettent un apport de substances dissoutes dans le lac favorable à une plus grande productivité biologique.	Altitude moyennes lacs	2100 m		Anterne Brévent Corne Jovet Lauzanier Muzelle Pétarel Pormenaz Merlet Supérieur	
	Altitude moyenne BV	2300 m			
	Altitude maximale du BV	2730 m			
	Durée de présence de la glace	7,5 mois			
	Température estivale en surface	< 12°C			

## LACS VERTS

Ce sont les lacs d'altitude les plus chauds et les plus « » donc les plus productifs. La ceinture végétale est plus importante que dans les autres lacs alpins. La couleur verte de l'eau est due à la présence de matière organique en suspension. On trouve ce type de lacs essentiellement en Corse.

Altitude moyennes lacs	1820 m
Altitude moyenne BV	2000 m
Altitude maximale du BV	2300 m
Durée de présence de la glace	6 mois
Température estivale en surface	< 15°C

## GRANDS LACS

Cette dernière catégorie se distingue à cause des caractéristiques morphologiques. Ce sont de grands lacs profonds soumis à un marnage important. Ils ont un comportement très différent des autres types de lacs.



Rabuons  
Cos  
Lauvitel

Limites de cette classification : Le classement (subjectif) proposé tient peu compte des seuils chiffrés de la classification. Par exemple, si on se base majoritairement sur la durée de gel des lacs ou la température estivale, le classement serait totalement différent : 10 lacs seraient des lacs verts, 6 lacs de pelouse et 3 lacs froids. Ce qui paraît peu probable au vu de la description de chaque type de lac proposé dans le document de référence. Deux raisons expliquent ce choix.

Tout d'abord, nous avons, aujourd'hui accès à une meilleure précision des données. Par exemple, les capteurs haute fréquence renseignent sur la température maximale de manière très précise.

D'autre part, la classification de Martinot et Rivet a été réalisée dans les années 1980, années relativement froides et neigeuses par rapport à aujourd'hui. Le réchauffement de l'atmosphère engendre un réchauffement de l'eau des grands lacs (*Jacquet et al, 2012*). Il paraît cohérent de supposer que les petits lacs de montagne sont aussi concernés par un réchauffement des températures des eaux ou d'autres effets indirects du réchauffement des températures estivales.

Pour certains lacs (lac de Pétarel, lac des Pisses, lac de Plan Vianney et lac de Merlet supérieur), il est difficile de les classer entre lacs froids et lacs de pelouse.

Pour conclure, même si cette classification n'est pas optimale, elle permet de classer les lacs du réseau en quatre catégories. Les lacs grands et profonds sont regroupés du fait de leurs caractéristiques morphologiques. Les autres lacs sont classés selon leur productivité biologique, qui dépend largement de la couverture de leurs bassins versants. La classification utilisée est très intéressante pour déterminer les types de lac, même si les seuils proposés sont peut-être à mettre à jour grâce aux données disponibles aujourd'hui.

### b. Caractéristiques morphologiques et de localisation des lacs

Dans un premier temps, nous avons choisi de comparer les lacs sur des caractéristiques liées à leur morphologie (superficie, profondeur ...) et à leur situation (altitude, latitude, durée d'englacement ...)

#### **Données disponibles et méthode d'analyse**

La méthode d'analyse choisie est une analyse en composantes principales (ACP). Le but est de comparer les lacs selon plusieurs variables et d'obtenir une représentation graphique du résultat. Pour cela, de nouvelles variables sont créées, ce sont en fait des combinaisons linéaires des variables de départ. Les nouvelles variables sont appelées des Composantes principales, elles forment les axes qui expliquent le mieux la variabilité des données (donc la variabilité entre les lacs).

Les données utilisées sont listées ci-dessous.

- > Profondeur maximale du lac : déterminée par une analyse bathymétrique du fond du lac
- > Superficie du lac
- > Superficie du bassin versant
- > Altitude du lac
- > Différence d'altitude entre le sommet du bassin versant et le lac
- > Latitude
- > Durée de la période d'englacement : déterminée par les gestionnaires et confirmée par les analyses des données de températures en surface

Dans un premier temps, les données sont centrées puis normées. En effet, comme elles sont hétérogènes (unités différentes selon les colonnes) cette étape est essentielle. L'analyse est ensuite effectuée grâce à une fonction du package *ade4* du logiciel *RStudio*.

### Résultats

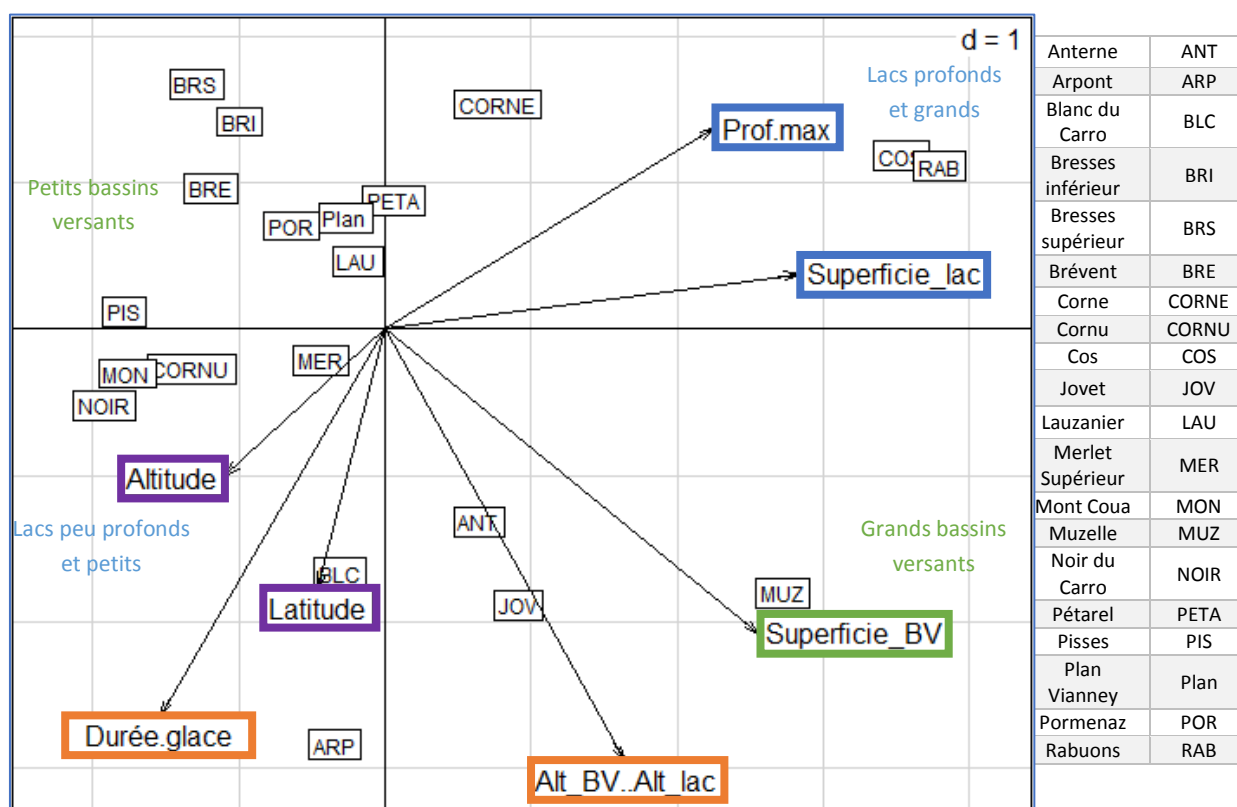


Figure 15: Résultat de l'ACP sur la morphologie et la localisation des lacs (axe 1 et 2)

#### Description des axes :

Les variables sont réparties sur la Figure 15. Les trois premiers axes expliquent 78% de l'inertie. Ils seront donc analysés tous les trois. Les variables corrélées à l'axe sont celles dont le coefficient de corrélation est proche de 1 ou de -1.

**Axe 1 :** L'axe 1 (axe horizontal) représente 38% de l'inertie. Les trois variables les plus corrélées à l'axe 1 sont la superficie du lac (coefficient de corrélation : 0,9), la superficie du bassin versant (0,8) et la profondeur maximale du lac (0,7). Ainsi, les lacs situés à droite du graphique sont des grands lacs profonds avec un grand bassin versant. À l'inverse, sur la gauche de la Figure 15, les lacs sont petits, peu profonds et le bassin versant est réduit.

**Axe 2 :** L'axe vertical de la Figure 15 représente 23% de l'inertie. La différence d'altitude entre le sommet du bassin versant et le lac et la durée d'englacement du lac sont corrélées négativement à l'axe 2 (coefficient de corrélation respectif : -0,7 et -0,6). Les lacs du haut du graphique ont de courtes périodes

d'englacement. Le sommet de leur bassin versant n'est pas très éloigné en altitude du lac. À l'inverse, les lacs du bas du graphique sont englacés pendant une longue période et le sommet du bassin versant est beaucoup plus haut en altitude que le lac.

Axe 3 : L'axe 3 est l'axe vertical de la Figure 16, il représente 18% de l'inertie. Il permet de séparer les lacs selon l'altitude (coefficient de corrélation : -0,8) et la latitude (corrélation à 0,7). Les lacs en bas sont les lacs haut en latitude mais situés au sud. Les lacs du nord, bas en altitude sont situés en haut du graphique de la Figure 16. Grâce à l'axe 3, nous retrouvons une observation réalisée dans le rapport 2015 du monitoring : le gradient Nord-Sud correspond en partie à un gradient d'altitude des lacs.

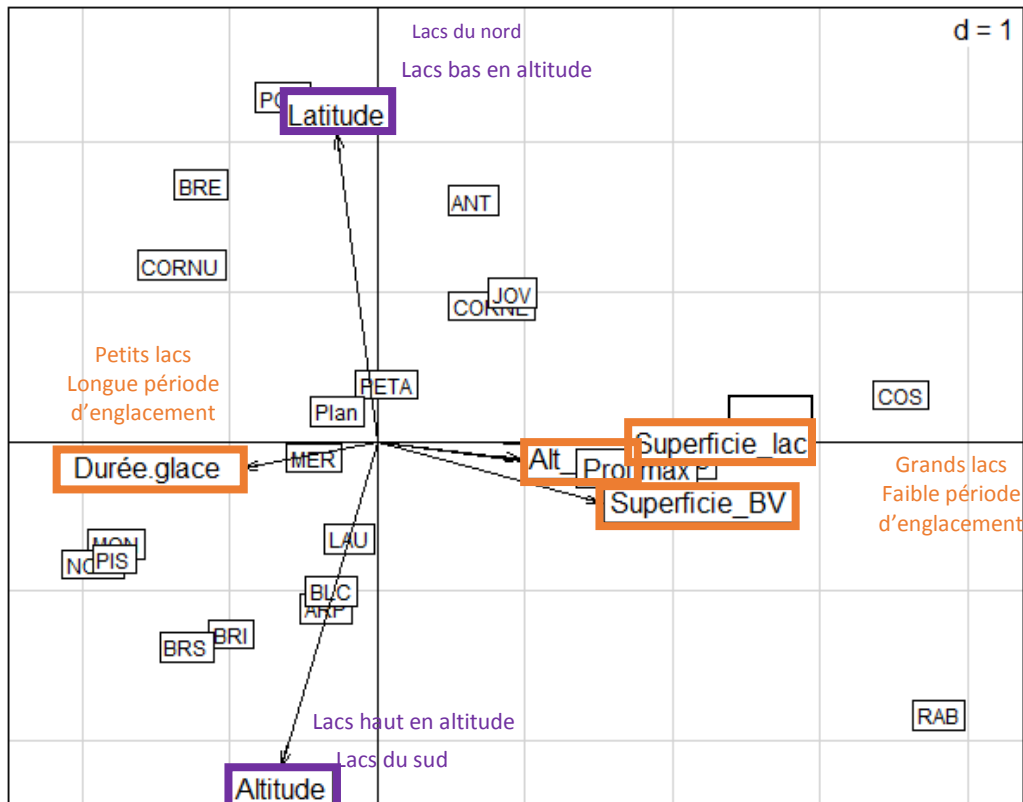


Figure 16: Résultat de l'ACP sur la morphologie et la localisation des lacs (axe 1 et 3)

### Regroupement des lacs :

La Figure 15 sépare les lacs selon la taille du bassin versant et du lac.

Les lacs de la Muzelle, Jovet et Anterne sont des grands lacs avec de grands bassins versants.

Les très grands lacs profonds Lacs de Cos et de Rabuons ont un bassin versant relativement petit.

Les lacs de Bresses inférieur et supérieur, lac du Brévent et lac des Pisses sont des petits lacs avec les bassins versants les plus petits.

La durée d'englacement du lac et la différence d'altitude entre le sommet du bassin versant et le lac sont élevées pour les lacs de l'Arpont, Blanc du Carro, Anterne et Jovet.

D'après la Figure 16, les lacs du nord, bas en altitude sont Pormenaz, Anterne, Brévent, Cornu, Jovet et Corne. Les lacs du sud hauts en altitude sont les deux lacs de Bresses, l'Arpont, le Blanc du Carro et le Lauzanier.

### Discussion

Cette analyse renseigne sur les différences morphologiques des lacs. C'est une étape de caractérisation des lacs essentielle pour commencer à interpréter les résultats. L'ACP permet de visualiser les différences entre les lacs sur plusieurs variables. Enfin, les données d'entrée pourraient être précisées par une analyse cartographique plus complète à l'aide d'un modèle numérique de terrain. Cette étape était prévue mais n'a pas eu le temps d'être réalisée.

Enfin, d'autres variables pourraient être ajoutées comme l'exposition du lac qui pourrait expliquer des écarts de température de l'eau par exemple.

### c. Caractéristiques du bassin versant

#### Variables comparées

Cette comparaison concerne les bassins versants des lacs. Sept catégories regroupant différents paramètres du bassin versant ont été étudiées : occupation du sol, géologie, hydrographie, glaciers, apports de sédiments, permafrost et âge du lac (cf. Figure 17). 11 variables ont été sélectionnées, chacune séparée en différentes modalités (les cadres jaunes correspondent aux modalités).

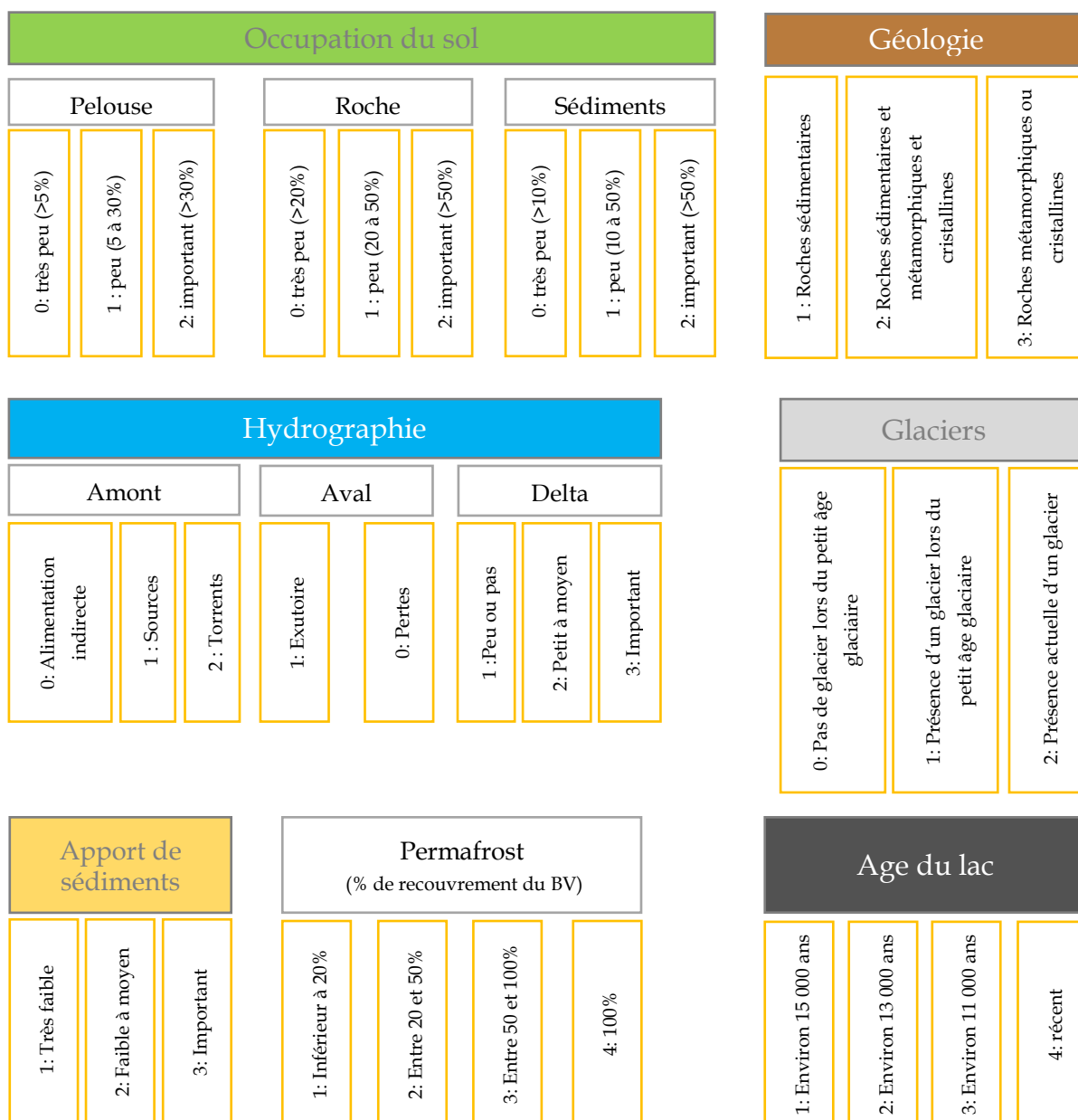


Figure 17: Les variables et modalités retenues pour la caractérisation des bassins versants

L'occupation du sol a été séparée en trois catégories : présence de pelouse, de roche et de sédiments. Les images satellites ont permis de déterminer des pourcentages de recouvrement approximatifs de chaque type d'occupation. Il y a trois classes par variables.

Pour chaque lac, des études géologiques ou la carte géologique permettent de déterminer les types de roches présentes. Seules trois classes géologiques ont été retenues afin de simplifier ce paramètre pouvant être très complexe. Nous avons choisi de séparer les roches sédimentaires, les roches métamorphiques ou cristallines, et le regroupement des roches sédimentaires, métamorphiques et cristallines. En effet, les roches sédimentaires engendrent, en général, d'importants apports de minéraux dans le lac alors que les roches cristallines ou métamorphiques sont beaucoup moins érodables.

Concernant l'hydrographie, trois paramètres ont été pris en compte : l'arrivée d'eau en amont du lac, la présence d'un exutoire et l'activité du delta. À l'amont, l'eau peut entrer dans le lac par le biais de torrents, de sources proches du lac ou alors par une alimentation indirecte. C'est-à-dire qu'aucune arrivée d'eau n'est visible sur les images aériennes, l'eau entre dans le lac par des résurgences ou le lac peut se remplir uniquement lors de la fonte des neiges. À l'aval du lac, dans certains cas un exutoire puis un ruisseau sont visibles. Enfin, la présence et l'activité du delta sont visibles sur les images satellites.

Pour les glaciers, leur présence actuelle et lors du petit âge glaciaire (1550 à 1850) sont visibles sur des photographies aériennes et par une étude du paysage actuel. Par exemple, les moraines du petit âge glaciaire sont des traces de l'avancée du glacier à cette époque (cf. Figure 18).

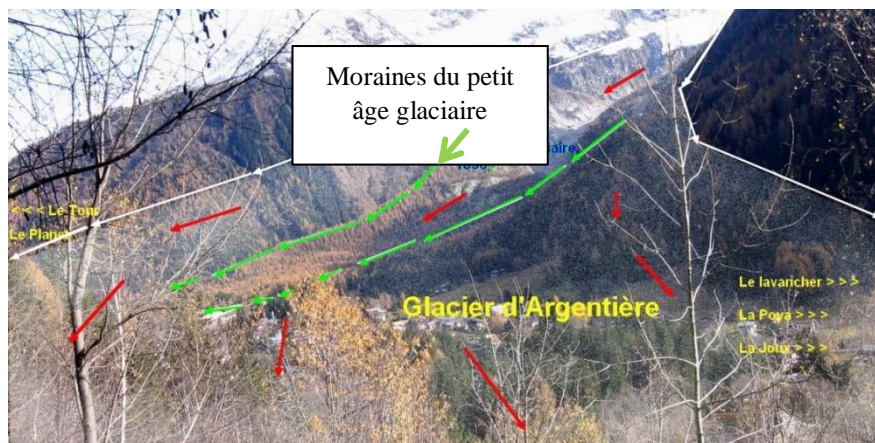


Figure 18: Traces de moraines du petit âge glaciaire, étude du paysage à Argentière  
(Source : [http://glaciers-climat.fr/Geomorphologie\\_de\\_Chamonix/](http://glaciers-climat.fr/Geomorphologie_de_Chamonix/))

L'apport de sédiments dépend de la présence de zones d'éboulis et de leur situation par rapport au lac. Trois modalités permettent de classer les lacs selon les apports potentiels en sédiments.

Pour la variable relative au permafrost, les modalités concernent le pourcentage de recouvrement potentiel du permafrost sur le bassin versant d'après la carte du permafrost alpin (*Alpine Permafrost Index Map*, Boeckli et al, 2001). Le permafrost désigne les zones du sol qui restent à une température inférieure à 0°C toute l'année.

L'âge du lac a été déterminé de manière approximative par l'étude du paysage, la plupart des lacs datent du Tardiglaciaire, c'est-à-dire de la dernière période de glaciation (11 000-15 000BP) et certains sont beaucoup plus récents (années 1900-1950). Pour les lacs récents, des photos prises au début du siècle permettent de dater plus précisément la création du lac.

### **Analyse réalisée**

Nous avons donné un ordre hiérarchique aux modalités et ainsi converties les données de classes en données chiffrées. Par exemple, pour la variable *Présence d'un glacier sur le bassin versant*, la valeur 2 est attribuée pour les lacs ayant actuellement un glacier dans leur bassin versant, 1 pour les lacs ayant eu un glacier lors du petit âge glaciaire et 0 pour les lacs qui n'avaient pas de glacier lors du petit âge glaciaire. Ainsi, nous donnons plus de poids à la modalité *Présence d'un glacier actuellement*. Les lacs avec un glacier seront discriminés par rapport aux autres.

Une analyse factorielle de correspondances (AFC) a été réalisée à l'aide du package *FactoMineR* du logiciel *RStudio*. L'AFC est une méthode d'analyse multivariée. Elle permet de visualiser des individus (ici les lacs) selon différentes variables (ici, des caractéristiques du bassin versant). Les variables et les individus sont placés sur un graphique selon des axes qui sont des combinaisons des variables expliquant le plus les différences entre les individus.

À la suite de l'AFC, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée, elle permet de visualiser les ressemblances entre les lacs. Cette méthode est basée sur un calcul des distances entre les individus (saut de Ward), elle permet de créer un arbre de classification.

## Résultats

Dans un premier temps, l'AFC permet de visualiser une répartition des lacs dans un plan selon les variables prises en compte (cf. Figure 19).

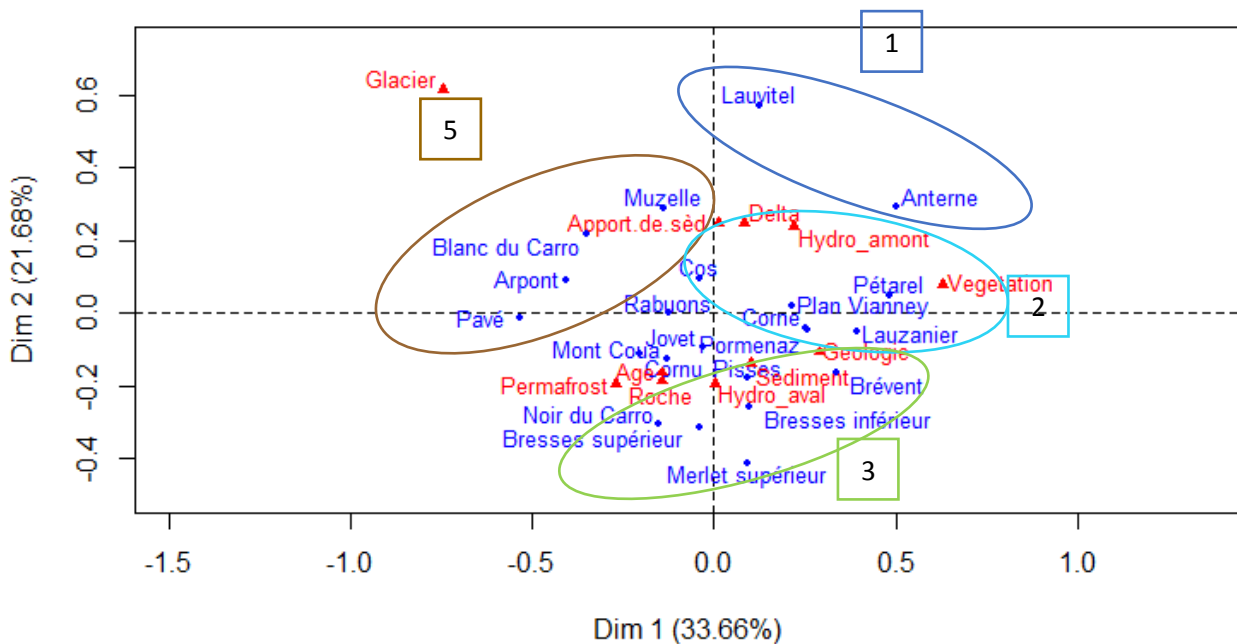


Figure 19: Résultats de l'AFC : Carte factorielle des correspondances

### Description des axes :

L'axe 1 (axe horizontal) explique les résultats à près de 34%, il discrimine les lacs selon la présence de végétation dans le bassin versant, le type géologique des roches, l'influence des glaciers et le recouvrement par du permafrost. Les lacs les plus à droite ont un bassin versant constitués de pelouse, peu voire pas de zones de permafrost et la géologie serait plutôt de type roches métamorphiques ou cristallines. À l'inverse, les bassins versants des lacs situés à gauche sont couverts par du permafrost et avec très peu de zones de pelouses. C'est le cas du lac de l'Arpont ou du Pavé par exemple.

L'axe 2 (axe vertical : 22%) sépare les lacs selon des paramètres liés à l'apport de sédiments et à l'influence des glaciers. Les lacs localisés en haut du graphique sont ceux ayant un apport important de sédiments dans le lac, l'apport d'eau se fait par le biais de torrent et un delta est bien formé à son entrée dans le lac. Les lacs situés en bas ont un très faible apport en sédiments, pas de delta marqué et l'alimentation du lac est indirecte (pas de torrents ou source).

Il n'est pas forcément pertinent de prendre en compte l'axe 3 (15% environ) (cf. Figure 20). Les lacs sont bien répartis selon ces deux axes, il n'y a pas de lac isolé.

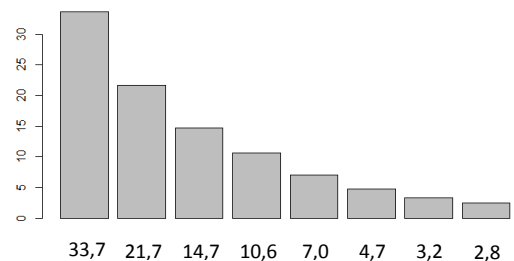


Figure 20: Inertie expliquée par les axes, Résultats de l'AFC

### Regroupement des lacs :

Sur la Figure 19, nous pouvons repérer différents groupes de lac que l'on retrouve par la classification ascendante hiérarchique (cf. Figure 21).

**1** : Les lacs du Lauvitel et d'Anterne ont des bassins versants assez similaires : très végétalisés, présence de torrents, un delta marqué, peu de zones à sédiments et un recouvrement du permafrost assez faible (inférieur à 20%). La différence de position des deux lacs peut être expliquée par la géologie. Le bassin versant d'Anterne est composé de roches sédimentaires majoritairement alors que le bassin versant du Lauvitel comporte également des roches métamorphiques et cristallines.

**2** : Ces lacs sont caractérisés par une bonne répartition de l'occupation du sol selon des zones de pelouse, de roche et de sédiments. Les lacs de Pétarel et de Plan Vianney sont plus à droite sur la carte factorielle



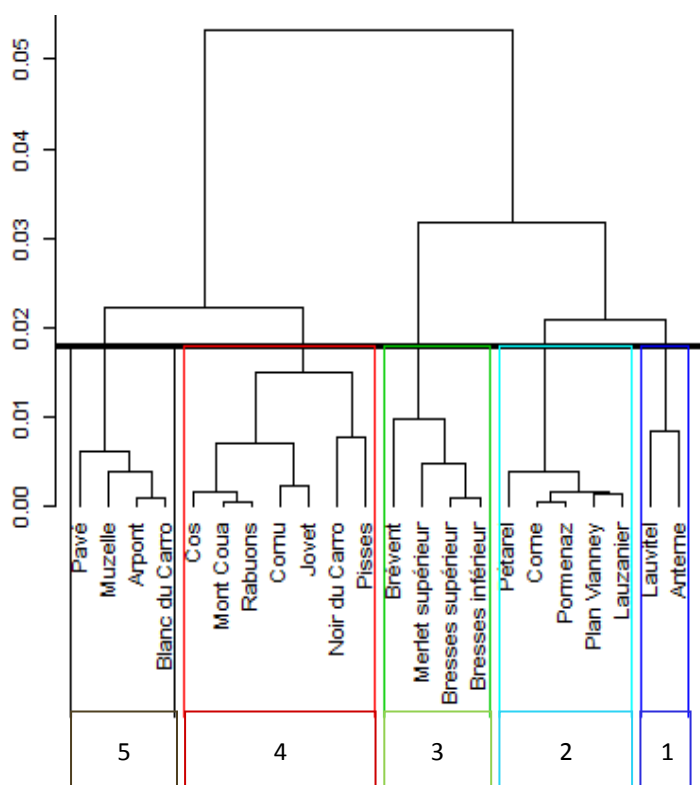
car leur bassin versant est en grande partie recouvert par de la végétation. Enfin, ils se ressemblent aussi par l'absence de glacier dans leur bassin versant.

**3 :** Ces quatre lacs (Brévent, lacs de Bresse Inférieure et Supérieure et lac du Merlet supérieur) sont caractérisés par un faible apport de sédiments dans le lac, peu ou pas delta et une alimentation en eau direct en amont (pas de source ou de torrents). Le lac du Brévent est plus à droite sur la carte factorielle car son bassin versant est plus végétalisé que les autres.

**4 :** Les lacs situés en haut à gauche sont proches de la variable *Présence d'un glacier*. Ainsi, ils sont différents des autres du fait de la présence d'un glacier dans leur bassin versant. Ils sont également recouverts de permafrost à 100% dans leur bassin versant (sauf le lac de la Muzelle dont le recouvrement est de 65% environ). Au sein de ce groupe, le lac de la Muzelle est le plus à droite sur la carte factorielle car son bassin versant est plus recouvert de pelouse et comporte moins de zones de roche que les trois autres lacs.

Enfin, les lacs de l'Arpont et du Pavé sont plus bas sur la carte factorielle, cela peut être expliqué car ce sont des lacs récents alors que la Muzelle et le lac Blanc du Carro sont âgés d'environ 11 000 ans.

### Classification hiérarchique ascendante



Suite à l'AFC, une classification ascendante hiérarchique a été réalisée (cf. Figure 21). Elle permet de visualiser les ressemblances des lacs par le biais d'un arbre hiérarchique.

Il semble pertinent de séparer les lacs en cinq groupes de lacs.

- 1 : Apport de sédiments au lac important, présence de végétation
- 2 : Bassin versant riche en pelouse
- 3 : Peu de sédiments arrivant aux lacs
- 4 : Apport moyen de sédiment, bassin versant sans glacier, avec peu de végétation
- 5 : Lacs blancs, proche de glacier

Figure 21: Classification des lacs selon les caractéristiques du bassin versant

### Discussion

Il semble intéressant de comparer ces groupes et ceux réalisés grâce à la classification de Martinot et Rivet (cf. F. 1.a) *Premières analyses sur les types de lacs*). Les lacs de l'Arpont et du Pavé, qui constituaient les lacs polaires, se retrouvent dans le groupe 5. Par contre le lac Blanc du Carro était classé comme un lac froid et la Muzelle comme un lac de pelouse. Pour les autres groupes, peu de ressemblances entre les deux classifications sont observées. Les lacs froids se répartissent dans les groupes 2, 3 et 4 et les lacs de pelouse sont séparés dans les cinq groupes.

Enfin, il est important de rappeler que les données d'entrées restent assez approximatives, notamment les données relatives à l'occupation du sol. Elles pourraient être précisées par une analyse plus détaillée des photos aériennes.

## 2. Comparaison de la dynamique thermique

Les données recueillies par les capteurs de température haute fréquences permettent d'étudier la dynamique thermique des lacs. Il a été choisi de se concentrer sur deux périodes : la stratification hivernale et la période de l'été où la température est supérieure à 10°C. Les dates et les périodes étudiées sont placées sur le schéma de la Figure 22.

La réalisation d'un code sous *RStudio* permet de calculer ces différentes dates.

Dans un premier temps, nous voulions également calculer les dates de début et de fin de brassage. Mais, il s'est avéré que la détermination des dates de début de brassage à l'automne et de fin de brassage au printemps est assez difficile. En effet, en automne, plusieurs petits brassages peuvent avoir lieu. Au printemps, la mise en place de la stratification peut être recoupée par des brassages.

Les données de température en surface et en profondeur ne permettent pas de déterminer correctement ces dates. Il faut plus de thermistors disposés dans la colonne d'eau. Par exemple, à Anterne la présence de cinq capteurs dans la colonne d'eau permet de mesurer les dates de début et de fin de brassage (Bruel, 2014).

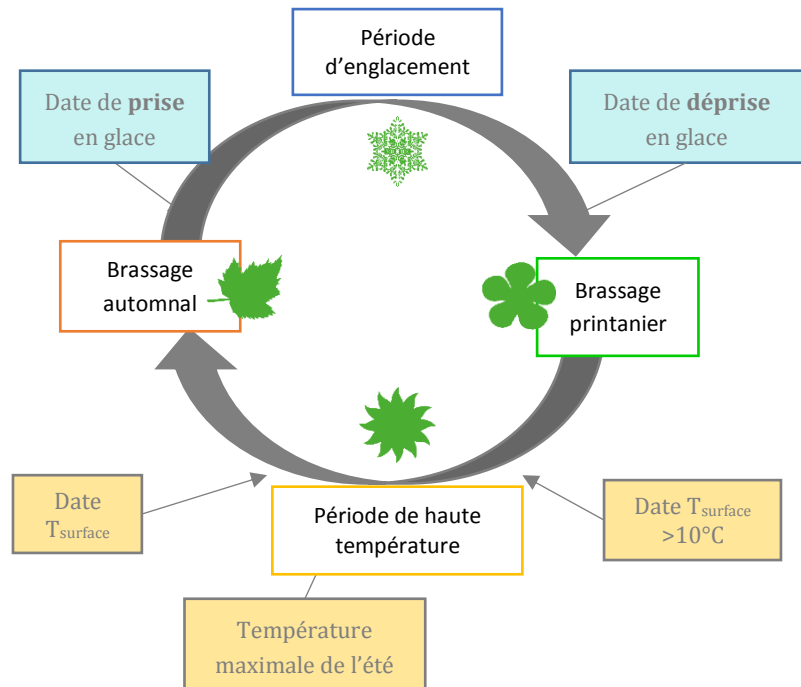


Figure 22: Définition des dates et périodes comparées entre les lacs

Une description des dates pour chaque lac est disponible en Annexe 3, elle permet de détailler les résultats du script et de comparer les dates avec la météo des deux années.

Pour comparer les dates et périodes détaillées sur la Figure 22, nous avons choisis de tester s'il y a des corrélations entre ces paramètres et des caractéristiques physiques des lacs (Altitude- Latitude-Superficie et Profondeur du lac). Pour chaque paramètre, un test non paramétrique de Spearman a été réalisé. Il a été choisi de faire un test non paramétrique car la distribution des données ne suit pas une loi normale. Le test de Spearman permet de chercher des corrélations entre des variables qualitatives. Il repose sur la comparaison des rangs des données, il permet donc de s'affranchir des valeurs extrêmes.

Les tableaux 2 et 3 ci-dessous montrent les résultats du test de Spearman. Le  $\rho$  correspond à un coefficient de corrélation entre les rangs des paramètres testés et la  $p$ -value qui correspond à la probabilité critique. Elle permet de conclure le résultat du test, elle correspond au risque d'erreur. Quatre cas sont séparés :

- p-value > 0.1 : pas de corrélation
- p-value comprise entre 0.1 et 0.05 : faible corrélation
- p-value comprise entre 0.05 et 0.01 : bonne corrélation
- p-value < 0.01 : forte corrélation

## Stratification hivernale

Tableau 2: Résultats du test de corrélation (test de Spearman) entre les paramètres liés à la stratification hivernale et les caractéristiques des lacs

	Altitude	Latitude	Profondeur	Superficie du lac	
Date prise en glace 2014	-0.67	0.1	0.77	0.53	rho
	0.03	0.76	0.008	0.11	p-value
Date prise en glace 2015	-0.1	-0.08	0.33	-0.2	rho
	0.65	0.74	0.2	0.9	p-value
Date déprise en glace 2015	0.48	0.64	-0.09	-0.4	rho
	0.13	0.03	0.7	0.15	p-value
Date déprise en glace 2016	0.19	0.74	0	0.01	rho
	0.44	0.0006	0.9	0.9	p-value
Durée de stratification hiver 15	0.65	0.28	-0.35	-0.44	rho
	0.04	0.42	0.31	0.19	p-value
Durée de stratification hiver 16	0.27	0.56	-0.29	-0.1	rho
	0.29	0.02	0.26	0.68	p-value

**Code couleur**

	0.1 < p-value < 0.05
	0.05 < p-value < 0.01
	p-value < 0.01

La date de prise en glace est corrélée avec la profondeur du lac et son altitude pour les données de la première année. Les lacs profonds et, dans une moindre mesure les lacs haut en altitude, gèlent plus tôt dans l'année. Mais ces résultats ne sont pas observés en 2015.

Le seul résultat qu'on retrouve les deux années est que la date de déprise en glace dépend de la latitude et d'aucuns autres paramètres testés. Plus un lac est au sud, plus son dégel aura lieu tôt dans l'année.

Ensuite, la durée de stratification serait corrélée à l'altitude pour les données 2015 et à la latitude pour les données 2016. Cela semble assez cohérent pour l'altitude : un lac haut en altitude sera couvert de glace pendant une plus longue période que les lacs en basse altitude. Pour les données de 2016, la corrélation signifie que les lacs du sud ont une durée de stratification plus courte que les lacs du nord, cette observation serait également assez logique.

## Température estivale supérieure à 10°C

Quatre paramètres sont comparés sur les températures estivales : les deux dates qui encadrent la période de haute température (c'est-à-dire la période où la température de surface est supérieure à 10°C), cette période et la température maximale.

Tableau 3: Résultats du test de corrélation (test de Spearman) entre les paramètres liés à la température estivale et les caractéristiques des lacs

	Altitude	Latitude	Profondeur	Superficie du lac	
Date température supérieur à 10° 2015	0.6	-0.26	0.06	0.07	rho
	0.019	0.36	0.81	0.8	p-value
Date température supérieur à 10° 2016	-0.38	0.68	-0.4	-0.01	rho
	0.112	0.002	0.04	0.94	p-value
Date température inférieur à 10° 2015	-0.4	0.5	0.63	0.3	rho
	0.09	0.07	0.02	0.3	p-value
Durée t sup à 10° été 2015	-0.74	0.15	0.7	0.49	rho
	0.003	0.61	0.005	0.08	p-value
Tmax 2015	-0.56	-0.14	0.57	0.15	rho
	0.03	0.61	0.02	0.61	p-value
Tmax 2016	-0.48	-0.15	0.33	-0.1	rho
	0.03	0.54	0.15	0.67	p-value

**Code couleur**

	0.1 < p-value < 0.05
	0.05 < p-value < 0.01
	p-value < 0.01

Sur cette partie, certaines données ne sont pas disponibles pour l'année 2016 car les capteurs sont relevés avant la fin de la période de haute température. Ainsi, la durée de cette période et la date de fin ne sont pas connues pour l'année 2016 et ne peuvent pas être intégrées dans la comparaison.

Les résultats semblent montrer que l'altitude, la latitude et la profondeur du lac peuvent expliquer la date de début et la date de fin de la période de haute température. Ainsi le seuil des 10°C en surface est atteint plus tôt pour les lacs de basse altitude et situés au sud. À l'automne, la température de surface devient inférieure à 10°C plus tôt pour les lacs profonds et pour les lacs hauts en altitude.

Pour la durée de cette période, la corrélation semble élevée avec l'altitude et la profondeur du lac. Ce lien paraît cohérent : les eaux de surface des lacs hauts en altitude et peu profonds sont moins longtemps à 10°C que les autres.

Le dernier paramètre est la température maximale de surface. Elle semble corrélée avec l'altitude et avec la profondeur. La température maximale de surface des lacs d'altitude est plus faible, cette corrélation est observée sur les deux années de mesure. Les lacs profonds ont tendance à avoir des eaux de surface plus chaudes que les autres.

Enfin, ces analyses sont les premières utilisant les données haute fréquence. Elles permettent de valoriser ces mesures et de mieux comprendre la dynamique thermique des lacs. Les capteurs haute fréquence apportent un grand nombre de données. Les corrélations sont résumées sur la Figure 23.

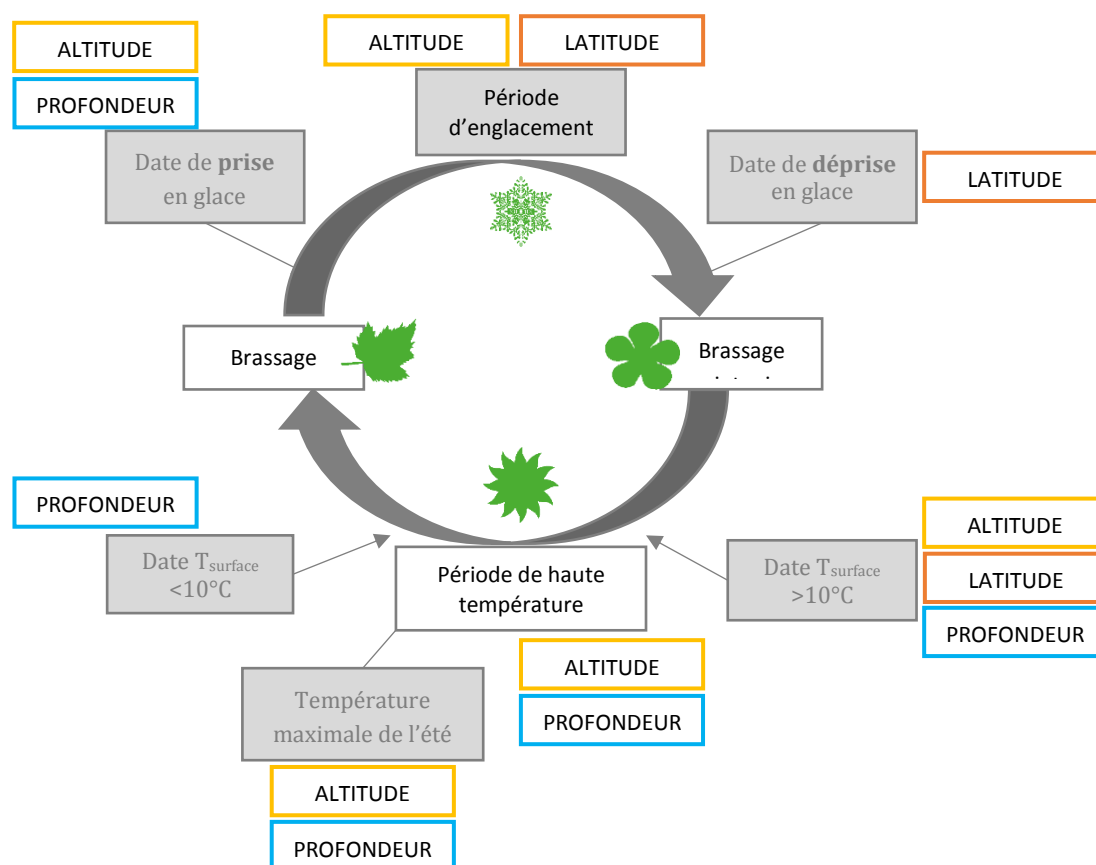


Figure 23: Résumé des corrélations entre la dynamique thermique des lacs et les caractéristiques physiques

Nous restons assez critique face à ces analyses car seules deux ans de mesures sont utilisées. Il serait intéressant de reproduire ces analyses avec les données des années à venir, cela permettrait de s'affranchir de certaines variations annuelles et d'obtenir des résultats plus robustes.

### 3. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau

Les analyses suivantes concernent les données obtenues lors des suivis en septembre et les mesures réalisées sur les prélèvements d'eau des lacs. Même s'il y a des limites d'interprétation car seulement deux années de données sont étudiées, elles permettent néanmoins de caractériser les lacs sur des paramètres physico-chimiques. Les premières observations concernent les données issues des profils de sonde.

#### a. Zones hypoxiques et anoxiques et stratification des lacs

La mesure de la saturation de l'eau en oxygène permet de savoir si des zones hypoxiques ou anoxiques sont présentes au fond du lac. C'est-à-dire des couches avec une très faible concentration en oxygène dissous (saturation en O<sub>2</sub> inférieur à 20% pour une zone hypoxique et inférieure à 5% pour une zone anoxique). Si la concentration en oxygène dissous est très faible au fond du lac, cela peut aller jusqu'à une couche totalement privée d'oxygène devenant inutilisable par les macro-organismes (poisson, macro-invertébrés...), essentiellement le siège de processus microbiens (cf. C. 2. c. Le « bon état » d'un lac).

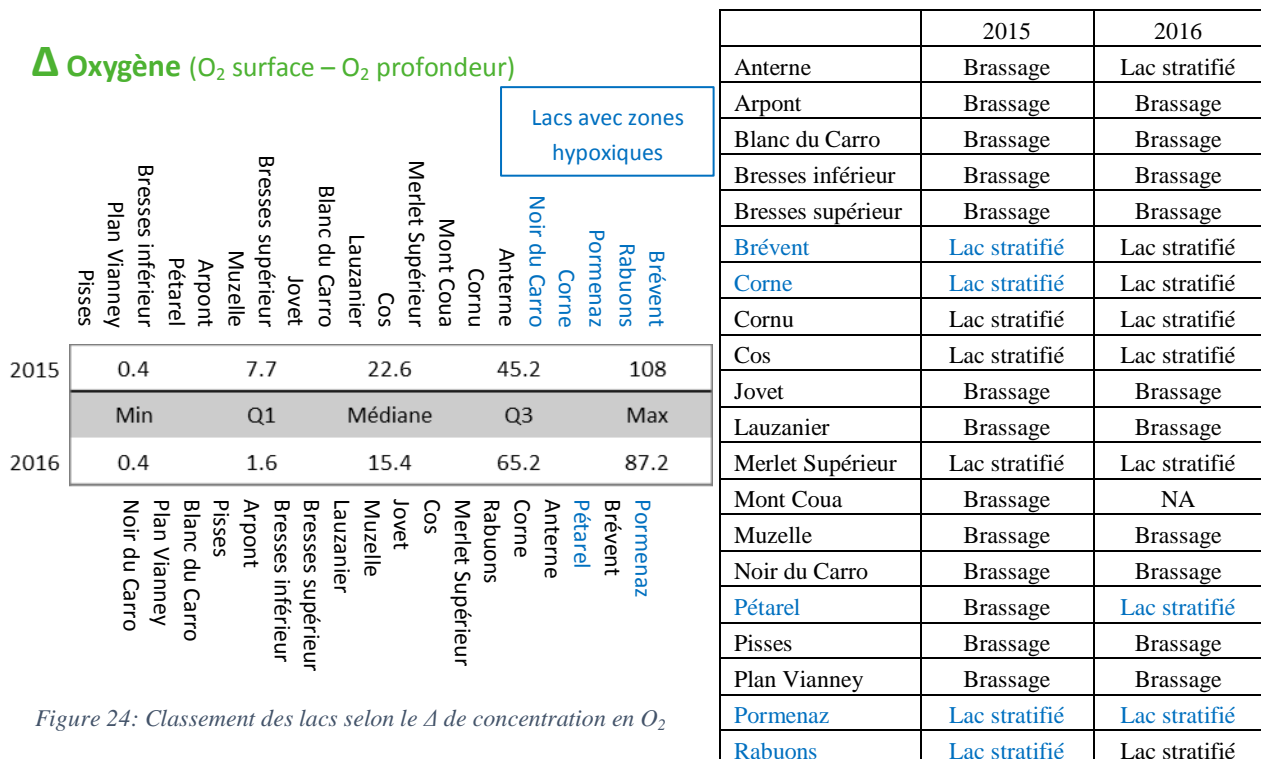
	Septembre 2015	Septembre 2016		Septembre 2015	Septembre 2016
<b>Zones hypoxiques</b>	Brévent (15m) Pormenaz (9m) Noir du Carro (11m) Corne (25m) Rabuons (45m)	Pétarel (20m) Pormenaz (10m)	<b>Zones anoxiques</b>	Brévent (18m)	/

Deux lacs comportent une zone hypoxique en 2016 contre cinq lacs en 2015. Seul le lac de Pormenaz présente une zone hypoxique en 2015 et en 2016 lors des prélèvements.

Le point critique essentiel est que la présence ou l'absence de zones peut dépendre de l'état de stratification du lac et donc de la date de la mesure.

La Figure 24 classe les lacs selon différence de concentration en O<sub>2</sub> entre la surface et le fond du lac.

Tableau 4: Détermination de l'état de stratification des lacs selon l'année



La variation d'oxygène entre la surface et le fond du lac est minime pour certains lacs. Pour d'autres, la différence atteint les 100%, ce qui signifie que des zones très pauvres en oxygène sont présentes au fond du lac. Enfin, de grandes différences entre les années sont visibles pour un même lac.

Les données du profil de température permettent de déterminer l'état de stratification des lacs (cf. Tableau 4) grâce au calcul du delta de température. Nous avons choisi de dire qu'un lac est stratifié si la différence de température entre la surface et le fond est supérieure à 5°C. Cette définition est critiquable car le lac peut être stratifié même si la différence de température est inférieure à 5°C, pour plus de précision il faudrait étudier chaque profil dans son ensemble.

Mise à part le lac de Noir du Carro, tous les lacs avec un déficit d'O<sub>2</sub> en profondeur étaient des lacs stratifiés lors de la mesure. La présence de zone hypoxique ou anoxique est donc potentiellement liée à l'état stratifié des lacs. Un exemple intéressant est le lac de Pétarel. En 2015, lors des mesures c'est un lac en cours de brassage et aucun déficit d'oxygène est visible en profondeur, il garde même une saturation en oxygène de 94% au fond du lac. En 2016, le lac était stratifié lors des mesures et une zone hypoxique est observée au fond du lac. Ainsi, la présence d'oxygène au fond du lac est dépendante de la date du brassage.

Ce résultat montre que d'une année à l'autre les profils de sonde peuvent être très différents même si les analyses sont réalisées tous les ans en septembre. La comparaison des profils entre 2015 et 2016 a peu de sens car l'état du lac varie fortement selon la date de mesure, la température extérieure, la météo du jour ou encore la météo des derniers jours (par exemple, un orage la veille peut modifier totalement la stratification). Concernant les données sur les températures, les données haute fréquence des thermistors sont beaucoup plus intéressantes que les données de sonde pour étudier le fonctionnement des lacs. (cf. F. 2. *Comparaison de la dynamique thermique*). Pour les données sur l'oxygène, le réseau prévoit de poser des capteurs haute fréquence mesurant la saturation en O<sub>2</sub> toute l'année. Ils permettront de connaître la dynamique du lac relative à ce paramètre.

Enfin, des observations générales sur les types de lacs sont possibles. Les lacs les plus froids et les plus en altitude (Noir et Blanc du Carro, Mont Coua et Arpont) étaient en cours de brassage en septembre les deux années. Les grands lacs (Cos et Rabuons) étaient stratifiés les deux années.

## b. pH

La valeur retenue par lac est la moyenne des valeurs mesurées par la sonde sur toute la colonne d'eau. Le graphique de la Figure 25 montre pour chaque lacs les mesures du pH pour les 2 années.

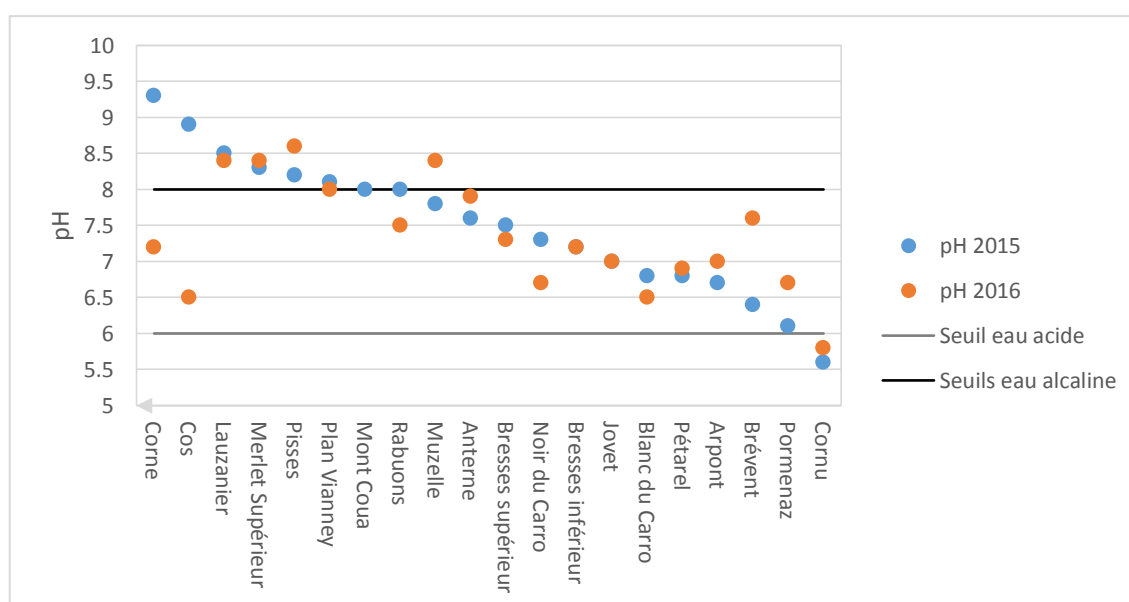


Figure 25: valeurs du pH mesuré dans les lacs les deux années

Le lac Cornu garde un pH de 5 lors des deux mesures annuelles, ces eaux sont donc acides. Les lacs du Lauzanier, du Merlet supérieur et des Pisses ont un pH supérieur à 8 les deux années, leurs eaux sont alcalines. Les autres lacs ont des pH situés entre 6 et 8. Trois lacs ont des valeurs de pH assez différentes entre 2015 et 2016 : au lac Brévent le pH augmente entre 2015 et 2016, alors qu'au lac de Cos et de la Corne le pH diminue. De nombreux paramètres peuvent expliquer les différences de pH entre les deux années (date de prélèvement, luminosité, intensité de la production primaire, température lors de la mesure, activité photosynthétique...). De plus, l'incertitude de mesures sur les sondes pH est assez élevée.

### c. Conductivité

La valeur utilisée est la moyenne des valeurs de conductivité mesurées par la sonde sur toute la colonne d'eau. Les données sont ramenées à une conductivité à 25°C. Une faible conductivité signifie que l'eau est peu minéralisée, ce qui engendre généralement une faible production primaire.

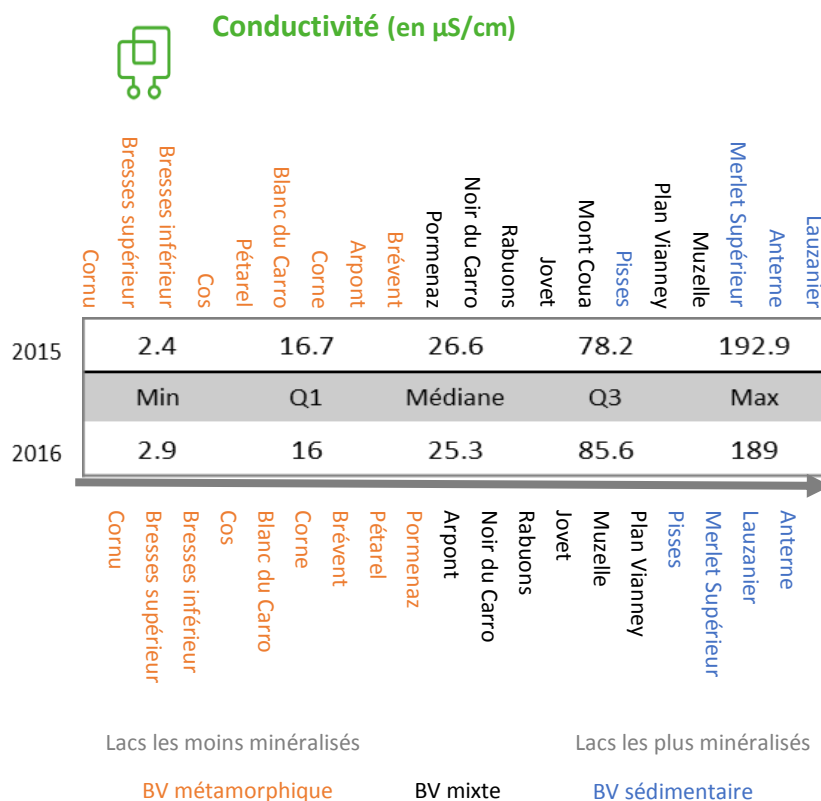


Figure 26: Classement des lacs selon la conductivité

La conductivité dépend fortement de la composition minéralogique du bassin versant.

Les quatre lacs les plus minéralisés sont ceux dont le bassin versant est situé essentiellement sur des roches sédimentaires. À l'inverse, les lacs pauvres en minéraux ont des bassins versant métamorphiques ou cristallins.

Comme attendu, il n'y a pas de changement notable entre 2015 et 2016 pour tous les lacs (cf. Figure 26). Les données des années 2015 et 2016 restent proches pour tous les lacs sauf peut-être pour le lac du Lauzanier, le lac du Plan Vianney et le lac des Pisses, mais les écarts restent faibles.

## 4. Paramètres liés au réseau trophique du lac

Les paramètres trophiques sont des éléments essentiels pour comprendre le fonctionnement biologique des lacs. Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux concentrations en chlorophylle-a et en phosphore puis aux populations de plancton observées dans les lacs.

Les données des deux années permettent d'avoir une vue globale sur les lacs. Une comparaison de tous les lacs du réseau est limitée car les zones de prélèvements des échantillons sont différentes entre les massifs. À l'avenir, les échantillons seront prélevés dans la zone euphotique selon une méthode uniforme à tous les lacs et les données pourront être comparées. Pour l'heure, les comparaisons ci-dessous concernent essentiellement les lacs d'Asters et d'EDF pour lesquels la méthode d'échantillonnage est assez similaire.

### a. Concentration en chlorophylle-a

Sur les 11 lacs échantillonnés, la concentration médiane en chlorophylle-a est de 1,8 µg/l. La valeur minimale est de 0,2 µg/l au lac Cornu en 2016 et de 11 µg/l au maximum au lac de la Corne en 2015. La Figure 27 permet de visualiser les différences.

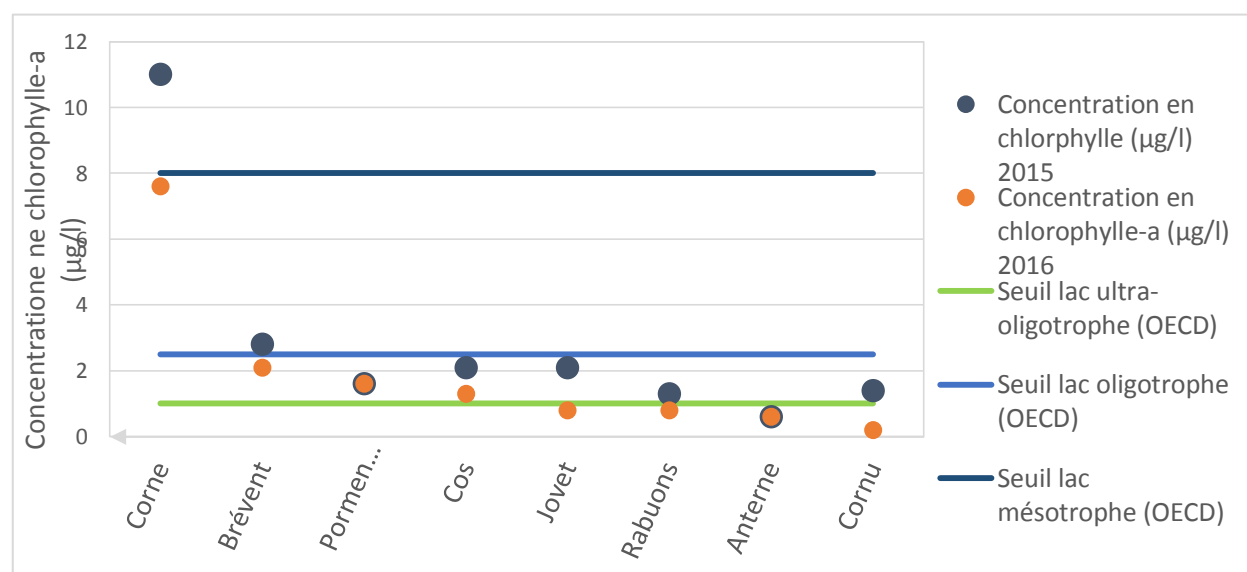


Figure 27: Concentrations en chlorophylle-a des lacs d'Asters et d'EDF, mesures 2015 et 2016:

La concentration en chlorophylle-a est, globalement, inférieure en 2016, sauf pour deux lacs (Anterne et Pormenaz) où la concentration en chlorophylle-a reste stable, toutefois les variations sont minimes et les gammes de concentration sont faibles pour la majorité des lacs. Seul le lac de la Corne est beaucoup plus riche que les autres. En septembre 2016, la concentration moyenne en chlorophylle-a de la zone euphotique au lac Léman (0-20m) était de 8 µg/L. Ainsi, en comparaison avec le Léman, la productivité du lac de la Corne est élevée. C'est assez remarquable car des valeurs si hautes ne sont pas attendues pour les lacs de montagne.

Pour les autres lacs, les valeurs sont plus faibles, ils seraient classés mésotrophe ou oligotrophe d'après l'OECD. Ainsi, le réseau trophique est forcément moins développé que dans les lacs de plaine car la concentration en chlorophylle-a est environ quatre fois inférieure.

Le lac le plus minéralisé (Anterne) est l'un des plus pauvres en chlorophylle. Les lacs de pelouse peu minéralisés (Brévent et Corne) sont les plus riches.

Enfin dans ces analyses, seule la chlorophylle prélevée dans l'eau du lac, c'est-à-dire dans la zone pélagique, est compté. Une part non négligeable de la production primaire pourrait venir de la zone benthique.



## b. Concentration en phosphore total

Le phosphore total est un paramètre essentiel pour connaître l'état trophique d'un lac. C'est un élément nutritif essentiel pour la croissance des végétaux (planctoniques ou macrophytiques). Dans les lacs de haute montagne, de faibles concentrations sont attendues. Cependant, des résultats du projet EMERGE (European mountain lakes ecosystems : regionalisation, diagnostic and socio-evaluation) (Tolloti *et al*, 2006) montrent que certains lacs sont finalement le siège d'une importante production primaire et que ce ne sont pas tous des écosystèmes oligotrophes.

La concentration médiane en phosphore sur les 11 lacs est de 6mg/l. C'est trois fois moins que sur le lac Léman (19µg/l en moyenne annuelle). La valeur minimum est de 3µg/l pour le lac Rabuons et le maximum est de 11µg/l en 2016 au lac de la Corne. De manière générale, les lacs sembleraient plus riches en phosphore en 2016 qu'en 2015 (cf. Figure 28).

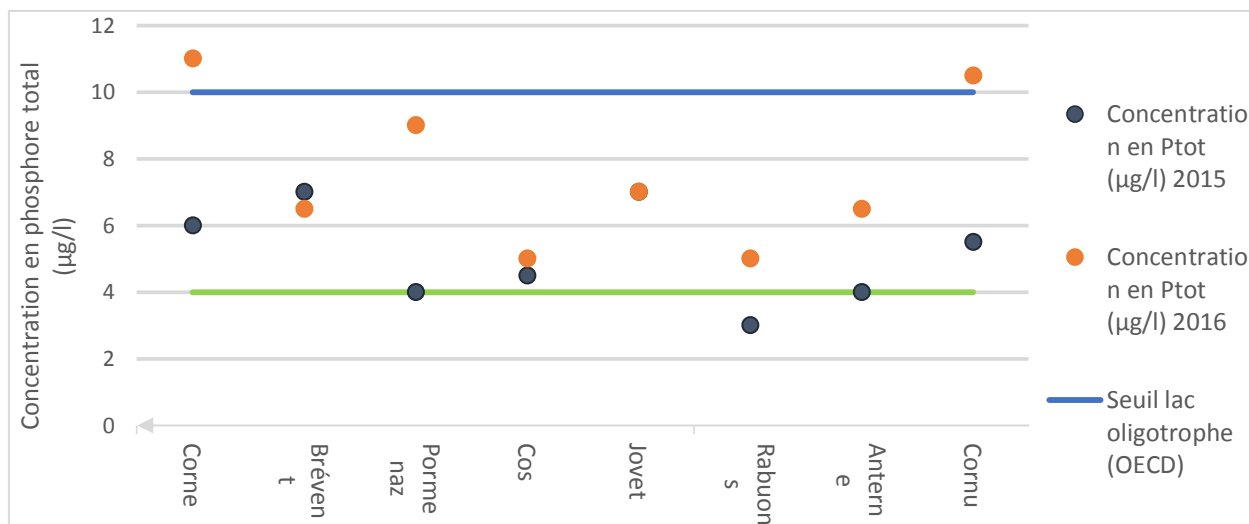


Figure 28: Concentrations en phosphore des lacs d'Asters et d'EDF, mesures de 2015 et 2016

En 2016, les lacs sont donc plus pauvres en chlorophylle mais plus riche en phosphore qu'en 2015. Cette observation pourrait signifier que l'élément limitant la production primaire n'est pas l'apport de phosphore mais peut être liées aux conditions climatiques. Ou alors c'est que le phosphore n'a pas été utilisé par le phytoplancton pélagique mais par les macrophytes ou le phytobenthos.

## c. Phytoplancton

En s'intéressant à la richesse, c'est-à-dire au nombre de taxons différents dénombré, il paraît que les lacs les plus riches en chlorophylle-a sont finalement peu divers dans les taxons présents (Lac de Brévent et de la Corne). Ces lacs ont, par contre, les plus fortes abondances (cf. Figure 29).

Les mesures d'abondances sont très différentes d'un lac à l'autre. Certains lacs (Brévent et Corne) ont une densité de phytoplancton parmi les plus élevés mais très peu d'espèces différentes ont été observées. Par contre, le lac Jovet a une richesse importante mais une faible abondance.

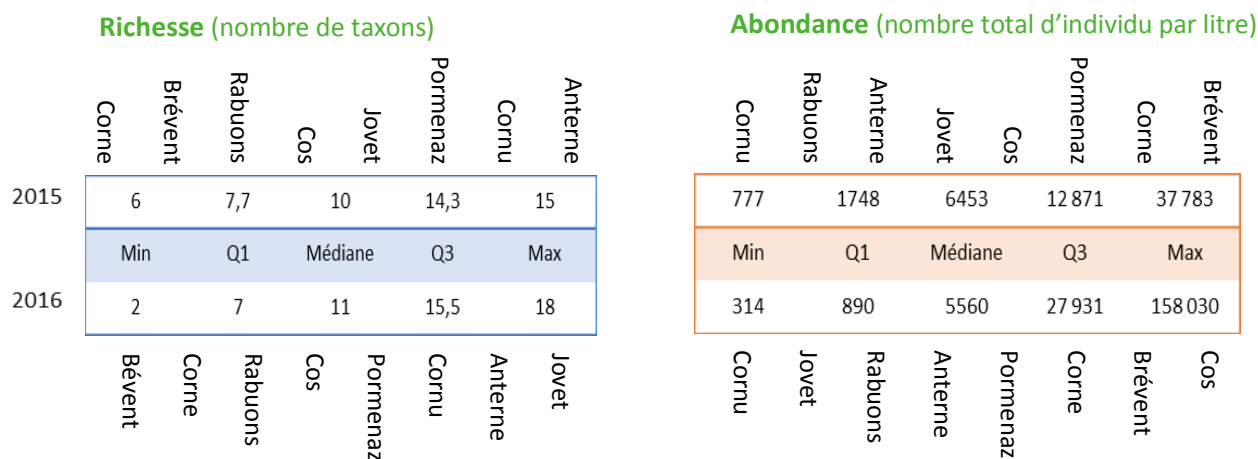


Figure 29 : Comparaison de la richesse et de l'abondance en phytoplancton des lacs

En s'intéressant aux espèces présentes, nous pouvons remarquer que les espèces majoritaires sont toujours différentes d'une année à l'autre et ce ne sont pas les mêmes entre les lacs. Il est difficile de dégager des tendances pour tous les lacs ou même de trouver des ressemblances entre certains lacs.

#### d. Zooplancton

Le nombre de taxons trouvés dans les lacs varient entre 5 et 15. L'abondance est différente entre les lacs et entre les années (cf. Figure 30). Les communautés de zooplancton les plus diversifiées sont observées dans les lacs de Pormenaz et Cornu. Enfin, les communautés les plus abondantes sont dans les lacs du Brévent et Pormenaz.

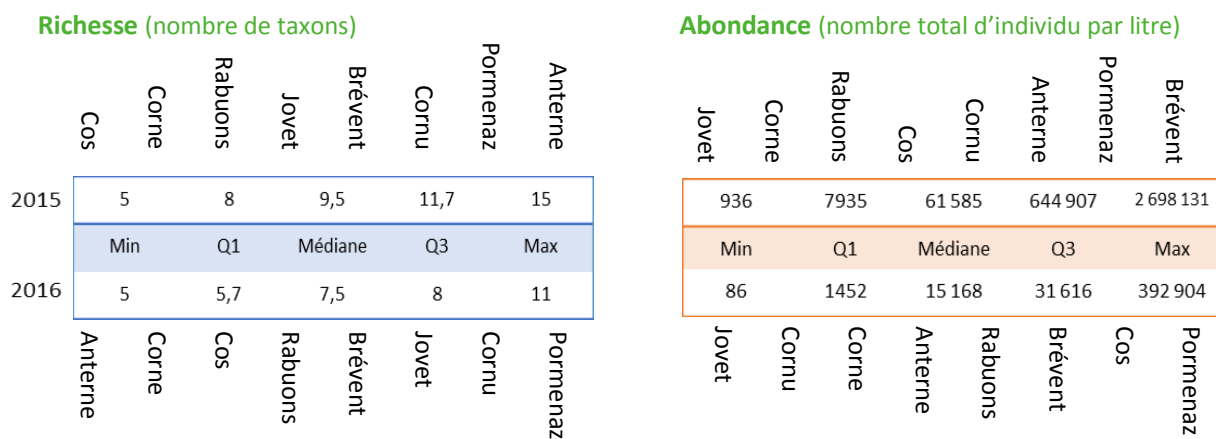


Figure 30 : Comparaison de la richesse et de l'abondance en zooplancton des lacs

Pour tous les lacs, la classe majoritaire est représentée par les rotifères les deux années. Sauf pour le lac Cornu, en 2016, les copépodes sont plus nombreux que les rotifères. À part au lac Cornu, des espèces similaires se retrouvent entre les lacs. L'espèce majoritaire est la même entre certains lacs (*Kellicottia longispina* pour les lacs Jovet et Pormenaz, *Conochilus unicornis* pour les lacs de Cos et de la Corne). Globalement, pour chaque lac l'espèce la plus abondante est la même en 2015 et en 2016.

Les tableaux de données utilisés sont disponibles en Annexe 4 et 5

## 5. Synthèse

Ces premiers résultats permettent de situer les lacs les uns par rapport aux autres et d'avoir de premières informations sur leurs caractéristiques principales.

Les caractéristiques physiques des lacs permettent de les séparer en différents groupes. Selon les variables utilisées (morphologie du lac ou étude du bassin versant) les groupes sont différents, mais certaines ressemblances sont visibles sur la Figure 31. Celle-ci rassemble les résultats de l'ACP (sur la morphologie des lacs et bassins versants) et les groupes faits grâce à l'AFC (réalisé sur les données de caractéristiques du bassin versant).

- > Les lacs du nord ayant un grand bassin versant et une grande différence d'altitude entre le sommet du bassin versant et le lac sont les lacs blancs, proches des glaciers (groupe 5)
- > Les lacs assez haut en altitude, peu profonds et petits sont ceux du groupe 4. Ils ont un apport moyen de sédiment avec peu de végétation.
- > Les lacs du groupe 3 sont regroupés par leurs petits bassins versants
- > Les lacs avec un bassin versant riche en pelouse (groupe 2) ont une faible période d'englacement et sont situés en basse altitude.

Enfin, les grands lacs ont été sortis du groupe 4 du fait de leurs grandes superficies et profondeurs.

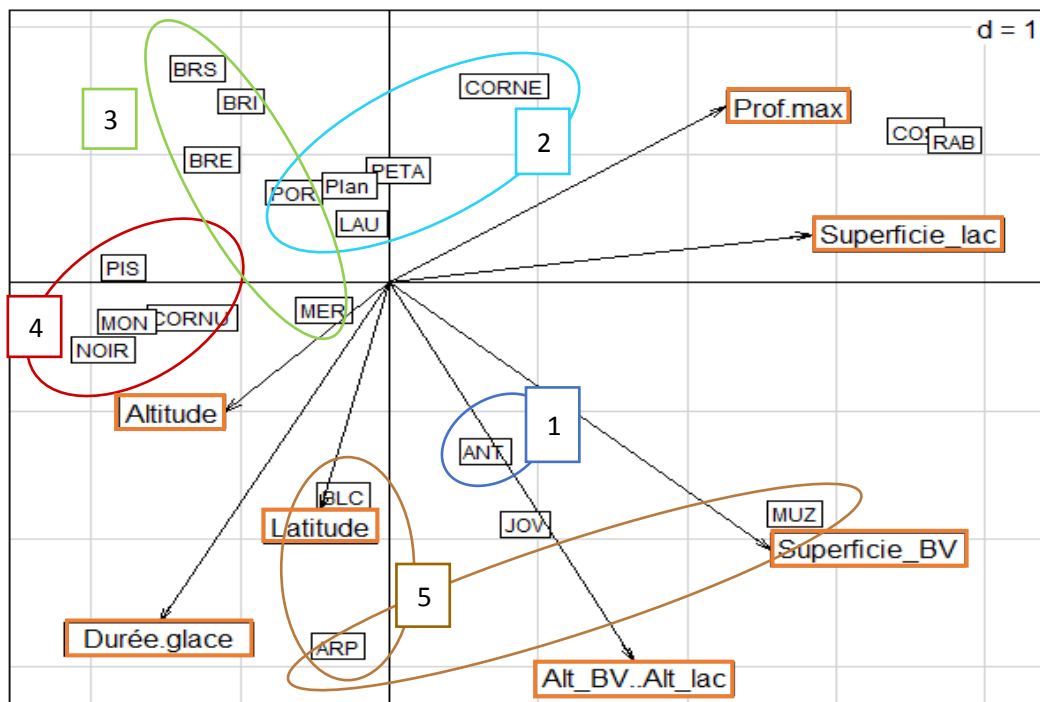


Figure 31: Les 5 groupes de lacs différenciés selon les variables du lac et du bassin versant

Avec les campagnes d'échantillonnage en septembre, des observations supplémentaires peuvent être proposées.

Les données issues des sondes montrent que l'état de stratification thermique influence beaucoup d'autres paramètres et notamment la saturation de l'eau en oxygène. Les mesures de pH et conductivités sont relativement stables entre les deux années. Ces dernières permettent de caractériser les eaux. Entre les lacs, de fortes variations de pH et de conductivité sont observées. Elles sont reliées en grande partie aux caractéristiques du bassin versant.

Concernant les données de phytoplancton et de zooplancton des grandes disparités entre les lacs sont observées entre les abondances. Les lacs de Pormenaz, du Brévent et de la Corne semblent avoir les abondances en phytoplancton les plus importantes. Cette observation pourrait être corrélée avec une courte période d'englacement du lac.

Les écarts de concentrations en chlorophylle-a et phosphore totale entre les lacs n'engendrent pas de différences de peuplement de phytoplancton majeures (en termes de richesse et d'abondance). Une analyse plus précise des espèces présentes permettraient probablement de mieux les distinguer. Les espèces et les abondances en phytoplancton sont très variables d'un lac à l'autre et entre les années. Par contre, pour les comptages du zooplancton, les mêmes espèces ont été retrouvées en 2015 et en 2016, seules les abondances sont différentes.

L'analyse des deux premières années de données est déjà une grande avancée pour détailler la physico-chimie et la biologie de ces lacs. Même si des variations entre 2015 et 2016 sont observées, plusieurs années de mesure permettront de mieux caractériser les lacs notamment pour la biologie. Un plus grand nombre de données sur du long terme permettra de s'affranchir des variabilités inter-annuelles et de considérer les dynamiques temporelles à l'échelle saisonnière ou annuelle. Concernant la biologie, la variabilité inter-annuelle des données semble importante, et peut être expliquées car les communautés de phytoplancton et zooplancton sont sûrement très différentes selon la date de l'échantillonnage.

Enfin, l'année prochaine, les données des 20 lacs relatives à la biologie pourront être comparées car le protocole sera similaire.

## Conclusion

La mise en place d'un suivi à long terme est un moyen essentiel pour étudier les milieux naturels. Avec l'Observatoire des lacs d'altitude, le réseau *Lacs sentinelles* s'est doté d'outils performants pour comprendre le fonctionnement des lacs de montagne et étudier leurs évolutions vis-à-vis des changements globaux.

La phase de terrain et les équipements placés dans les lacs permettent de recueillir des données de qualité. Des capteurs mesurent la température en continu à différentes profondeurs. Une sortie par lac est organisée au mois de septembre pour réaliser des profils de sonde dans la colonne d'eau et pour prélever des échantillons. Des analyses de qualités physico-chimiques et biologiques de l'eau permettent de connaître l'état écologique du lac.

Le rapport du monitoring correspond à une mise en forme des mesures effectuées. Il peut être réalisé assez rapidement chaque année grâce à des outils d'automatisation et à une plateforme de stockage des données commune aux 20 lacs. En plus d'être un outil de communication, il permet de connaître les résultats pour chaque lac grâce à un résumé de l'ensemble des analyses. C'est le fruit d'un travail de mise en commun de données des différents membres du réseau.

Les caractéristiques morphologiques et la localisation des lacs ont permis de réaliser des premières comparaisons et d'établir des groupes de lacs. Le même type d'analyses a été réalisé sur les bassins versants. Enfin, les données mesurées en 2015 et 2016 ont été utilisées pour réaliser une première comparaison des lacs sur des caractères physico-chimiques et biologiques.

Les données des capteurs permettent de comparer la dynamique annuelle des lacs. Des analyses statistiques ont été réalisées pour tester des corrélations entre la dynamique thermique et les caractéristiques « physiques » des lacs. Des résultats cohérents ont pu relier la période de stratification hivernale à l'altitude et la latitude du lac. La période des hautes températures estivales semble liée à l'altitude et à la profondeur du lac.

Les échantillons analysés au laboratoire montrent que les 20 lacs offrent un grand panel de milieux. Malgré le fait qu'ils soient tous localisés en altitude, les propriétés physico-chimiques sont très variables d'un lac à l'autre. C'est en grande partie dû à la géologie et à l'occupation du bassin versant.

Ces analyses permettent également de connaître la biologie des zones pélagiques des lacs. Cette année, seuls huit lacs ont pu être comparés (les différences de protocole entre certains lacs n'ont pas permis d'utiliser toutes les données). L'homogénéisation des protocoles permettra à l'avenir d'augmenter les comparaisons possibles. Les premiers résultats obtenus semblent montrer d'importantes variations de productivité primaire selon les lacs et entre les années.

Avec ces premières analyses, les conclusions sont positives et encourageantes pour la suite. Le protocole en place permet déjà d'appréhender l'état écologique des lacs. Des analyses supplémentaires sur chaque lac pourraient être réalisées plus précisément grâce aux données disponibles.

Deux années de données ne semblent, par contre, pas suffisantes pour connaître les variabilités inter-annuelles de certains paramètres. Il paraît difficile de déterminer la part de variations saisonnières voire journalières dans les mesures physico-chimiques et biologiques obtenues.

Les années à venir permettront de consolider la base de données de l'Observatoire des lacs d'altitude. La continuité du suivi est nécessaire afin d'interpréter les évolutions des lacs et de déterminer quelle est la part de variation « naturelle » des lacs et quelle est la part imputée aux changements globaux.

Enfin ces données sont un support pour les scientifiques afin de développer des études spécifiques sur ces lacs. Elles permettent de faire des choix pour sélectionner des types de lacs afin de mener des approches comparatives et étudier plus finement certains processus.

# Bibliographie

---

## Fonctionnement des lacs

- CALLIERI C., BERTONI R. (1999) Organic carbon and microbial food web assemblages in an oligotrophic alpine lake Pelagic food web in mountain lakes. *Mountain Lakes Research Program, Journal of Limnology*, 58(2): p136-143. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.1999.136>
- CAMARERO, L., BOTEV I., MURI G., PSENNER R., ROSE N., STUCHLIK E. (2009). Trace Elements in Alpine and Arctic Lake Sediments as a Record of Diffuse Atmospheric Contamination across Europe. *Freshwater Biology* 54.12 p2518-2532. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02303.x>
- CATALAN J., CURTIS C. J., KERNAN M. (2009) Remote European Mountain Lake Ecosystems: Regionalisation and Ecological Status. *Freshwater Biology* 54.12, p2419-2432. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02326.x>
- CARRERA G, FERNANDER P, VILANOVA R.M., GRIMALT J.O. (2001) Persistent organic pollutants in snow from European high mountain areas. *Atmospheric Environment*, 35, p245-254.
- DILLON P.J., RIGLER F. H. (1974) The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology and Oceanography*, 19, 5, p767-773. <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1974.19.5.0767>
- JACQUET S., ANNEVILLE O., DOMAIZON I. (2012) Evolution de paramètres clés indicateurs de la qualité des eaux et du fonctionnement écologique des grands lacs péri-alpins (Léman, Annecy, Bourget) : Étude comparative de trajectoires de restauration post-eutrophisation. *Archives des Sciences*.
- SCHINDLER D.E., KNAPP R.A., LEAVITT P.R. (2001). Alteration of Nutrient Cycles and Algal Production Resulting from Fish Introductions into Mountain Lakes. *Ecosystems* 4.4, p308- 321. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-001-0013-4>
- SMITH VH, JOYE SB., HOWARTH RW. (2006) Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51-1, part 2, p351–355.
- THOMPSON R., KAMENIK C., SCHMIDT R. (2005) Ultra-sensitive Alpine lakes and climate change. *Journal of Limnology*, 64.2 p139. <http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2005.139>
- TOLOTTI M., MANCA M., ANGELI N., MORABITO G., THALER B., ROTT E., STUCHLIK E. (2006) Phytoplankton and Zooplankton Associations in a Set of Alpine High Altitude Lakes: Geographic Distribution and Ecology . *Hydrobiologia* 562.1, p99- 122. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-005-1807-8>
- WINDER, M. (2002) Zooplankton Ecology in High-Mountain Lakes. Doctoral Thesis. Zooplankton - still waters - High Mountains. ETH Zurich. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-004339435>

## Études sur les lacs du réseau

Les données utilisées dans les parties F. 2. 3. et 4. proviennent du © SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, Asters, GIS Lacs sentinelles [Données téléchargées de avril 2017 à juin 2017], développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA

- AGENCE DE L'EAU RHONE MEDITERRANEE CORSE. (2016) Étude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône Méditerranée et corse rapport de données brutes et interprétation, lac d'Anterne, suivi annuel 2015. Rapport n° 12-458/2016-PE2015-02.
- BELLE S.(2012) Diagnose écologique et paléolimnologique de 3 lacs d'altitude des Aiguilles Rouges (74) : le lac du Brévent, le lac Noir et le lac du Chereys. Mémoire de master 2, Qualité des Eaux et des sols, Traitement-Option Systèmes Aquatiques et Bassin Versant. Université de Franche-Comté, Asters.
- BIRCK C., DOMAIZON I., RIMET F. (2013) Monitoring of French altitude lakes in multi-stressors situations : focus on 5 lakes in Haute-Savoie. Conference Volume, 5th Symposium for Research in Protected Areas Mittersill, p 59 – 64.
- BOECKLI L., BRENNING A., GRUBER S., NOETZLI J. (2012b) Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. *The Cryosphere* 6, p807-820. <http://dx.doi.org/10.5194/tc-6-807-2012>.
- BRUEL R. (2014) Contraintes et contributions du monitoring haute-fréquence dans le suivi d'écosystèmes-l'exemple du bassin versant d'Anterne (Haute-Savoie). Mémoire de master 2, Dynamique des écosystèmes aquatiques. Université de Pau et des pays de l'Adour, Asters, EDYTEM.
- CEMAGREF (1985) Les lacs de montagne. Inventaire diagnostique d'un patrimoine national. CEMAGREF-Grenoble-Lyon.

- CHARCORNAC J.M. (1986) Lacs d'altitude : Métabolisme oligotrophe et approche typologique des écosystèmes, Thèses pour l'obtention d'un doctorat, Biologie Animale et Ecologie, Ecophysiologie, Université Claude Bernard Lyon.
- FRITZ L. (2016) Contribution à la synthèse des données de l'observatoire des lacs d'altitude. Mémoire de master 1, Sciences Technologies Santé - Equipement, protection et gestion des milieux de montagne. Université Savoie Mont Blanc.
- HIBON L. (2010) Diagnose simplifiée de 5 lacs d'altitude Hauts Savoyards, Mémoire de master 2, Qualité des Eaux et des sols, Traitement- Option Systèmes Aquatiques et Bassin Versant. Université de Franche-Comté, Fédération de pêche de Haute-Savoie.
- LAZZAROTTO J. (2007) L'évolution physico-chimique de cinq lacs d'altitude des réserves naturelles de Haute-Savoie depuis 1998. Asters, INRA.
- MARTINOT J.P. (1979) Ecologie et gestion piscicole des lacs de haute altitude du Parc national de la Vanoise, Thèse pour l'obtention d'un doctorat, Biologie animale, Ecologie appliquée, Université Joseph Fourier.
- MARTINOT J.P., RIVET A. (1989) Lacs de montagne, mieux connaître et bien gérer.
- PROGRAMME INTER-PARCS, MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT (1986) Typologie des lacs de montagne en vue de leur gestion - Synthèse des résultats acquis dans le cadre de la typologie primaire des lacs. *Programme de recherche inter-espaces protégés*.
- WINIARSKI, T. (2000) Les lacs montagnards : indicateurs de la qualité du milieu. Application aux lacs d'altitude des réserves de Haute-Savoie. *Revue de géographie alpine* 88.3, p922. <http://dx.doi.org/10.3406/rga.2000.2998>

## Normes et protocoles

- AGENCE DE L'EAU RHONE MEDITERRANEE CORSE. (2015) Étude des plans d'eau du programme de surveillance des bassins Rhône méditerranée et corse - rapport de données brutes et Interprétation -lac d'Anterne.
- AQUAREF (2016) Opérations d'échantillonnage d'eau en plan d'eau dans le cadre des programmes de surveillance DCE - Recommandations techniques – Edition 2016. [Consulté le 05/09/2017] <http://www.aquaref.fr/guide-recommandations-techniques-aquaref>
- CHICK, JOHN H. ALEX P. LEVCHUK AP., Medley KA. Havel JH. (2010) Underestimation of Rotifer Abundance a Much Greater Problem than Previously Appreciated: Underestimation of Rotifer Abundance. *Limnology and Oceanography: Methods* 8.3, p79- 87. <http://dx.doi.org/10.4319/lom.2010.8.0079>
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER. (2016) Guide relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau), [consulté le 15/07/2017] <http://www.eaufrance.fr/ressources/documents/guide-technique-relatif-a-l>
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER. Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement [consulté le 16/05/2017] <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021865259&dateTexte=&categorieLien=id>
- CEMAGREF INRA (2009) Protocole standardisé d'échantillonnage, de conservation, d'observation et de Dénombrement du phytoplancton en plan d'eau pour la mise en œuvre de la DCE, Version 3.3.1. [Consulté le 22/08/2017] <https://hydrobio-dce.irstea.fr/telecharger/phytoplancton-plan-deau/>

## Autres

- BRUEL R. (2014) Manuel d'utilisation de Data Standardizer, Standardisation des données capteur.
- BRUEL R. (2014) Manuel d'utilisation de B3, Compilation des données haute-fréquence et outil de contrôle des données.
- MAGNUSON J.J. (1990) Long-Term Ecological Research and the Invisible Present. *Long-Term Ecological Research*, 40, 7, p495-501. <http://dx.doi.org/10.2307/1311317>

## Liste de contact

<i>Asters, Conservatoire d'espaces naturels de Haute-Savoie</i>	Carole BIRCK	Chargée de mission – Expertise scientifique et technique	carole.birck@asters.asso.fr
	Jean-Baptiste BOSSON	Chargé de projet – Expertise scientifique et technique	jb.bosson@asters.asso.fr
	Aude SOUREILLAT	Chargée d'étude – Mission conseil et accompagnement des politiques territoriales	aude.soureillat@asters.asso.fr
<i>UMR-CARTEL</i>	Isabelle DOMAIZON	Chef de département adjoint- Directeur de recherche	isabelle.domaizon@inra.fr
<i>INRA – Université Savoie Mont- Blanc</i>	Florent ARTAUD	Maître de conférences université de Savoie Mont Blanc	florent.arthaud@univ-savoie.fr
	Frédéric RIMET	Ingénieur d'étude – Plateau technique biodiversité	frederic.rimet@inra.fr
	Marie-Elodie PERGA		marie-elodie.perga@inra.fr
	Denis BARBET	Ingénieur d'étude – Service informatique et données SOERE	denis.barbet@inra.fr
	Philippe QUÉTIN	Ingénieur d'étude – plateau technique prélèvements et données SOERE	philippe.quetin@inra.fr
<i>UMR IMBE Aix Marseille Université</i>	Laurent CAVALLI	Enseignants-chercheurs – Ecologie des eaux continentales	laurent.cavalli@imbe.fr
<i>Parc national des Ecrins</i>	Clotilde SAGOT	Chargée de mission – Mesures physiques	clotilde.sagot@ecrins- parcnational.fr
<i>EDF-CIH</i>	Vincent CHANUDET	Direction technique – Service Environnement et Société	vincent.chanudet@edf.fr
<i>Parc national de la Vanoise</i>	Vincent AUGE	Chargé de mission scientifique et milieux naturels	vincent.auge@vanoise- parcnational.fr
<i>Parc national du Mercantour</i>	Marie-France LECCIA	Chargée de mission - Partenariats Scientifiques	marie- france.leccia@mercantourparcn ational.fr



# Glossaire

---

- Anoxie** : Saturation en oxygène dissous dans l'eau inférieure à 5%.
- Bassin versant** : Toute la pluie qui arrive sur le bassin versant arrivera ensuite dans le lac. C'est donc la surface du territoire qui alimente le lac en eau.
- Biocénose** : Ensemble des espèces présentes dans un écosystème.
- Changements globaux** : Changements dues aux activités humaines, de manières directes ou indirectes. C'est par exemple le changement climatique, la perturbation des écosystèmes et de la biodiversité, l'urbanisation des territoires, ...
- Données haute fréquence** : Données acquises à intervalle de temps régulier relativement proche (1 mesure par heure par exemple).
- Date de prise en glace** : Date à laquelle la stratification hivernale du lac se met en place, la température de surface est inférieure à la fois à 4°C et à la température du fond du lac.
- Date de déprise en glace** : Date à laquelle le brassage printanier se produit. La température de surface devient supérieure à la température du fond du lac.
- Ecosystème** : Ensemble dynamique formé par les organismes vivants et le milieu dans lequel ils évoluent ainsi que toutes leurs interactions.
- Eutrophisation** : Enrichissement des eaux en nutriment conduisant à une altération générale du milieu par la prolifération de végétaux et de bactéries. Dans les lacs, l'eutrophisation engendre l'apparition d'une zone « morte » au fond du lac (très pauvre en oxygène et le siège de processus bactériens nocifs).
- Hypoxie** : Saturation en oxygène dissous dans l'eau inférieure à 20%.
- Lac de montagne/ d'altitude** : Etendu d'eau stagnant situé à au moins 1500m d'altitude. Le lac est couvert de glace une grande partie de l'année et peu de végétation s'y développe.
- Macrophyte** : Plantes aquatiques macroscopiques.
- Monitoring** : Action de « contrôle » ou de surveillance d'un écosystème grâce à un recueil de données périodique.
- Phytobenthos** : Organisme végétal vivant dans la zone benthique.
- Nutriment** : Substance organique ou minérale assimilable par les organismes.
- Plancton** : Organisme mono ou pluricellulaires de petite taille vivant dans la zone pélagique. Le phytoplancton est végétal, c'est un groupe très hétérogène qui regroupent des algues et des bactéries. Le zooplancton est animal.
- Paléo-écologie** (dans les lacs) : Etude des sédiments du fond des lacs pour connaître l'écologie des écosystèmes du passé.
- Réseau trophique** : Ensemble des interactions dans un écosystème entre le milieu et les espèces présentes.
- Suivi à long terme** : Recueil de données de manière régulière pendant une longue période sur un système particulier.
- Zone benthique** : Partie du lac comprenant le fond marin.
- Zone pélagique** : Partie du lac comprenant la colonne d'eau.

# ANNEXES

---

## Table des annexes

<b>Annexe 1 :</b>	Extrait du rapport du monitoring 2016.....	I
<b>Annexe 2 :</b>	Rapport : Limites du protocole commun de l'Observatoire des lacs d'altitude et pistes d'améliorations – <i>Version non définitive</i> .....	II
<b>Annexe 3 :</b>	Détails de la dynamique thermique pour chaque lac du réseau.....	III
<b>Annexe 4 :</b>	Tableau de données relatives aux profils de sondes et aux analyses physico-chimiques.....	VI
<b>Annexe 5 :</b>	Tableau de données relatives aux analyses biologiques.....	V

## **Annexe 1 : Extrait du rapport monitoring**

Le rapport du monitoring de l'année 2016 comporte une introduction, une première comparaison des lacs et les 20 fiches lacs. Il fait en tout 84 pages.

Pour des raisons de densité des annexes, seule la partie introductive et trois fiches lacs sont présentées dans les pages suivantes.

L'ensemble du rapport peut être téléchargé à l'adresse suivante :

<http://www.lacs-sentinelles.org/fr/ressources/rapport-2016-du-monitoring>





réseau  
lacs  
sentinelles

# Rapport annuel 2016 du monitoring Observatoire des lacs d'altitude

Les lacs d'altitude, sentinelles pour le suivi des changements globaux des Alpes françaises

Contribution : Raffaella Napoleoni , Carole Birck et Jean-Baptiste Bosson (Asters), Florent Arthaud et Isabelle Domaizon (UMR CARTELL)



Les  
partenaires



Les  
financeurs



# Table des matières

1.	<a href="#">Contexte du projet</a> .....	p1
2.	<a href="#">Localisation des lacs</a> .....	p2
3.	<a href="#">Paramètres mesurés en 2016</a> .....	p3
4.	<a href="#">Grille de lecture</a> .....	p4
5.	<a href="#">Comparaison des lacs en 2016</a> .....	p6
6.	Fiches lac.....	p13
1.	Lacs de Haute-Savoie.....	p13
2.	Lacs des Ecrins.....	p38
3.	Lacs de la Vanoise.....	p50
4.	Lacs d'EDF.....	p59
5.	Lacs du Mercantour .....	p74

# Contexte du projet

Les lacs d'altitude sont nés de conditions ou d'événements naturels exceptionnels, mais sont aussi le résultat d'une longue interaction entre l'homme et ces milieux. En conséquence, ils constituent des milieux rares et uniques.

Encore peu étudiés mais reconnus en tant qu'écosystèmes d'exception, ils font l'objet d'un suivi approfondi avec le « Réseau Lacs Sentinelles », qui met en place un dispositif commun pour des études sur du long terme.

En 2015, lors de la campagne de prélèvement, le Réseau a pour la première fois homogénéisé les procédures de mesures et la mise en commun des données afin de permettre une meilleure comparaison et valorisation des résultats obtenus.

Bénéficiant de la dynamique du Réseau Lacs sentinelles et la création du GIS depuis 3 ans, le projet a pour objectifs de centraliser les connaissances sur ces écosystèmes d'altitude et d'identifier les paramètres clefs de la gestion de ces milieux afin de les gérer de manière pertinente. Le GIS permet une collaboration entre gestionnaires des milieux naturels et scientifiques. Avec l'observatoire des lacs d'altitude, le réseau a mis en place un outil efficace d'acquisition et de centralisation des données sur ces milieux, emblématiques des paysages d'altitude.

Ce projet comporte donc un double objectif. Le premier, sur le court terme, constitue un aperçu annuel de l'état des lacs, primordial pour débiter le projet afin d'avoir une vision initiale de l'état écologique des lacs. C'est ce que propose ce rapport annuel.

Le second se fera sur le long terme. Il constitue l'élément clef du projet puisqu'il permettra d'étudier et d'analyser l'évolution des lacs

dans le temps. De plus, ce suivi sur le long terme permettra des discussions au sein des partenaires afin d'évaluer régulièrement la pertinence des mesures de gestion réalisées. Il sera également possible de faire évoluer les protocoles communs, en fonction des connaissances acquises et des besoins définis.

La DCE (Directive Cadre sur l'Eau) constitue, à l'heure actuelle, la référence pour identifier la qualité des eaux. Les seuils proposés par cet outils réglementaire sont essentiels pour atteindre les objectifs de bon état écologique des masses d'eau fixés par la directive européenne. Les lacs du réseau ne sont pas directement concernés par cette réglementation (car leur superficie est inférieure à 50ha). De plus, le protocole mis en place par le réseau est différent du protocole DCE : un seul échantillonnage par an est réalisé du fait des contraintes liées aux lacs d'altitude et de la volonté d'un suivi à long terme.

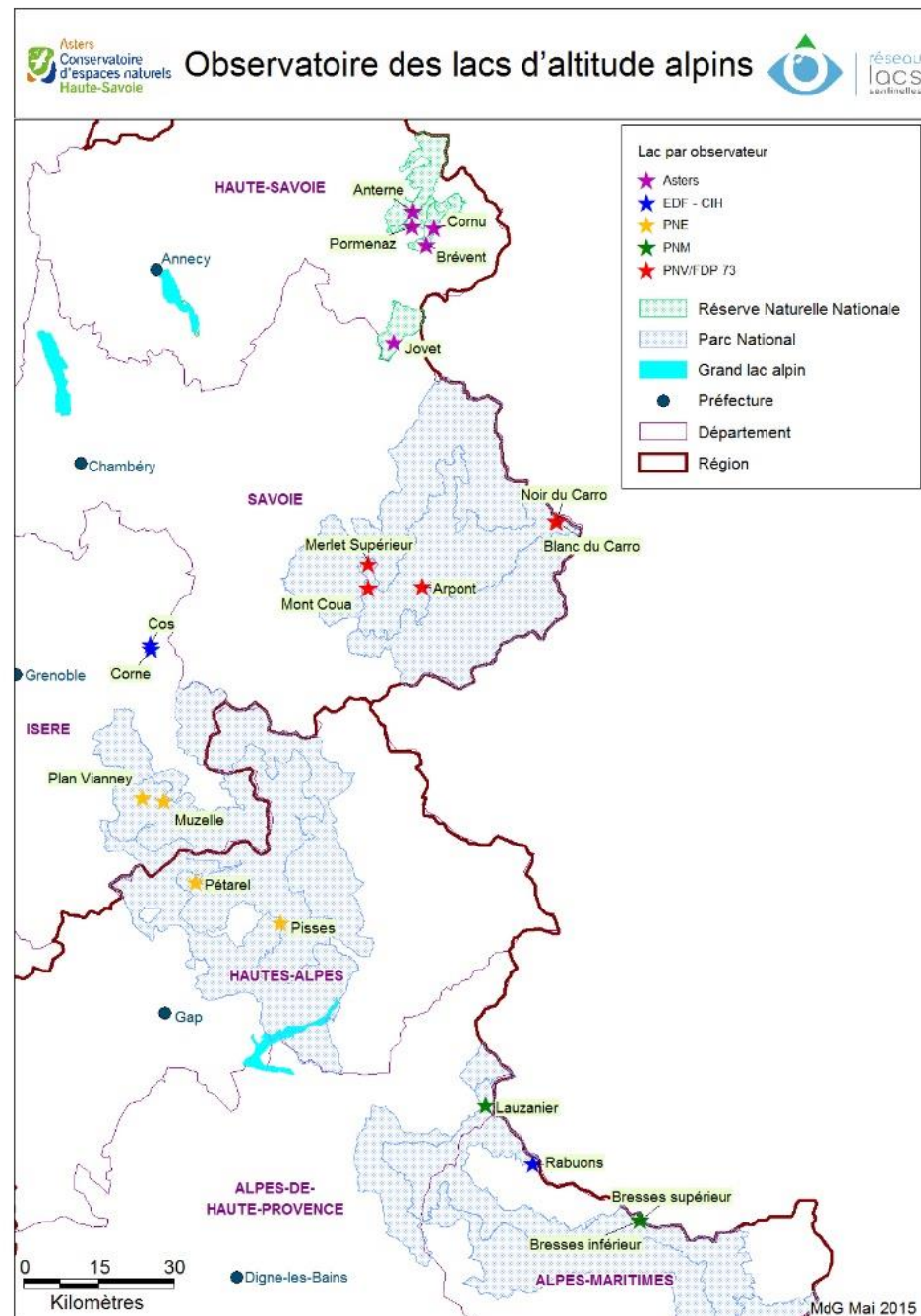
La mise en place de l'observatoire « Lacs sentinelles » a pour objectif à moyen et long terme de définir une typologie des lacs de montagne.

Les protocoles de mesure et l'explication des paramètres mesurés, ainsi que la méthodologie de réalisation du rapport annuel par lac sont détaillées dans le rapport « Contribution à la synthèse des données de l'observatoire des lacs d'altitude » (juin 2016) réalisé par Louise Fritz (Université Savoie Mont-Blanc/Asters) en collaboration étroite avec le CARRTEL.

La forme du rapport a été mis à jour et complété pour l'année 2016 par Raffaella Napoleoni (Asters/CARRTEL).

# Localisation des lacs

Lacs		Altitude du lac (m)	Superficie du lac (ha)	Profondeur max (m)
<b>Asters</b>	Anterne	2063	11.6	12
	Brévent	2159	2.95	20
	Cornu	2276	5.3	22
	Jovet	2173	7.5	8
	Pormenaz	1945	4.6	9
<b>PN Ecrins</b>	Pétarel	2095	2.29	20
	Muzelle	2105	9.68	18
	Pisses	2490	1.62	7
	Plan Vianney	2250	6.26	12
<b>PN Vanoise</b>	Merlet Supérieur	2452	4.91	29
	Mont Coua	2672	2.43	10
	Blanc du Carro	2752	4.65	6
	Noir du Carro	2759	1.1	11
	Arpont	2666	3.5	17
<b>EDF</b>	Corne	2098	8.3	27
	Cos	2183	20	52
	Rabuons	2500	26	50
<b>PN Mercantour</b>	Bresses inférieur	2458	1.2	13
	Bresses supérieur	2501	1	12
	Lauzanier	2284	3.3	7





# Paramètres mesurés en 2016

✓ = Données disponibles		Paramètres "obligatoires"			Paramètres optionnels			
		Transparence (Secchi)	Profil de sonde (O2, T°C, Cond, pH)	Chaîne de thermistors (fond et surface)	Chimie de l'eau (surface et fond)	Zooplancton	Phytoplancton	Chlorophylle a
Asters	Brévent	Pas de données	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Cornu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Pormenaz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Anterne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Jovet	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Parc national des Ecrins	Muzelle	✓	✓	✓		Pas de données	✓	
	Pisses	✓	✓	✓		✓	✓	
	Plan Vianney	✓	✓	Données de juin à sept uniquement		✓	✓	
	Pétarel	✓	✓	Données de juin à sept uniquement		✓	✓	
Parc national de la Vanoise	Blanc du Carro	✓	✓	✓				
	Noir du Carro	✓	✓	✓				
	Merlet Supérieur	✓	✓	Données uniquement en surface				
	Arpont	✓	✓	✓				
	Mont Coua	✓	Problème de sonde	✓				
Parc national du Mercantour	Lauzanier	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Bresses inférieur	✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Bresses supérieur	✓	✓	✓		✓	✓	✓
CIH	Cos	✓	✓	Température en profondeur : données de juin à sept uniquement	✓ (sauf pour Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na, Cl, S)	✓	✓	✓
	Corne	✓	✓	✓	✓ (sauf pour Ca <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na, Cl, S)	✓	✓	✓
	Rabuons	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

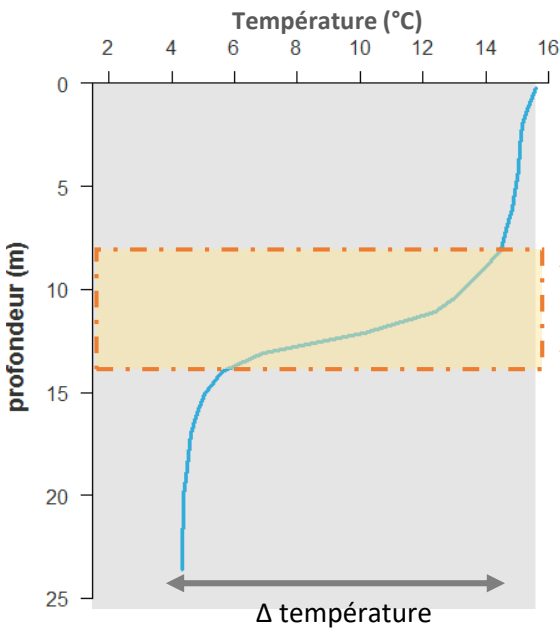
# Grille de lecture

## Profil de température en septembre

Les données issues des profils sont comparées selon 4 paramètres.

La **température de surface** et la **température au fond du lac** sont mesurées avec la sonde. Avec ces 2 données, il est également possible de calculer le **delta de température** (température de surface – température au fond) qui nous renseigne sur la stabilité de la colonne d'eau.

Le dernier paramètre comparé est la **profondeur de la thermocline**. La thermocline est la zone de transition thermique entre 2 couches de température différente.



Thermocline

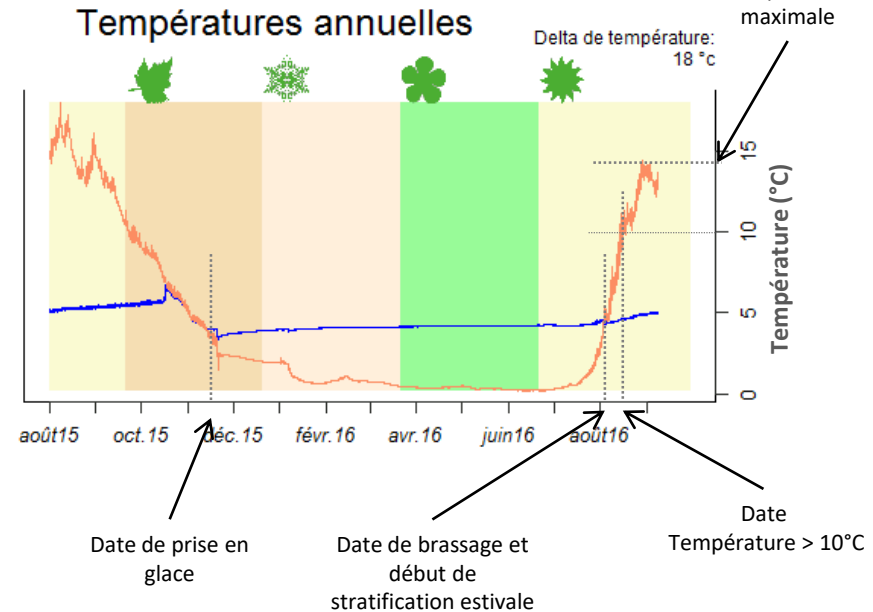
La thermocline est bien visible sur les lacs stratifiés (Lac de la Corne par exemple) et elle n'apparaît pas sur certain profil de sonde. La thermocline est définie physiquement par une diminution de la température d'au moins 1°C par mètre.

Pour une analyse synthétique, nous dirons que le lac est brassé si  $\Delta < 5^\circ\text{C}$  et le lac est stratifié si  $\Delta > 5^\circ\text{C}$ .

## Dynamique thermique annuelle

La mesure en continu de la température (par un capteur placé à une profondeur précise) permet de définir la dynamique thermique du lac sur l'année. Pour comparer les lacs entre eux, différents paramètres ont été choisis :

- La date de prise en glace : lorsque la température en surface est inférieure à la fois à la température du fond et à 4°C.
- La date de début de stratification estivale : lorsque la température en surface est supérieure à la température au fond du lac.
- La date où la température en surface devient assez élevée, le seuil choisi est 10°C.
- La température maximale en surface en été



(La date de début de brassage automnal n'est pas calculée. Elle est difficile à estimer avec seulement 2 thermistors et à cause des brassages fréquents dus aux orages de fin d'été.)

# Grille de lecture



## pH:

La valeur retenue par lac est la moyenne des valeurs mesurées par la sonde sur toute la colonne d'eau. La précision de cette mesure correspond à une décimale (ex: 7.4). Le pH dépend fortement de la géologie du bassin versant mais également de l'activité photosynthétique à l'échelle journalière et saisonnière.

## Conductivité :



La valeur utilisée est la moyenne des valeurs de conductivité mesurées par la sonde sur toute la colonne d'eau. Les valeurs sont ramenées à une conductivité à 25°C. Une faible conductivité signifie que l'eau est peu minéralisée, ce qui engendre généralement une faible production primaire.

## Concentration en oxygène dissous:



Pour comparer les lacs, nous pouvons utiliser le delta d'oxygène (concentration en O<sub>2</sub> dissous en surface – concentration en O<sub>2</sub> dissous en profondeur). Une valeur de delta élevée est généralement associée à une stratification thermique marquée.

## Zones hypoxique et anoxique:

Dans certains cas, la concentration en oxygène dissous est très faible au fond du lac, cela peut aller jusqu'à une couche totalement privée

d'oxygène devenant inutilisable par les macro-organismes (poisson, macro-invertébrés...), essentiellement le siège de processus microbiens.

La couche est dite hypoxique si la concentration en oxygène dissous est inférieure à 20% et anoxique si elle est inférieure à 5%. Dans les couches anoxiques les processus de décomposition assurés par les bactéries prévalent conduisant au recyclage d'éléments minéraux et potentiellement à la production de méthane (CH<sub>4</sub>).

## Zone euphotique :



La zone euphotique est calculée à partir de la mesure de la transparence de l'eau avec le disque de Secchi.

Zone euphotique = 2.5 x profondeur du Secchi

La zone euphotique est la couche supérieure du lac où la pénétration de la lumière est suffisante pour permettre une activité photosynthétique.

Pour certains lacs, le calcul montre que la zone euphotique dépasse la profondeur du lac. Cela signifie qu'il y a potentiellement une activité de production primaire par les organismes phototrophes dans toute la colonne d'eau.

## Pic de concentration en chlorophylle-a :



La sonde multi paramètre mesure également la concentration en chlorophylle-a. Cette mesure est peu fiable, nous n'utilisons pas les valeurs données par les mesures mais la forme du profil est intéressante pour connaître la profondeur du pic de concentration en chlorophylle-a.

Pour la concentration en chlorophylle-a, des échantillons d'eau sont prélevés dans la zone euphotique.



## Plancton

Pour le phytoplancton et le zooplancton, 4 paramètres sont comparés :

- La **richesse** est le nombre de taxons déterminé dans l'échantillon.
- L'**abondance** est le nombre total d'individu observé dans l'échantillon.
- La **diversité de Shannon (H')** est un indice qui est fonction de la richesse taxonomique et de la proportion relative de chaque taxon Plus H' est grand plus la diversité est importante. H'=0 signifie qu'une seule espèce est présente.
- L'**équitabilité de Piélou (E)** est le rapport de la diversité de Shannon sur la diversité maximale potentielle.


Il varie entre 0 et 1.

E= 0 : Tous les individus sont de la même espèce.

E= 1 : Toutes les espèces ont la même abondance.

# Comparaison des lacs sur les données 2016

## Dynamique thermique

	Brassage et stratification		Températures de surface en été	
	Date de prise en glace	Date de début de stratification estivale	Date où la température est supérieure à 10°	Température maximale (°C)
Anterne	21-nov-15	07-juil-16	22-juil-16	15.2
Brévent	21-nov-15	08-juil-16	19-juil-16	15.4
Cornu	15-nov-15	03-août-16	14-août-16	14.5
Jovet	05-nov-15	27-juin-16	26-août-16	11,4
Pormenaz	24-nov-15	01-juil-16	09-juil-16	18,4
Pétarel			27-juin-16	17,0
Muzelle	14-nov-15	30-mai-16	07-juil-16	14.0
Pisses	19-oct-15	27-juin-16	27-juil-16	14.9
Plan Vianney			12-juil-16	16.5
Arpont	20-nov-15	10-juil-16	/	6,2
Blanc du Carro	20-nov-15	08-juil-16	20-juil-16	13,3
Noir du Carro	02-nov-15	06-juil-16	20-juil-16	14,4
Merlet Supérieur				
Mont Coua	23-nov-15	17-juil-16	04-août-16	13.9
Lauzanier	22-oct-15	26-mai-16	/	8.5
Bresses inférieur	22-nov-15	06-juin-16	22-juin-16	17,1
Bresses supérieur	16-janv-16	09-juin-16	23-juin-16	16,3
Cos		28-juin-16	07-juil-16	15.9
Corne	22-nov-15	18-juin-16	02-juil-16	18.9
Rabuons	22-nov-15	14-juin-16	02-juil-16	14.6

# Comparaison des lacs sur les données 2016

## Paramètres physiques

Chaque tableau regroupe les valeurs médiane, min, max, et les quartiles (Q1 et Q3) pour les paramètres mesurés lors des prélèvements au mois de septembre. En dessous des tableaux, les lacs sont classés par ordre croissant selon le paramètre étudié.

### Oxygène

Lacs présentant une zone hypoxique (profondeur) :

Pétarel (20m)

Pormenaz (9.5m)

Aucun lac ne comporte une zone anoxique en 2016

### Oxygène (en %)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
0.4	1.7	15.4	62.2	87.2
0.4	0.5	1	1.1	1.1
Noir du Carro	Plan Vianney	Blanc du Carro	Arpont	Pisses
		Bresses supérieur	Bresses inférieur	3.3
		4.1	8.6	14.5
		16.2	36.4	44.7
		Jovet	Muzelle	Merlet Supérieur
			Cos	44.7
			51.8	69.7
			69.7	77.2
			77.2	81.9
			81.9	85.2
			85.2	87.2
			87.2	

### pH

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
5.8	6.8	7.2	8.0	8.6

5.8	6.5	6.5	6.7	6.7	6.9	7	7.2	7.2	7.3	7.5	7.6	7.9	8	8.4	8.4	8.6
Cornu	Cos	Blanc du Carro	Pormenaz	Noir du Carro	Pétarel	Arpont	Jovet	Bresses inférieur	Bresses supérieur	Rabuons	Brévent	Anterne	Plan Vianney	Muzelle	Merlet Supérieur	Pisses

Eau acide

Eau alcaline

### Conductivité (en µS/cm)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
2.9	16	25.3	85.6	189

3	5	6	11	14	18	18	20	23	25	27	43	54	83	89	95	163	176	190
Cornu	Bresses supérieur	Bresses inférieur	Cos	Blanc du Carro	Corne	Brévent	Pétarel	Pormenaz	Arpont	Noir du Carro	Rabuons	Jovet	Muzelle	Plan Vianney	Pisses	Merlet Supérieur	Lauzanier	Anterne

Lacs les moins minéralisés

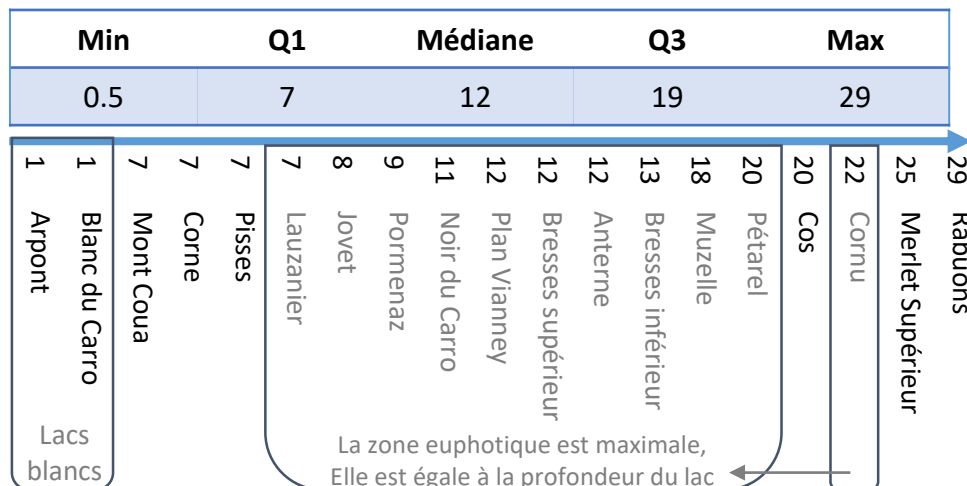
Lacs les plus minéralisés

# Comparaison des lacs sur les données 2016

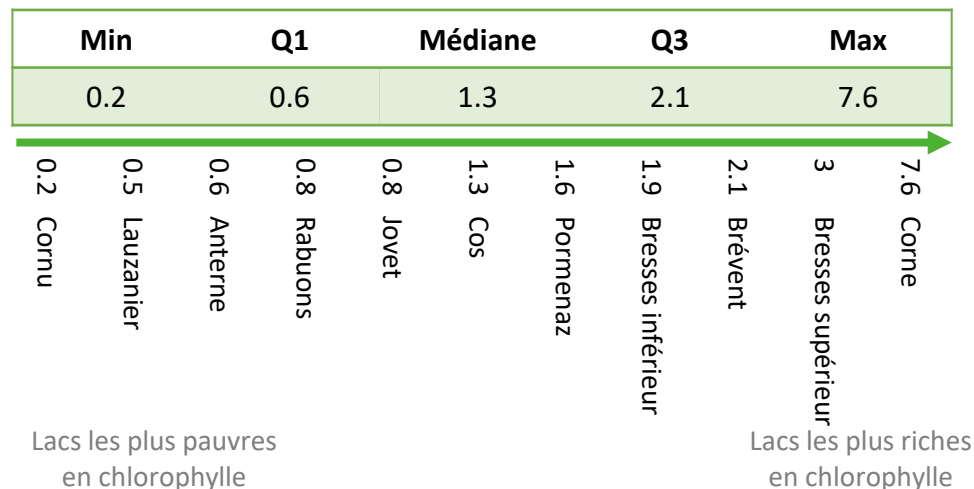
## Paramètres trophiques



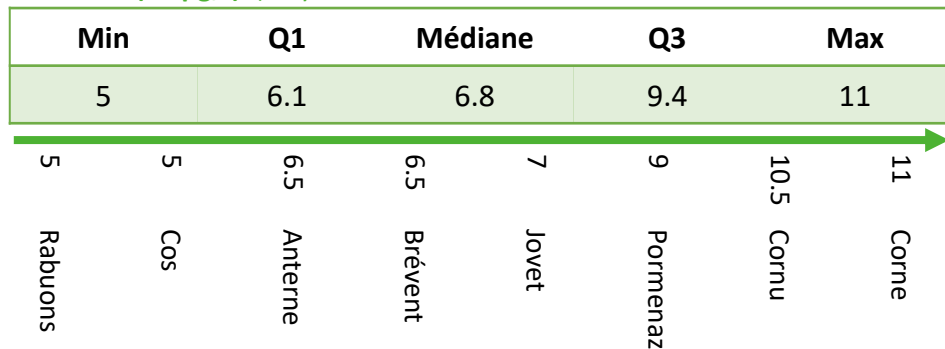
### Profondeur de la zone euphotique (m)



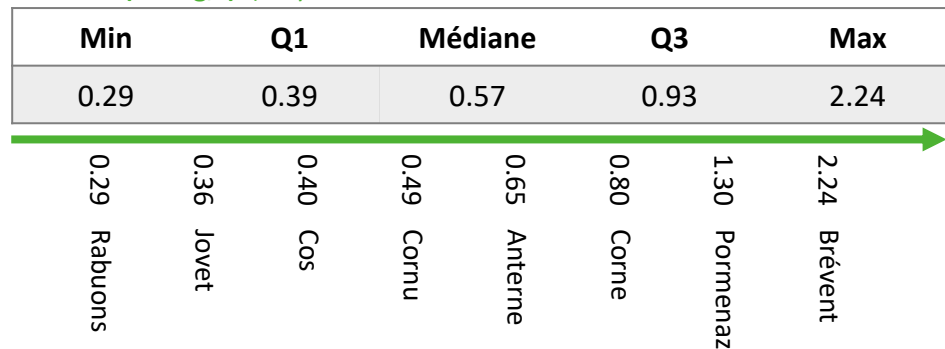
### Concentration moyenne en Chlorophylle-a dans la zone euphotique (en µg/l)



### Ptot Concentration en phosphore totale (en µg/l) (moyenne des concentrations des échantillons surface et fond)



### COT Concentration en carbone organique total (en mg/l) (moyenne des concentrations des échantillons surface et fond)



# Comparaison des lacs sur les données 2016



Température (selon les profils de sonde de septembre 2016)

## Température en profondeur (°C)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
4.1	4.6	6.7	8.3	10.4

10.4 Bresses inférieur  
9.9 Plan Vianney  
9.1 Bresses supérieur  
8.4 Pormenaz  
8.3 Noir du Carro  
8.1 Pisses  
7.5 Jovet  
7.3 Lauzanier  
6.8 Muzelle  
6.7 Anterne  
6.2 Blanc du Carro  
5.8 Pétarel  
5.0 Cornu  
4.5 Merlet Supérieur  
4.5 Brévent  
4.3 Cos  
4.3 Corne  
4.1 Arpont  
4.1 Rabuons

## Température en surface (°C)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
5.2	9.1	10.7	14.2	18.3

18.3 Pormenaz  
15.6 Corne  
15.5 Brévent  
14.6 Cornu  
14.3 Anterne  
14.1 Cos  
12.4 Pétarel  
10.9 Rabuons  
10.8 Jovet  
10.7 Bresses inférieur  
10.5 Muzelle  
10.0 Plan Vianney  
9.7 Merlet Supérieur  
9.3 Bresses supérieur  
8.9 Noir du Carro  
8.8 Lauzanier  
8.7 Pisses  
6.9 Blanc du Carro  
5.3 Arpont

## Profondeur de la thermocline (en m)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
1.1	5.3	8.1	9.7	13.5

13.5 Rabuons  
9.9 Muzelle  
9.9 Cos  
9.2 Pétarel  
8.1 Merlet Supérieur  
8.1 Corne  
6.3 Anterne  
5.0 Brévent  
1.3 Pormenaz  
1.1 Cornu

## Δ température (T de surface – T au fond)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
0.06	0.6	3.7	8.6	11.3

11.3 Corne  
11.0 Brévent  
9.9 Pormenaz  
9.7 Cos  
9.6 Cornu  
7.6 Anterne  
6.8 Rabuons  
6.6 Pétarel  
5.1 Merlet Supérieur  
3.7 Muzelle  
3.2 Jovet  
1.4 Lauzanier  
1.1 Arpont  
0.7 Blanc du Carro  
0.5 Pisses  
0.5 Noir du Carro  
0.3 Bresses inférieur  
0.2 Bresses supérieur  
0.1 Plan Vianney

Lacs instables

Lacs stratifiés

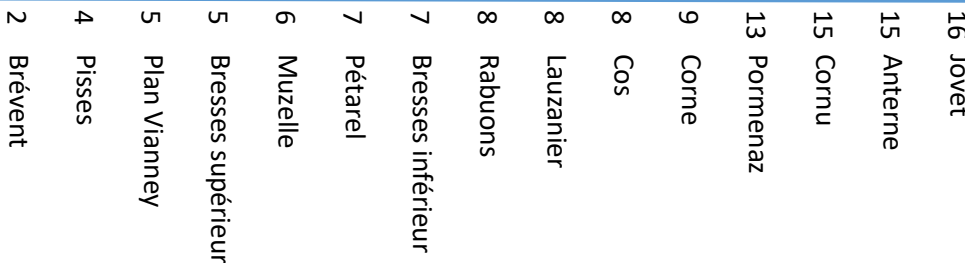
# Comparaison des lacs sur les données 2016



## Phytoplancton

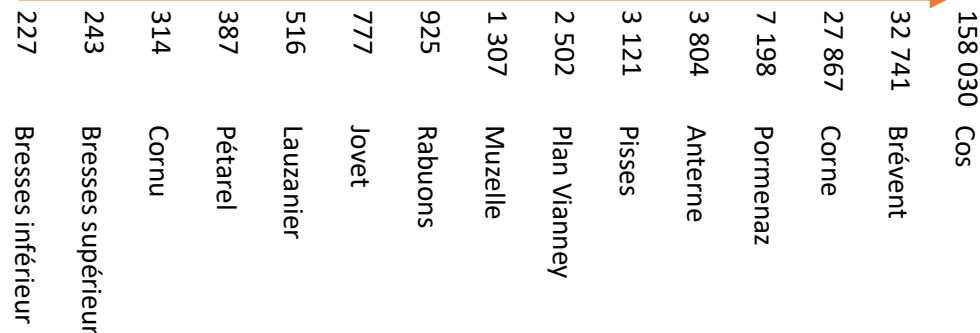
### Richesse (nombre de taxons)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
2	5.5	8	11	16



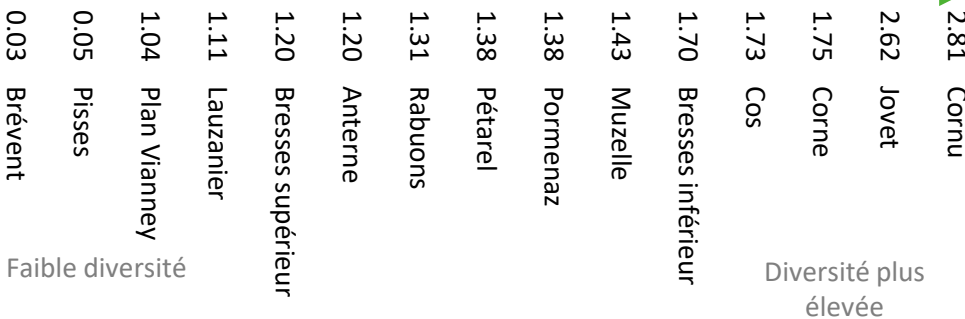
### Abondance (nombre total d'individu par ml)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
227	451	1307	5500	158 030



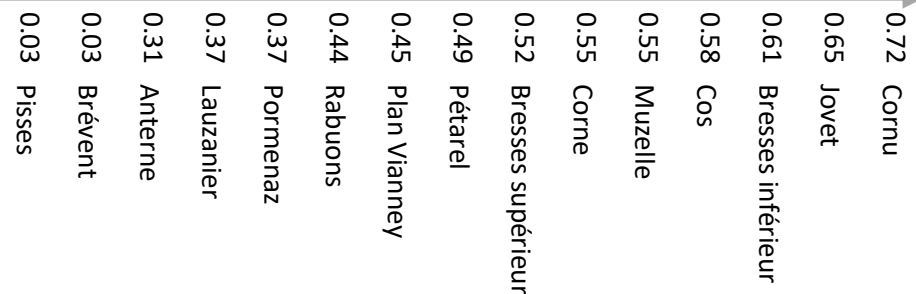
### Diversité de Shannon

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
0.03	1.1	1.4	1.7	2.8



### Equitabilité de Pielou

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
0.03	0.37	0.49	0.57	0.72





# Comparaison des lacs sur les données 2016



## Zooplancton

### Richesse (nombre de taxons)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
2	3	5	7.7	11

2	2	3	3	3	4	5	5	6	7	8	8	8	11
Pisses	Bresses supérieur	Plan Vianney	Pétarel	Bresses inférieur	Lauzanier	Anterne	Corne	Cos	Rabuons	Brévent	Jovet	Cornu	Pormenaz

### Abondance (nombre total d'individu par m<sup>2</sup>)

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
86	1570	8507	18 204	392 904

86	1062	1140	1556	1613	3680	6142.2	10872	11243	14426	19464	25608	49641	392904
Jovet	Plan Vianney	Cornu	Corne	Pisses	Lauzanier	Pétarel	Anterne	Bresses inférieur	Bresses supérieur	Rabuons	Brévent	Cos	Pormenaz

### Diversité de Shannon

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
0.09	0.60	0.92	1.05	2.50

0.09	0.09	0.12	0.44	0.56	0.71	0.77	0.92	0.93	0.99	1.00	1.07	1.94	2.28	2.49
Lauzanier	Pisses	Cos	Plan Vianney	Pormenaz	Corne	Pétarel	Anterne	Bresses inférieur	Bresses supérieur	Rabuons	Cornu	Brévent	Jovet	Jovet

Faible diversité

Diversité plus élevée

### Equitabilité de Piélou

Min	Q1	Médiane	Q3	Max
0.04	0.24	0.39	0.64	0.99

0.04	0.12	0.17	0.21	0.33	0.35	0.38	0.40	0.58	0.63	0.65	0.76	0.83	0.99
Lauzanier	Pisses	Cos	Pormenaz	Corne	Plan Vianney	Rabuons	Anterne	Pétarel	Bresses inférieur	Cornu	Brévent	Jovet	Bresses supérieur



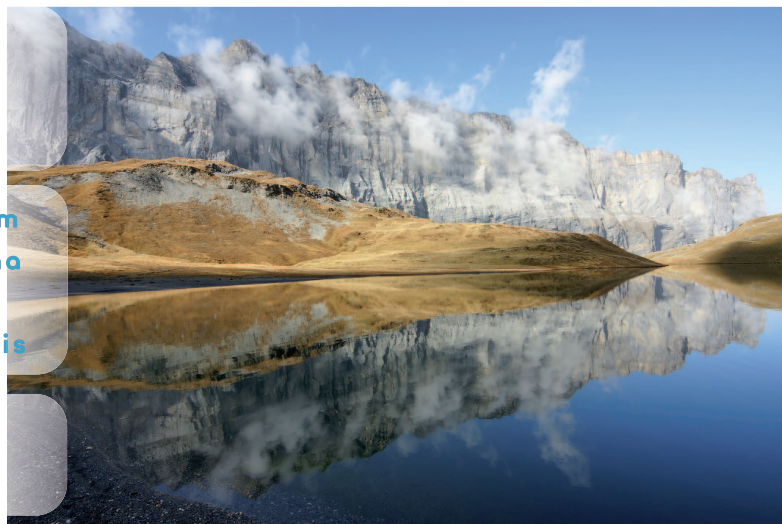
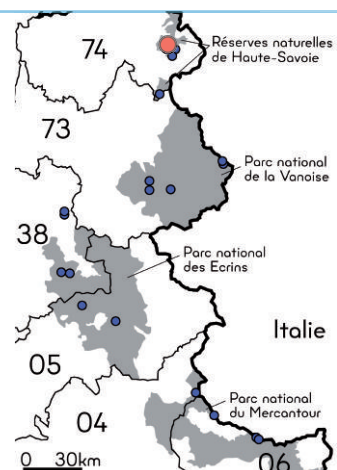
## Résultats 2016 Anterne

altitude: 2063m  
surface: 11.60ha  
prof. max: 12m  
gel hiver: 8 mois

Gestion:  
Asters

Mission:  
13/09/2016

Météo:  
clair et ensoleillé



## Commentaires sur la mission de terrain

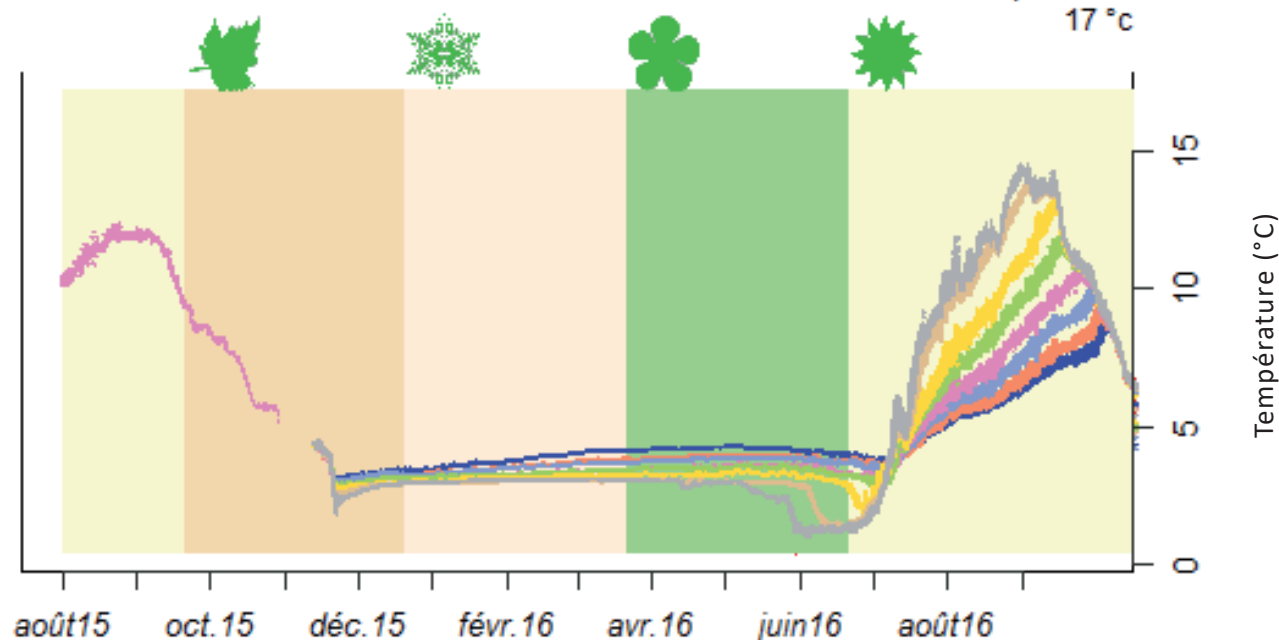
Lors de la mission terrain, des prélèvements pour l'analyse des diatomées ont également été réalisés.

## Températures annuelles

Delta de température:  
17 °C

température à 2 m  
température à 3 m  
température à 4 m  
température à 6 m  
température à 7 m  
température à 8 m  
température à 9 m  
température à 10 m

température au fond

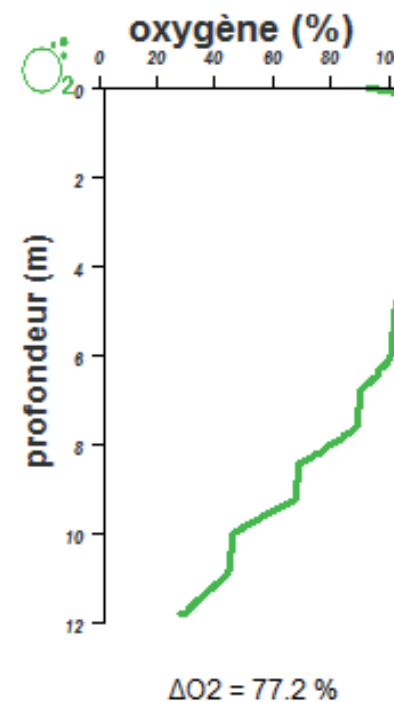
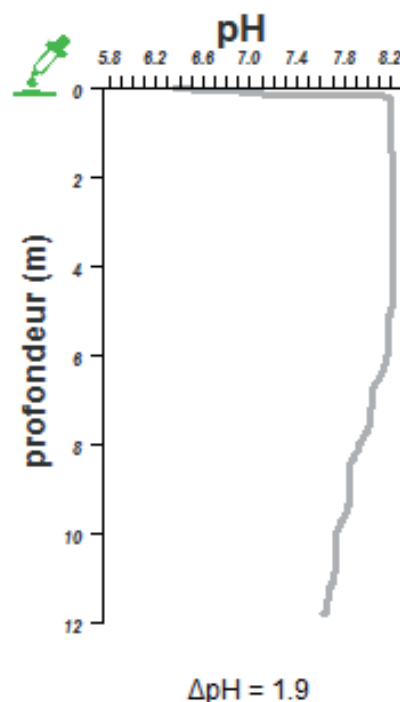
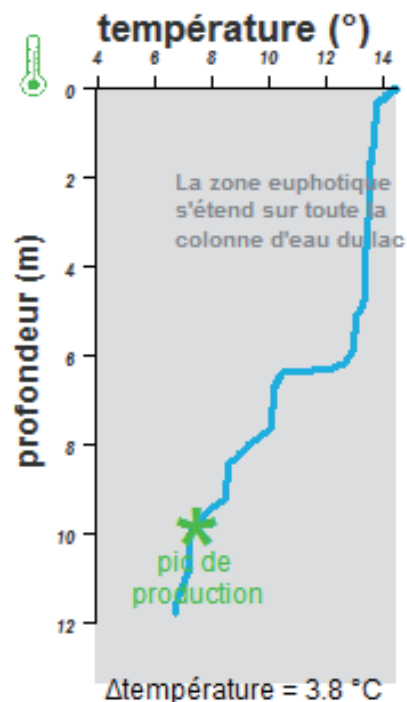


A l'automne, la date de prise en glace est le 21 novembre 2015. Dès cette date, l'eau au fond du lac est plus chaude qu'à la surface. La période de stratification inversée dure 8 mois. Le 07 juillet 2016 la température de surface est à nouveau supérieure à la température au fond du lac, le brassage estival dure quelques jours et la stratification estivale se met en place.

La température en surface est supérieure à 10°C le 22 juillet 2016.



L'échelle des axes en abscisses diffère d'un lac à l'autre. L'amplitude des courbes selon la profondeur est donc à relativiser suivant cette échelle.



Ce commentaire se base sur une mesure ponctuelle de la saturation en oxygène, il est possible que des brassages aient lieu lors de la mesure et qu'une zone hypoxique ou anoxique n'ait pas été détectée.



En septembre, Anterne était un des lacs les plus chauds en surface et en profondeur.

En surface la température du lac était de 14.1 °C (la médiane sur tous les lacs du réseau était de 10.6 °C). Au fond du lac, la température mesurée était de 10.3 °C (la médiane sur tous les lacs : 8.7 °C).

La thermocline est située aux alentours de 6 m de profondeur. La variation de température entre le fond et la surface est de 3.8 °C.



A Anterne le pH est supérieur à 8, ce qui traduit une eau alcaline.

Le pH médian sur toute la colonne d'eau est 8. Entre la profondeur et la surface, le pH varie de 1.9 unité.



Le lac n'atteint pas le stade d'hypoxie et conserve dans sa colonne d'eau une concentration suffisante d'oxygène dissous. La variation d'oxygène dissous entre la surface et le fond du lac est de 77.2 %.



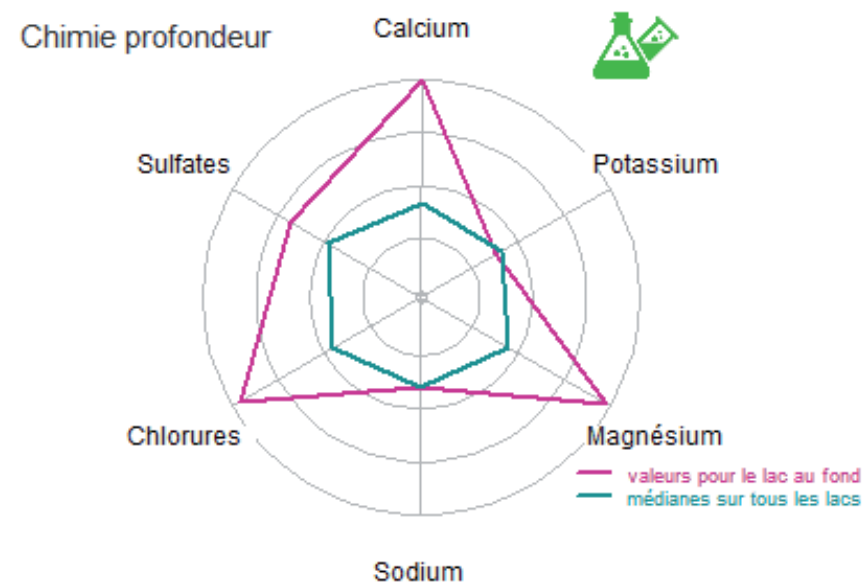
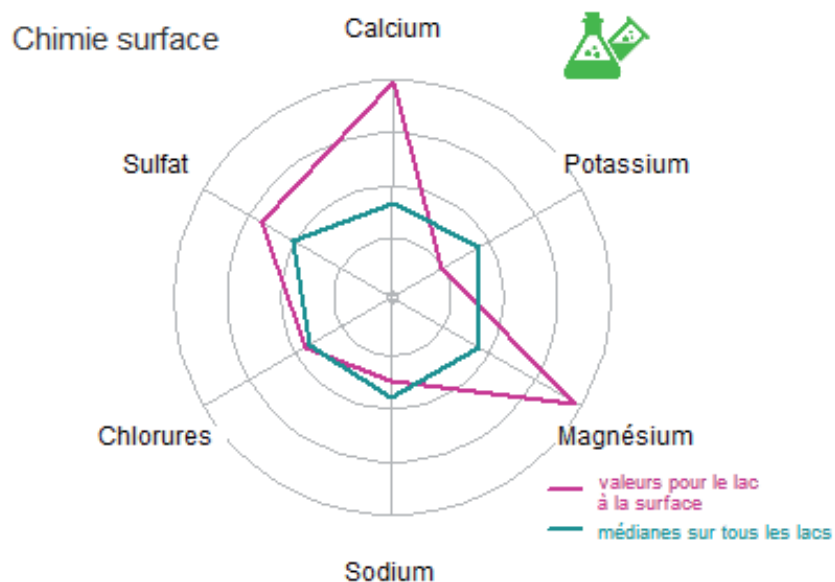
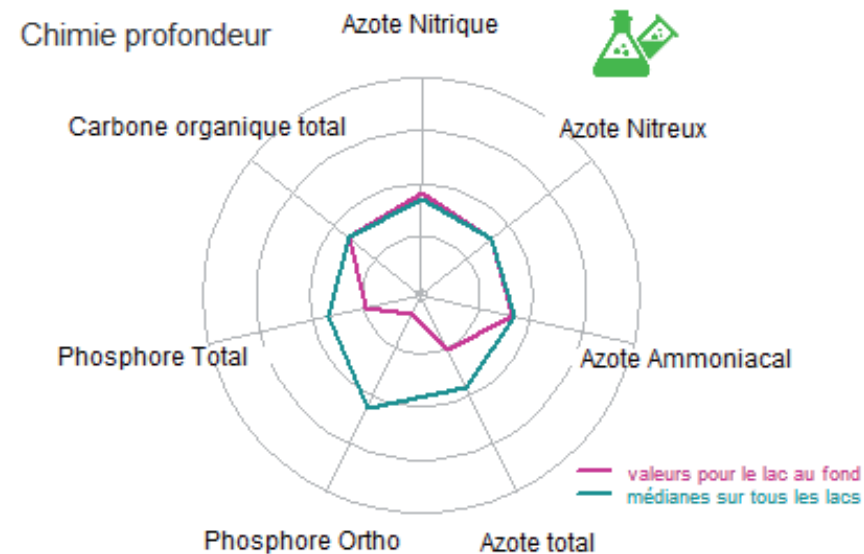
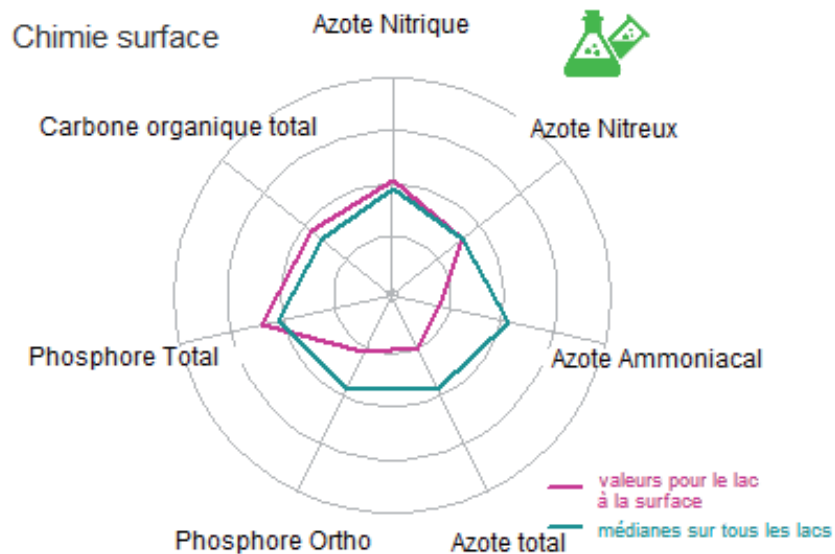
Le lac a une conductivité moyenne de 189.6  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , ce qui est faiblement minéralisé et normal pour un lac à cette altitude. Par contre, si on le compare aux autres lacs du réseau, Anterne est un des lacs les plus minéralisés : c'est le lac avec la plus forte conductivité sur les 19 lacs mesurés (médiane sur les lacs du réseau : 25.34  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ).



Le pic de chlorophylle-a est situé à 9.8 m de profondeur, il est donc plus profond que la thermocline.

## Chimie

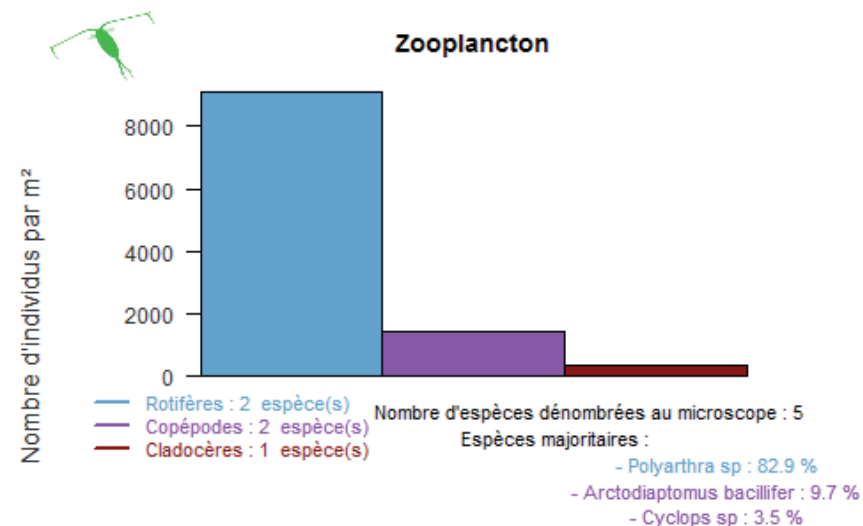
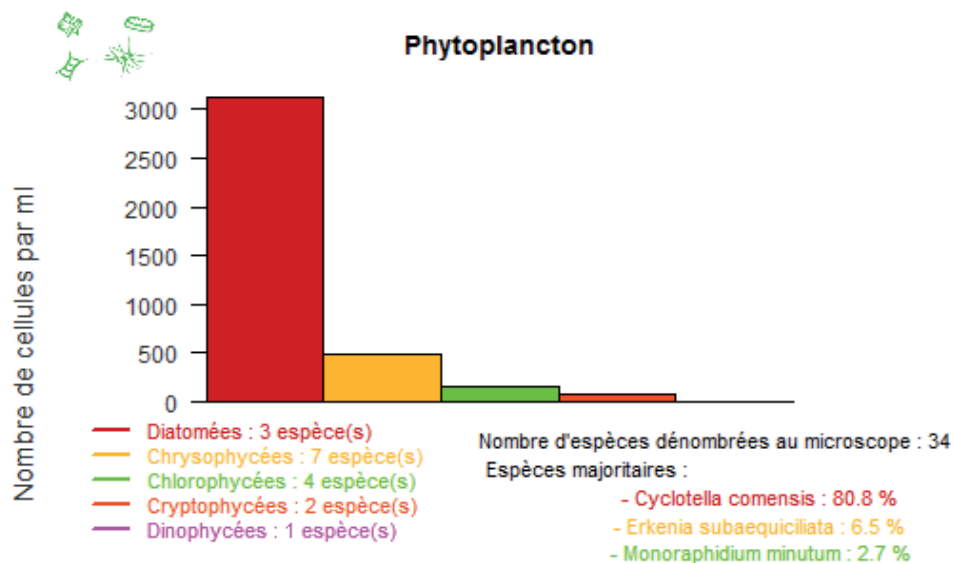
Les valeurs utilisées sur les graphiques ont été normées et centrées, elles indiquent des valeurs relatives par rapport aux autres lacs sur la même année (les valeurs brutes sont indiquées dans les tableaux en page 17)



**P<sub>tot</sub>** Le taux de phosphore total moyen est de 6.5 µg/L, ce qui caractérise un lac oligotrophe (d'après l'OECD, 1982). Parmi les lacs du réseau, le lac de Anterne est le 3<sup>ème</sup> lac le plus pauvre en phosphore (sur les 8 lacs mesurés.)

**COT** Le taux de carbone organique total (c'est à dire la moyenne des 2 mesures surface et profondeur) est de 0.6 mg/l. C'est la valeur médiane, c'est un lac à concentration moyenne en COT parmi les 8 lacs mesurés (médiane sur tous les lacs : 0.6 mg/l).

Planctons



**Phytoplancton :**

5 des 9 classes principales de phytoplancton sont représentées.

Le phytoplancton est dominé par la classe des Diatomées. Les Diatomées sont un des groupes les plus importants du phytoplancton. Elles ont la capacité de stocker la silice. L'espèce majoritaire est *Cyclotella comensis*, c'est une espèce de nanophytoplancton.

L'étude du phytoplancton a permis d'identifier 17 espèces différentes. Deux indices ont été calculés, la diversité de Shannon (H') : 1.29 et l'équitabilité (E): 0.31.

**Zooplancton :**

La classe de zooplancton la plus abondante est les Rotifères. L'espèce majoritaire est *Polyarthra sp*.

L'utilisation du filet à plancton sur toute la colonne d'eau a permis d'identifier 5 espèces différentes. Deux indices ont été calculés, la diversité de Shannon (H') : 0.93 et l'équitabilité (E): 0.4.



Le taux de chlorophylle-a en surface est de 0.6 µg/L, le lac est donc ultra-oligotrophe (d'après les normes de l'OECD), ce qui est normal pour un lac d'altitude. Par rapport aux autres lacs du réseau, Anterne a une faible concentration en chlorophylle à la surface, c'est le 3ème lac le plus pauvre en chlorophylle (valeur médiane sur tous les lacs : 1.26 µg/l).



## Concentrations en éléments chimiques

élément (surface)	valeur pour le lac	valeurs minimales sur tous les lacs	valeurs médianes sur tous les lacs	valeurs maximales sur tous les lacs
Conductivité spécifique ( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ )	189.59	2.92	25.34	189.59
Chlorophylle a (mg/L)	0.64	0.22	1.26	7.59
Azote total (mg/L)	0.06	0.06	0.105	0.21
Azote Nitrique (mg/L)	0.06	0.002	0.055	0.11
Azote Ammoniacal (mg/L)	0.005	0.005	0.014	0.025
Azote Nitreux (mg/L)	0.001	0	0.001	0.16
pH (mg/L)	8.14	6.02	7.26	8.14
Silice Réactive (mg/L)	1.46	0.84	1.22	2.82
Conductivité (mg/L)	173	5	31.5	173
Titre alcalimétrique complet (mg/L)	1.65	0.08	0.24	1.65
Carbone organique total (mg/L)	0.85	0.36	0.685	2.27
Calcium (mg/L)	33.31	0.49	4.8	33.31
Magnésium (mg/L)	1.62	0.03	0.465	1.62
Sodium (mg/L)	0.49	0.27	0.59	1.27
Potassium (mg/L)	0.05	0.05	0.135	0.31
Chlorures (mg/L)	0.35	0.17	0.33	0.66
Sulfates (mg/L)	5.57	0.29	3.625	7.25
Phosphore Total (mg/L)	0.009	0.002	0.008	0.012
Phosphore Ortho (mg/L)	0.002	0.002	0.004	0.009

éléments à 8 m	valeur pour le lac	valeurs minimales sur tous les lacs	valeurs médianes sur tous les lacs	valeurs maximales sur tous les lacs
Azote total (mg/L)	0.05	0.04	0.105	0.21
Azote Nitrique (mg/L)	0.06	0.003	0.055	0.14
Azote Ammoniacal (mg/L)	0.008	0.001	0.0085	0.063
Azote Nitreux (mg/L)	0.001	0	0.001	0.17
pH (mg/L)	8.1	5.92	7.105	8.1
Silice Réactive (mg/L)	1.89	0.34	1.615	3.43
Conductivité (mg/L)	191	5	35	191
Titre alcalimétrique complet (mg/L)	1.84	0.07	0.25	1.84
Carbone organique total (mg/L)	0.45	0.21	0.45	2.21
Calcium (mg/L)	37.05	0.4	5.115	37.05
Magnésium (mg/L)	1.88	0.02	0.485	1.88
Sodium (mg/L)	0.52	0.2	0.53	7.07
Potassium (mg/L)	0.08	0.03	0.09	0.29
Chlorures (mg/L)	0.38	0.17	0.235	0.38
Sulfates (mg/L)	6.07	0.27	3.395	8.16
Phosphore Total (mg/L)	0.004	0.004	0.0065	0.014
Phosphore Ortho (mg/L)	0.002	0.002	0.004	0.005

## Résultats 2016 Brévent

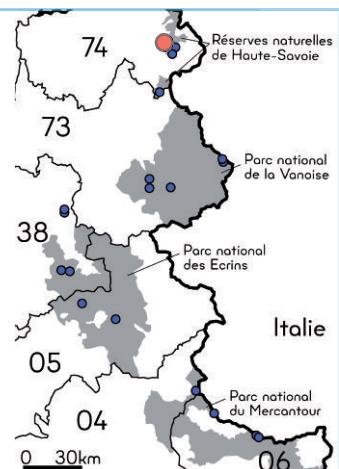
altitude: 2159m  
surface: 2.95ha  
prof. max: 20m  
gel hiver: 8.5mois

Gestion:  
Asters



Mission:  
08/09/2016

Météo:  
clair et ensoleillé



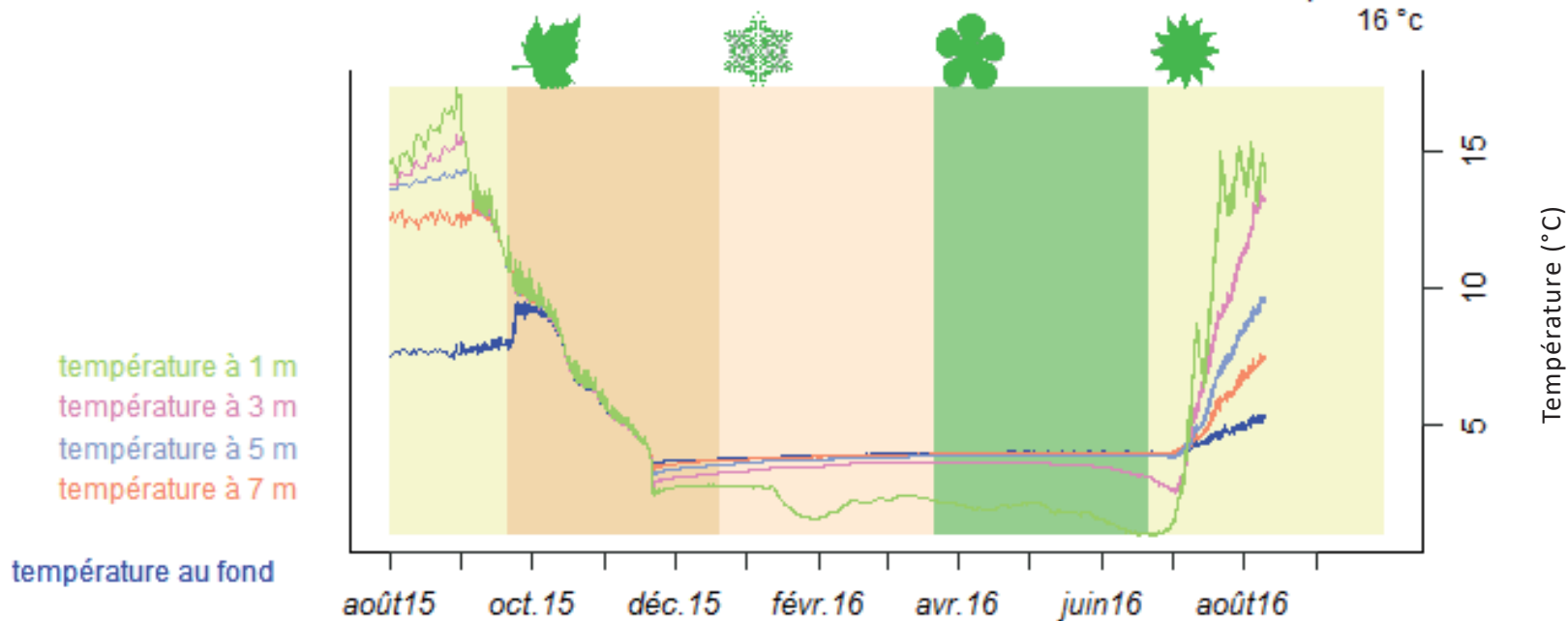
## Commentaires sur la mission de terrain

En 2016, l'installation d'une nouvelle chaîne de thermistor avec renvoi sur la berge a été réalisée afin de rendre possible l'immersion de la bouée et donc moins visible par les promeneurs. Lors de la campagne de prélèvement, une sonde de mesure de l'oxygène a été installée au fond du lac avec le thermistor. Les données seront déchargées lors de la campagne 2017.

Des prélèvements pour l'analyse des diatomées ont également été réalisés.

## Températures annuelles

Delta de température:  
16 °C

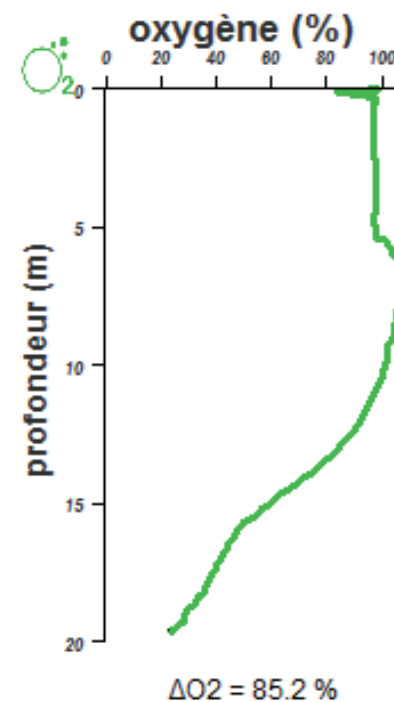
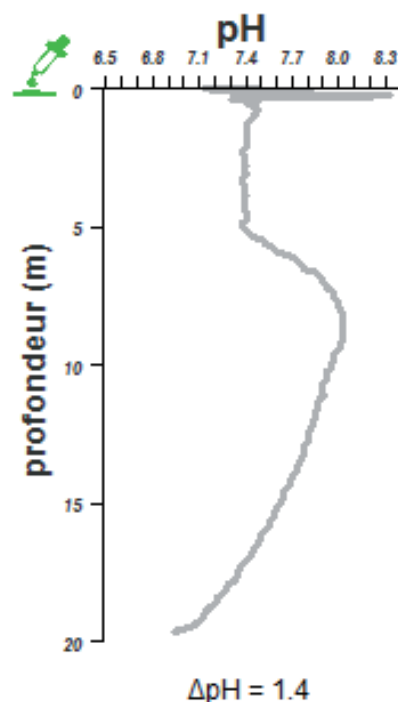
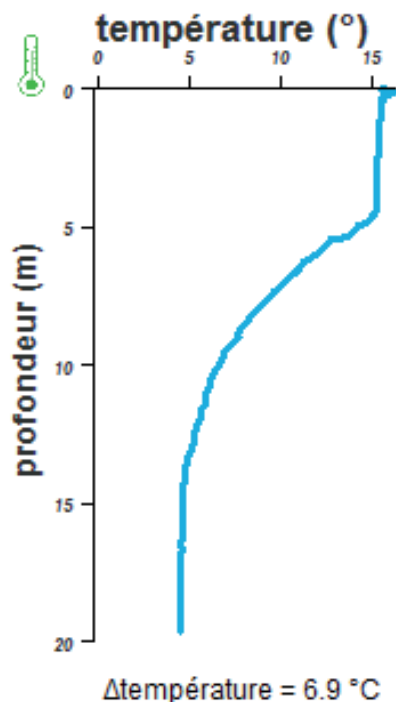


A l'automne, la date de prise en glace est le 21 novembre 2015. Dès cette date, l'eau au fond du lac est plus chaude qu'à la surface. La période de stratification inversée dure 8 mois.

Le 08 juillet 2016 la température de surface est à nouveau supérieure à la température au fond du lac, le brassage estival dure quelques jours et la stratification estivale se met en place.

La température en surface est supérieure à 10°C le 19 juillet 2016.





L'échelle des axes en abscisses diffère d'un lac à l'autre. L'amplitude des courbes selon la profondeur est donc à relativiser suivant cette échelle.

Ce commentaire se base sur une mesure ponctuelle de la saturation en oxygène, il est possible que des brassages aient lieu lors de la mesure et qu'une zone hypoxique ou anoxique n'ait pas été détectée.



En septembre, les températures de surface et de profondeur du lac Brévent étaient proches des médianes calculées sur tous les lacs du réseau.

En surface la température du lac était de 15.6 °C (la médiane sur tous les lacs du réseau était de 10.6 °C). Au fond du lac, la température mesurée était de 8.7 °C (la médiane sur tous les lacs : 8.7 °C).

La thermocline est située aux alentours de 5 m de profondeur. La variation de température entre le fond et la surface est de 6.9 °C.



Au lac Brévent le pH est compris entre 6 et 8, l'eau du lac est neutre.

Le pH médian sur toute la colonne d'eau est de 7.5. Entre la profondeur et la surface, le pH varie de 1.4 unité.

Le lac n'atteint pas le stade d'hypoxie et conserve dans sa colonne d'eau une concentration suffisante d'oxygène dissous. La variation d'oxygène dissous entre la surface et le fond du lac est de 85.2 %.



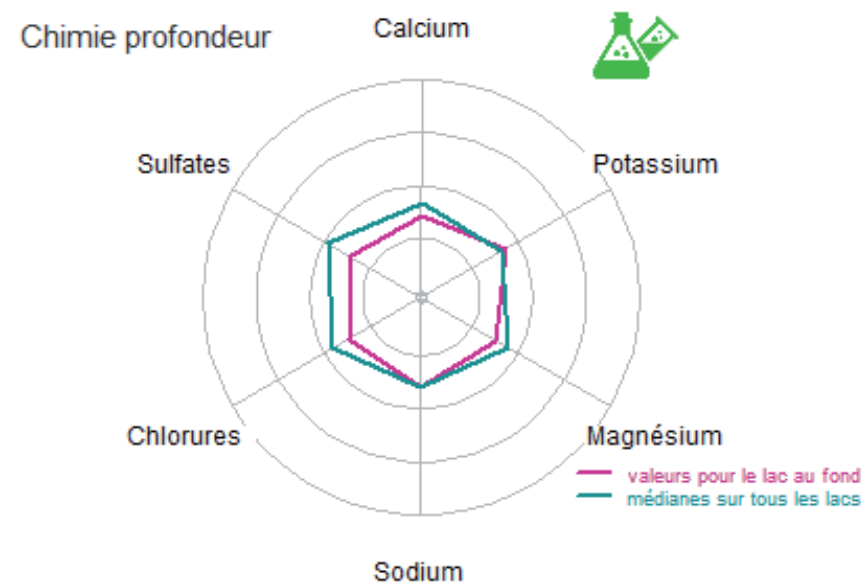
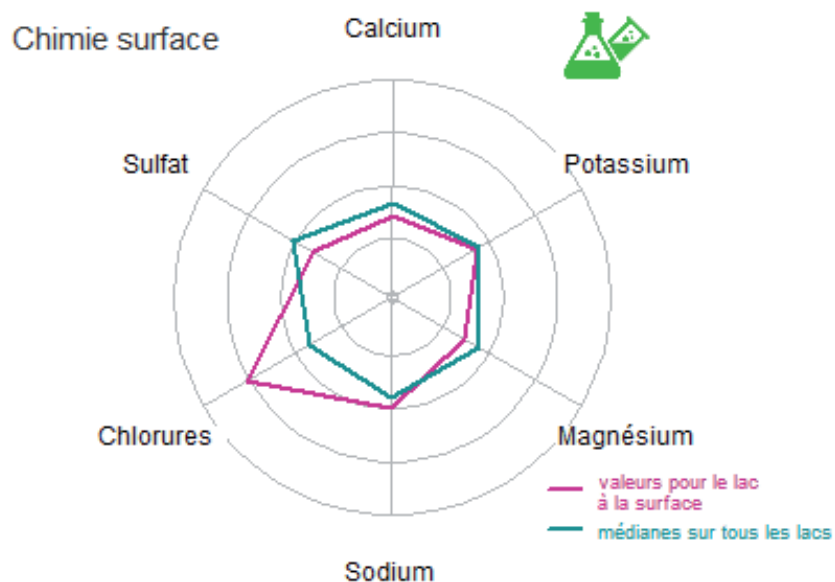
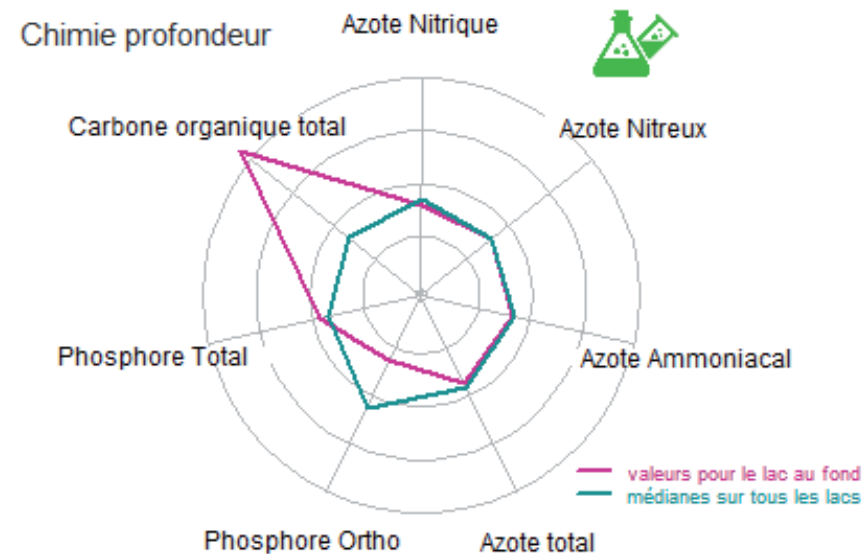
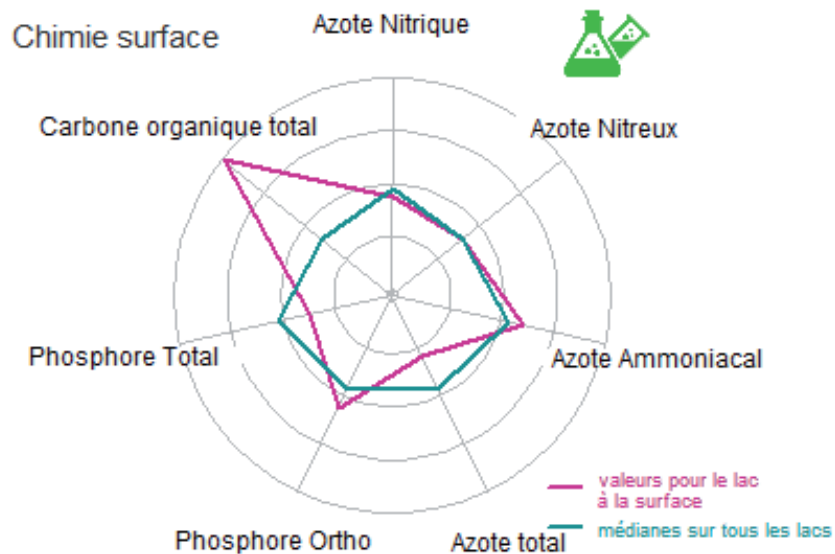
Le lac a une conductivité moyenne de 18.4  $\mu$ S/cm<sup>2</sup>, ce qui est faiblement minéralisé et normal pour un lac à cette altitude. Par rapport aux autres lacs, le lac Brévent est peu minéralisé: c'est le 7ème lac avec la plus faible conductivité sur les 19 lacs mesurés (médiane sur les lacs du réseau : 25.34  $\mu$ S/cm<sup>2</sup>).



Le pic de chlorophylle-a est situé à 14.2 m de profondeur, il est donc plus profond que la thermocline.

## Chimie

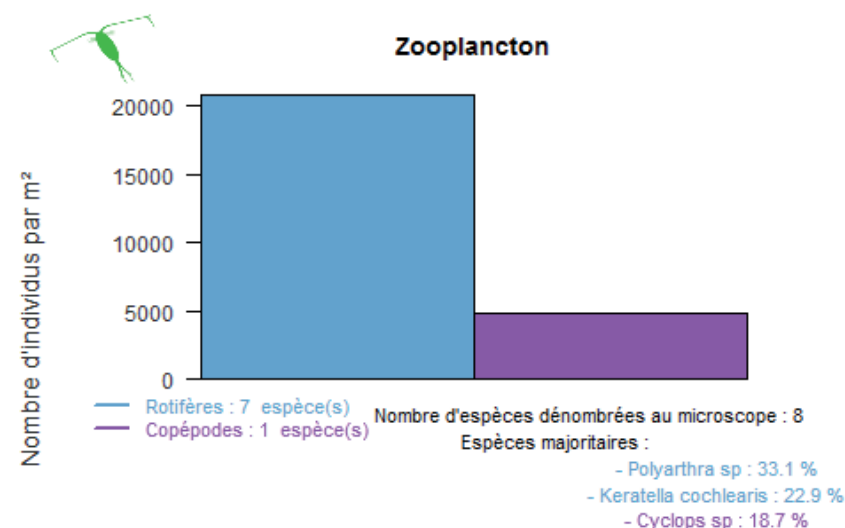
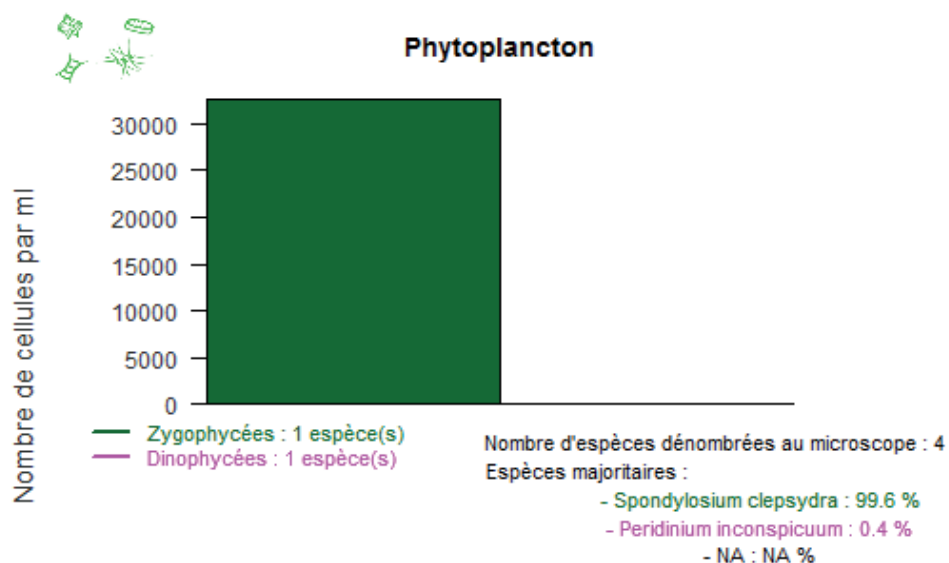
Les valeurs utilisées sur les graphiques ont été normées et centrées, elles indiquent des valeurs relatives par rapport aux autres lacs sur la même année (les valeurs brutes sont indiquées dans les tableaux en page 22)



**P<sub>tot</sub>** Le taux de phosphore total moyen est de 6.5 µg/L, ce qui caractérise un lac oligotrophe (d'après l'OECD, 1982). Cette valeur est proche de la médiane sur tous les lacs du réseau.

**COT** Le taux de carbone organique total (c'est à dire la moyenne des 2 mesures surface et profondeur) est de 2.2 mg/l. C'est plus élevé que la médiane, c'est le lac le plus riche en COT parmi les 8 lacs mesurés (médiane sur tous les lacs : 0.6 mg/l).

Planctons



**Phytoplancton :**

2 des 9 classes principales de phytoplancton sont représentées.

Le phytoplancton est dominé par la présence des Zygophycées. L'espèce majoritaire est Spondylosium clepsydra, c'est une espèce de nanophytoplancton .

L'étude du phytoplancton a permis d'identifier 2 espèces différentes. Deux indices ont été calculés, la diversité de Shannon (H') : 0.03 et l'équitabilité (E): 0.03 .

**Zooplancton :**

La classe de zooplancton la plus abondante est les Rotifères. L'espèce majoritaire est Polyarthra sp.

L'utilisation du filet à plancton sur toute la colonne d'eau a permis d'identifier 8 espèces différentes. Deux indices ont été calculés, la diversité de Shannon (H') : 2.28 et l'équitabilité (E): 0.76 .



Le taux de chlorophylle-a en surface est de 2.1 µg/L, le lac est donc oligotrophe (d'après les normes de l'OECD), ce qui est normal pour un lac d'altitude. Par rapport aux autres lacs du réseau, Brévent a une forte concentration en chlorophylle à la surface, c'est le 3ème lac le plus riche en chlorophylle (valeur médiane sur tous les lacs : 1.26 µg/l)



## Concentrations en éléments chimiques

élément (surface)	valeur pour le lac	valeurs minimales sur tous les lacs	valeurs médianes sur tous les lacs	valeurs maximales sur tous les lacs
Conductivité spécifique (µS/cm <sup>2</sup> )	18.39	2.92	25.34	189.59
Chlorophylle a (mg/L)	2.12	0.22	1.26	7.59
Azote total (mg/L)	0.07	0.06	0.105	0.21
Azote Nitrique (mg/L)	0.05	0.002	0.055	0.11
Azote Ammoniacal (mg/L)	0.016	0.005	0.014	0.025
Azote Nitreux (mg/L)	0	0	0.001	0.16
pH (mg/L)	6.88	6.02	7.26	8.14
Silice Réactive (mg/L)	0.9	0.84	1.22	2.82
Conductivité (mg/L)	14	5	31.5	173
Titre alcalimétrique complet (mg/L)	0.1	0.08	0.24	1.65
Carbone organique total (mg/L)	2.27	0.36	0.685	2.27
Calcium (mg/L)	2.06	0.49	4.8	33.31
Magnésium (mg/L)	0.3	0.03	0.465	1.62
Sodium (mg/L)	0.67	0.27	0.59	1.27
Potassium (mg/L)	0.13	0.05	0.135	0.31
Chlorures (mg/L)	0.59	0.17	0.33	0.66
Sulfates (mg/L)	2.31	0.29	3.625	7.25
Phosphore Total (mg/L)	0.006	0.002	0.008	0.012
Phosphore Ortho (mg/L)	0.005	0.002	0.004	0.009

éléments à 8 m	valeur pour le lac	valeurs minimales sur tous les lacs	valeurs médianes sur tous les lacs	valeurs maximales sur tous les lacs
Azote total (mg/L)	0.1	0.04	0.105	0.21
Azote Nitrique (mg/L)	0.05	0.003	0.055	0.14
Azote Ammoniacal (mg/L)	0.008	0.001	0.0085	0.063
Azote Nitreux (mg/L)	0	0	0.001	0.17
pH (mg/L)	6.83	5.92	7.105	8.1
Silice Réactive (mg/L)	1.34	0.34	1.615	3.43
Conductivité (mg/L)	19	5	35	191
Titre alcalimétrique complet (mg/L)	0.15	0.07	0.25	1.84
Carbone organique total (mg/L)	2.21	0.21	0.45	2.21
Calcium (mg/L)	1.92	0.4	5.115	37.05
Magnésium (mg/L)	0.32	0.02	0.485	1.88
Sodium (mg/L)	0.54	0.2	0.53	7.07
Potassium (mg/L)	0.1	0.03	0.09	0.29
Chlorures (mg/L)	0.21	0.17	0.235	0.38
Sulfates (mg/L)	1.81	0.27	3.395	8.16
Phosphore Total (mg/L)	0.007	0.004	0.0065	0.014
Phosphore Ortho (mg/L)	0.003	0.002	0.004	0.005

## Résultats 2016 Cornu

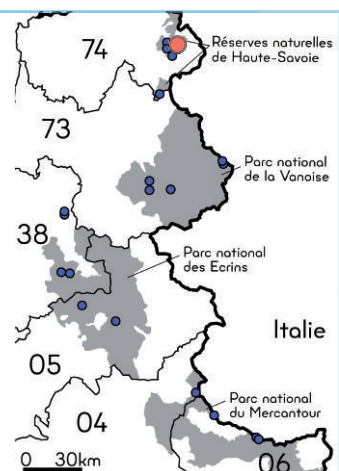
altitude: 2276m  
surface: 5.3ha  
prof. max: 22m  
gel hiver: 8.5mois

Gestion:  
Asters



Mission:  
08/09/2016

Météo:  
clair et ensoleillé

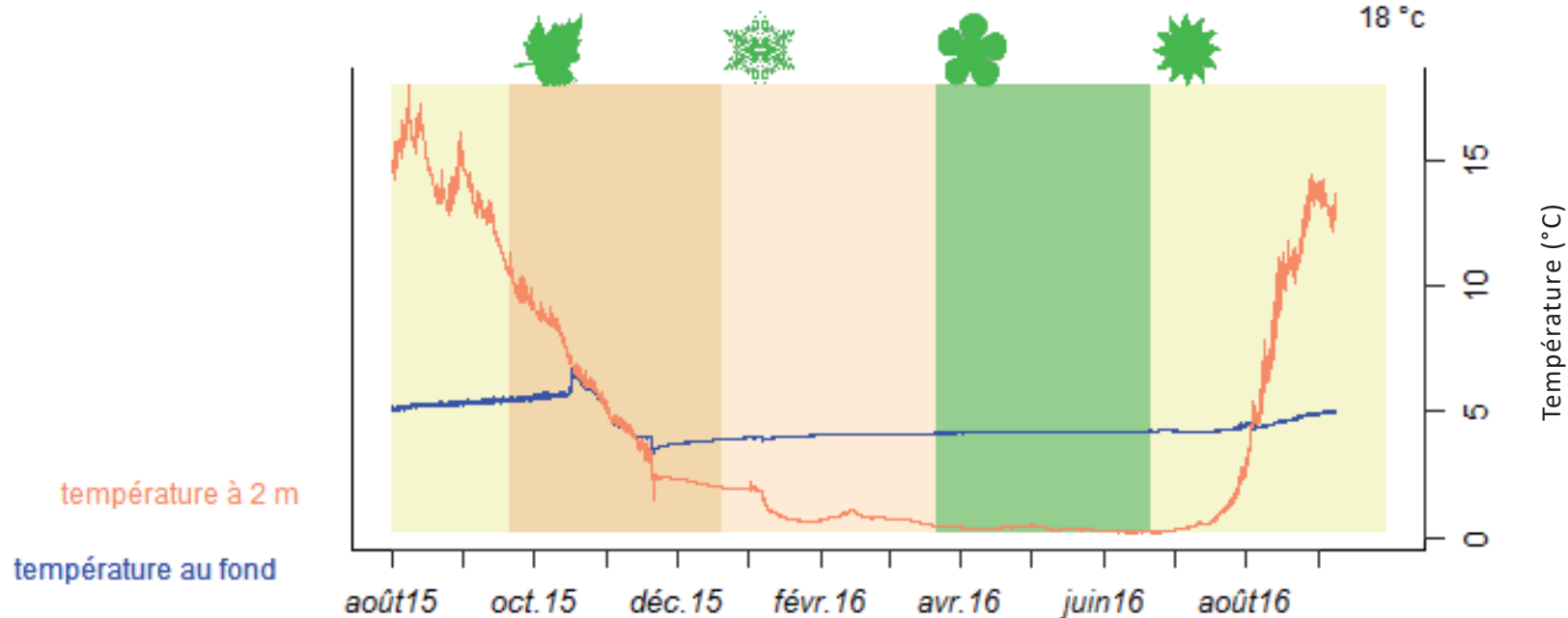


réseau lacs  
sentinelles

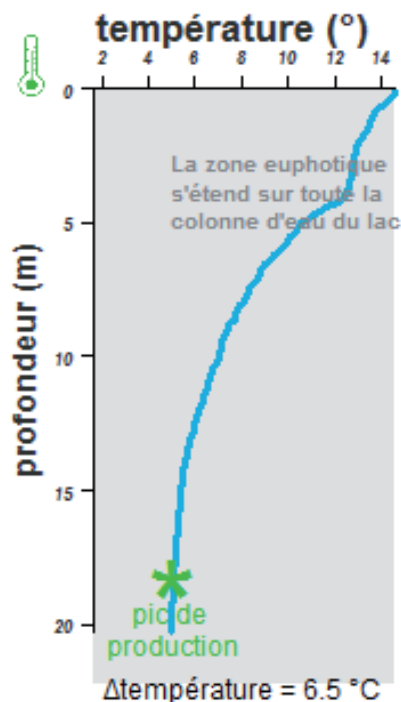
## Commentaires sur la mission de terrain

## Températures annuelles

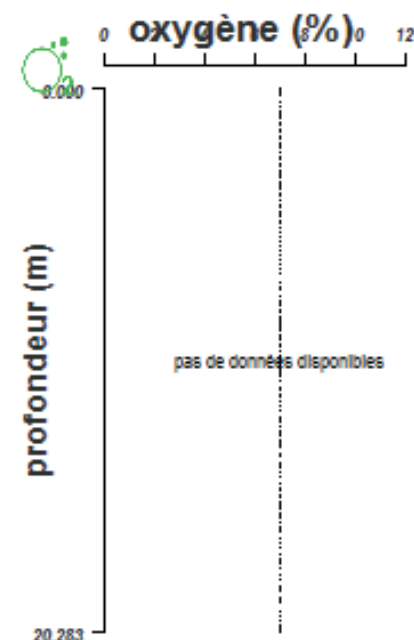
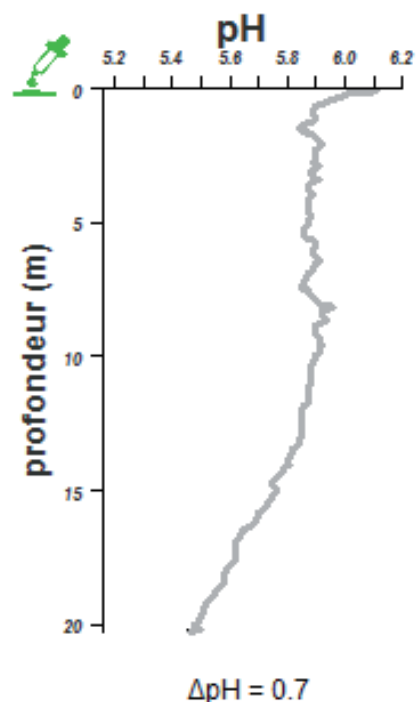
Delta de température:  
18 °C



A l'automne, la date de prise en glace est le 15 novembre 2015. Dès cette date, l'eau au fond du lac est plus chaude qu'à la surface. La période de stratification inversée dure 9 mois. Le 03 août 2016 la température de surface est à nouveau supérieure à la température au fond du lac, le brassage estival dure quelques jours et la stratification estivale se met en place. La température en surface est supérieure à 10°C le 14 août 2016.



L'échelle des axes en abscisses diffère d'un lac à l'autre. L'amplitude des courbes selon la profondeur est donc à relativiser suivant cette échelle.



En septembre, Cornu était un des lacs les plus chauds en surface et des plus froids en profondeur.

En surface la température du lac était de 13.9 °C (la médiane sur tous les lacs du réseau était de 10.6 °C). Au fond du lac, la température mesurée était de 7.4 °C (la médiane sur tous les lacs : 8.7 °C).

La thermocline est située aux alentours de 1m de profondeur. La variation de température entre le fond et la surface est de 6.5 °C.



Au lac Cornu le pH est inférieur à 6, l'eau du lac est plutôt acide.

Le pH médian sur toute la colonne d'eau est de 5.9. Entre la profondeur et la surface, le pH varie de 0.7 unité.



Profil O<sub>2</sub> : Paramètre non mesuré pour ce lac



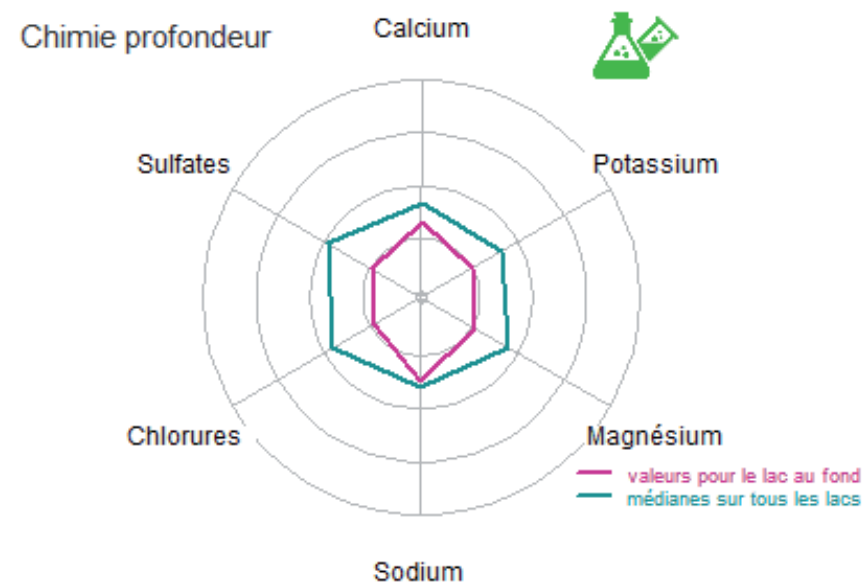
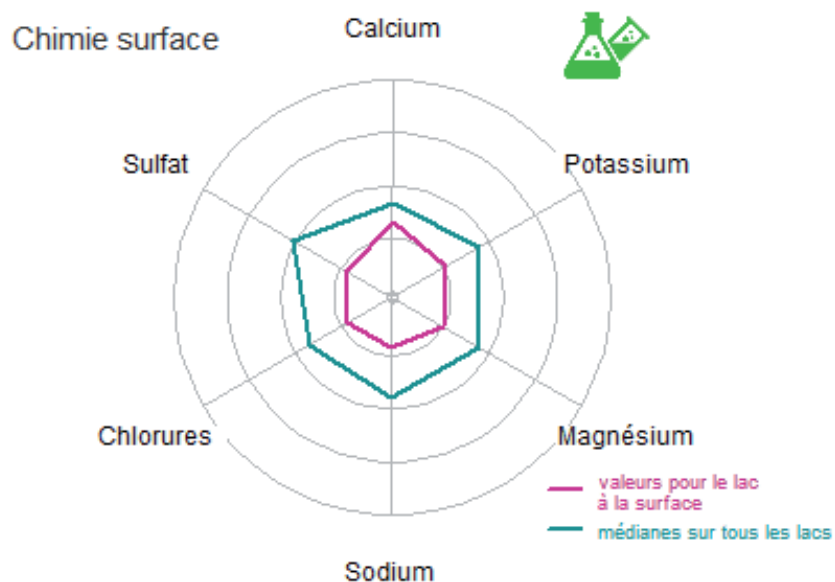
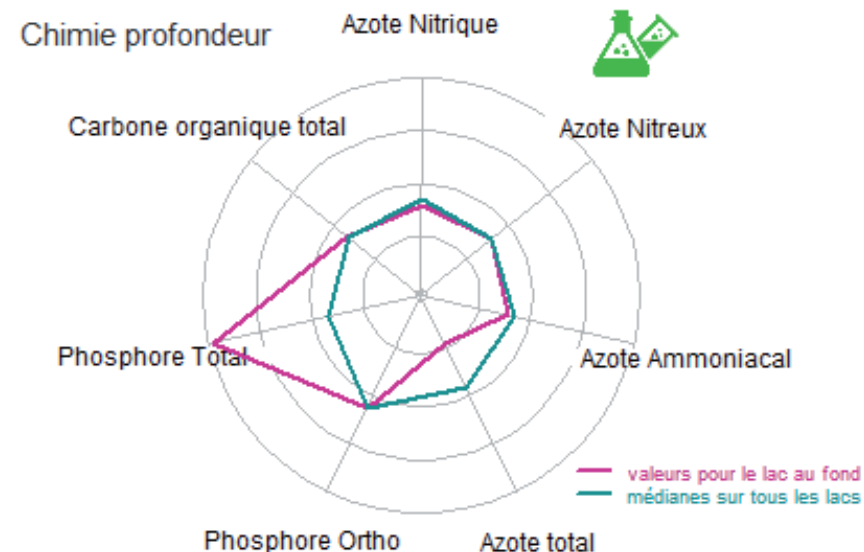
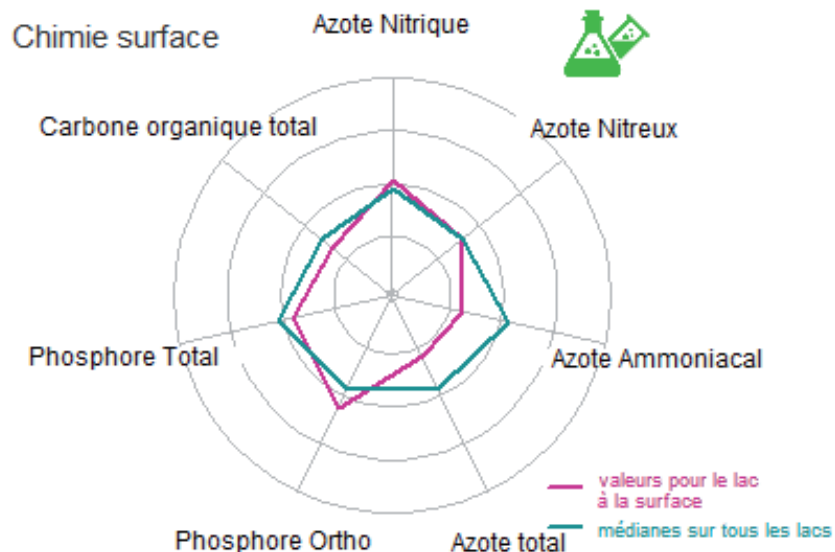
Le pic de chlorophylle-a est situé à 18.2 m de profondeur, il est donc plus profond que la thermocline.



Le lac a une conductivité moyenne de 2.9  $\mu$ S/cm<sup>2</sup>, ce qui est faiblement minéralisé et normal pour un lac à cette altitude. Par rapport aux autres lacs, le lac Cornu est peu minéralisé : c'est le lac avec la plus faible conductivité sur les 19 lacs mesurés (médiane sur les lacs du réseau : 25.34  $\mu$ S/cm<sup>2</sup>).

## Chimie

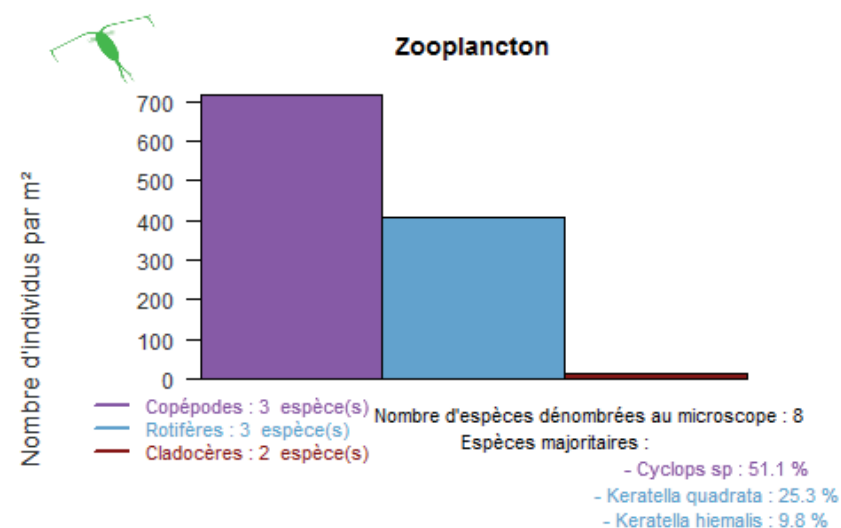
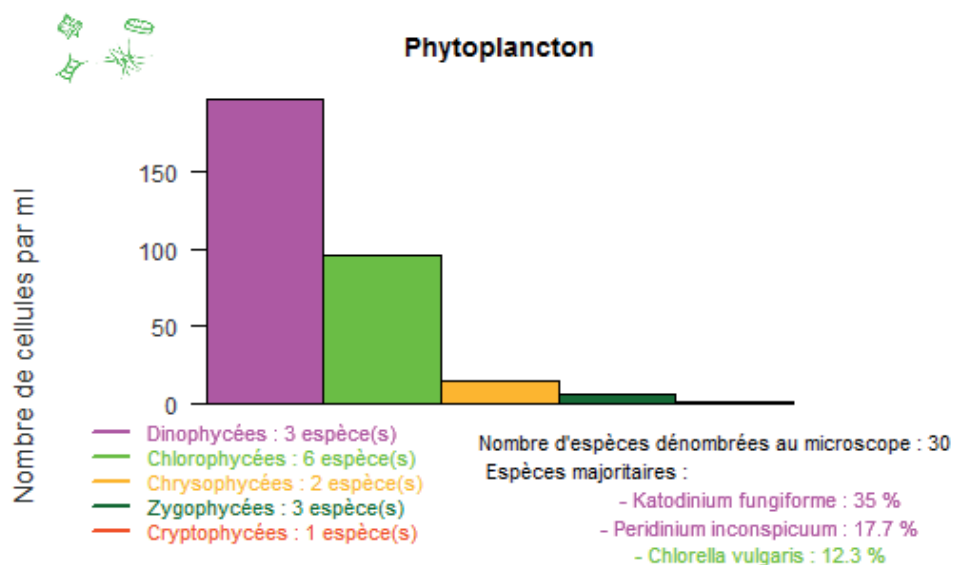
Les valeurs utilisées sur les graphiques ont été normées et centrées, elles indiquent des valeurs relatives par rapport aux autres lacs sur la même année (les valeurs brutes sont indiquées dans les tableaux en page 27)



**P<sub>tot</sub>** Le taux de phosphore total moyen est de 10.5 µg/L, ce qui caractérise un lac mésotrophe (d'après l'OECD, 1982). En comparant aux autres lacs du du réseau, le lac Cornu est un des plus riche en phosphore. C'est le 2ème lac le plus riche, parmi les 8 lacs mesurés.

**COT** Le taux de carbone organique total (c'est à dire la moyenne des 2 mesures surface et profondeur) est de 0.5 mg/l. C'est plus bas que la médiane des lacs du réseau, c'est le 4ème lac le plus pauvre en COT parmi les 8 lacs mesurés (médiane sur tous les lacs : 0.6 mg/l).

Planctons



**Phytoplancton :**

5 des 9 classes principales de phytoplancton sont représentées.

Les dynophycées sont la classe phytoplanctonique majoritaire. Elles renseignent sur la stabilité de la colonne d'eau.

L'espèce majoritaire est Katodinium fungiforme, c'est une espèce de nanophytoplancton.

L'étude du phytoplancton a permis d'identifier 15 espèces différentes. Deux indices ont été calculés, la diversité de Shannon (H') : 2.81 et l'équitabilité (E): 0.72 .

**Zooplancton :**

La classe de zooplancton la plus abondante est les Copépodes. L'espèce majoritaire est Cyclops sp.

L'utilisation du filet à plancton sur toute la colonne d'eau a permis d'identifier 8 espèces différentes. Deux indices ont été calculés, la diversité de Shannon (H') : 1.94 et l'équitabilité (E): 0.65 .



Le taux de chlorophylle-a en surface est de 0.2 µg/L, le lac est donc ultra-oligotrophe (d'après les normes de l'OECD), ce qui est normal pour un lac d'altitude. Par rapport aux autres lacs du réseau, le lac Cornu a une faible concentration en chlorophylle-a à la surface, c'est le lac le plus pauvre en chlorophylle-a (valeur médiane sur tous les lacs : 1.26 µg/l).





## Concentrations en éléments chimiques

élément (surface)	valeur pour le lac	valeurs minimales sur tous les lacs	valeurs médianes sur tous les lacs	valeurs maximales sur tous les lacs
Conductivité spécifique (µS/cm <sup>2</sup> )	2.92	2.92	25.34	189.59
Chlorophylle a (mg/L)	0.22	0.22	1.26	7.59
Azote total (mg/L)	0.07	0.06	0.105	0.21
Azote Nitrique (mg/L)	0.06	0.002	0.055	0.11
Azote Ammoniacal (mg/L)	0.008	0.005	0.014	0.025
Azote Nitreux (mg/L)	0.001	0	0.001	0.16
pH (mg/L)	6.02	6.02	7.26	8.14
Silice Réactive (mg/L)	0.98	0.84	1.22	2.82
Conductivité (mg/L)	5	5	31.5	173
Titre alcalimétrique complet (mg/L)	0.08	0.08	0.24	1.65
Carbone organique total (mg/L)	0.51	0.36	0.685	2.27
Calcium (mg/L)	0.49	0.49	4.8	33.31
Magnésium (mg/L)	0.03	0.03	0.465	1.62
Sodium (mg/L)	0.27	0.27	0.59	1.27
Potassium (mg/L)	0.06	0.05	0.135	0.31
Chlorures (mg/L)	0.17	0.17	0.33	0.66
Sulfates (mg/L)	0.29	0.29	3.625	7.25
Phosphore Total (mg/L)	0.007	0.002	0.008	0.012
Phosphore Ortho (mg/L)	0.005	0.002	0.004	0.009

éléments à 8 m	valeur pour le lac	valeurs minimales sur tous les lacs	valeurs médianes sur tous les lacs	valeurs maximales sur tous les lacs
Azote total (mg/L)	0.04	0.04	0.105	0.21
Azote Nitrique (mg/L)	0.05	0.003	0.055	0.14
Azote Ammoniacal (mg/L)	0.006	0.001	0.0085	0.063
Azote Nitreux (mg/L)	0.001	0	0.001	0.17
pH (mg/L)	5.92	5.92	7.105	8.1
Silice Réactive (mg/L)	0.34	0.34	1.615	3.43
Conductivité (mg/L)	5	5	35	191
Titre alcalimétrique complet (mg/L)	0.07	0.07	0.25	1.84
Carbone organique total (mg/L)	0.46	0.21	0.45	2.21
Calcium (mg/L)	0.4	0.4	5.115	37.05
Magnésium (mg/L)	0.02	0.02	0.485	1.88
Sodium (mg/L)	0.2	0.2	0.53	7.07
Potassium (mg/L)	0.03	0.03	0.09	0.29
Chlorures (mg/L)	0.17	0.17	0.235	0.38
Sulfates (mg/L)	0.27	0.27	3.395	8.16
Phosphore Total (mg/L)	0.014	0.004	0.0065	0.014
Phosphore Ortho (mg/L)	0.004	0.002	0.004	0.005



**Annexe 2 : Rapport :**

Limites du protocole commun de l'Observatoire des lacs  
d'altitude et pistes d'amélioration





réseau lacs  
sentinelles

# Limites du protocole commun de l'Observatoire des lacs d'altitude et pistes d'améliorations

*Version non définitive*



Lac de Pétarel, Août 2017

Rédacteur : Raphaëlle Napoleoni

Période du rapport : été 2017

Date du rapport : 15/09/2017



Les  
partenaires



Animateur du programme



Les  
financeurs





## Table des matières

Contexte.....	2
I. Protocole actuel .....	3
II. Limites du protocole actuel.....	7
A. Différences de protocole selon les questionnaires .....	7
1. Différences de méthode .....	7
2. Différences d'expertise.....	8
B. Les prélèvements réalisés sont des prélèvements discrets .....	8
C. Certaines données issues des sondes et capteurs nécessitent d'être nettoyées avant publication sur le SI 8	
D. Les données ponctuelles renseignent sur l'état du lac le jour de la mesure.....	9
E. Métrologie : Fiabilité des capteurs .....	9
F. Limites du rapport du monitoring .....	10
G. Données intéressantes non regroupées.....	10
III. Réflexion sur l'amélioration du protocole.....	13
A. Protocole terrain et analyses au laboratoire .....	13
1. Prélèvements.....	13
2. Paramètres optionnels .....	15
3. Méthodes d'analyse de la concentration en chlorophylle-a.....	15
4. Comptage du zooplancton.....	15
B. Fiabilité des données.....	15
1. Vérification des capteurs haute fréquence.....	15
2. Comparaison des analyses des laboratoires .....	16
C. Nettoyage des données et mise en forme.....	16
1. Données issues des sondes multi-paramètres.....	16
2. Données issues des capteurs haute fréquence.....	17
D. Amélioration de l'utilisation des données .....	17
1. Etat des lieux des connaissances sur le lac .....	17
2. Analyse des données recueillies .....	17
Conclusion.....	19
IV. Tableau de synthèse des propositions .....	20
Bibliographie .....	22

## Liste des abréviations et glossaire

**SI :** Système d'information. Plateforme de stockage des données

**SOERE :** Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement

**OLA :** Observatoire des Lacs alpins

**PNE :** Parc national des Ecrins

**PNM :** Parc national du Mercantour

**PNV :** Parc national de la Vanoise

**Données haute fréquence :** Mesures réalisées en continue par des capteurs (par exemple : une mesure toutes les heures)

**Thermistor :** Capteur de température haute fréquence

**MiniDOT :** Capteur de saturation en O<sub>2</sub> haute fréquence

**Prélèvement intégré :** Prélèvement réalisé de manière continue sur la colonne d'eau

**Prélèvement discret :** Prélèvement d'eau du lac à une profondeur donnée

## Contexte

L'Observatoire des lacs d'altitude a pour but d'acquérir des données et de centraliser des connaissances sur les lacs de haute montagne des Alpes françaises. L'objectif est de mieux connaître ces milieux pour, d'une part apporter des mesures de gestion aux problématiques locales et, d'autre part, suivre la tendance évolutive des lacs face aux changements globaux.

L'Observatoire des lacs d'altitude a pour vocation de réaliser un suivi à long terme des lacs de haute montagne. Pour cela, un protocole commun est lancé dès septembre 2015 sur 20 lacs des Alpes françaises. Trois niveaux différents de protocole ont d'abord été proposés par différents scientifiques. Des discussions entre chercheurs et gestionnaires ont permis de fixer un protocole commun comportant des paramètres obligatoires et des paramètres optionnels.

Le protocole cherche à être le plus complet possible, tout en étant facile à mettre en œuvre, au vu des conditions d'accès et de la localisation des lacs. Il a aussi fallu prendre en compte le temps limité des agents de terrain, les coûts des missions sur les lacs et les compétences d'analyses des laboratoires partenaires.

Les choix suivants ont été définis :

- Une campagne par an réalisée au mois de septembre

Plusieurs campagnes sur l'année seraient difficiles à réaliser à cause des contraintes d'accessibilité (distance, enneigement, etc.) et du budget. Le mois de septembre a été choisi car il correspond à la fin de la période d'activité biologique maximale dans les lacs de haute montagne.

- Un matériel de prélèvement optimisé

Le matériel utilisé doit permettre de réaliser le protocole commun le plus facilement possible car les conditions de réalisation sur les lacs sont exigeantes. De plus, les lacs étant situés en haute montagne, l'accès se fait majoritairement à pied. La limitation du poids du matériel s'est donc avérée importante. Enfin, le matériel doit être adapté aux contraintes: bateau gonflable léger, peu de temps sur le terrain, environnements humides...

- Un temps de rapatriement des échantillons variable

Deux laboratoires de recherches réalisent les analyses. Le temps de rapatriement des échantillons vers les laboratoires peut être très long (descente du lac puis transport de plusieurs heures en voiture). Pour les analyses chimiques, les prélèvements doivent être emportés au laboratoire le plus rapidement possible. Pour certains lacs trop éloignés des laboratoires, le délai est trop court et les analyses chimiques ne peuvent pas être réalisées.

Enfin, le protocole est également contraint par le budget alloué à l'Observatoire.

Après deux ans de réalisation du protocole, un grand nombre de données ont été recueillies. Elles permettent d'ores et déjà de connaître assez précisément les caractéristiques physico-chimiques et biologiques de chaque lac. Les outils mis en place pour l'Observatoire comme la base de données commune ou la réalisation des rapports annuels du monitoring permettent d'assurer le suivi.

Cependant, certains points d'amélioration pourraient être proposés. En effet, la création de deux rapports sur le monitoring permet de faire un retour sur les données acquises et sur leur interprétation.



## I. Protocole actuel

Aujourd'hui, le protocole commun permet de récolter deux types de données :

- Les **données ponctuelles** : mesures et échantillons collectés lors de la mission terrain en septembre.
- Les **données continues** : données issues des capteurs haute fréquence placés à différentes profondeurs dans le lac. Les capteurs haute fréquence permettent de mesurer un paramètre en continue (1 mesure toutes les heures par exemple).

### DONNEES PONCTUELLES : ANALYSES AU MOIS DE SEPTEMBRE

#### Paramètres obligatoires pour tous les lacs

Toutes ces mesures sont réalisées au-dessus de la zone la plus profonde du lac.

##### Transparence de l'eau



Pour mesurer la transparence de l'eau, le disque de Secchi est utilisé. La méthode consiste à descendre un disque bicolore dans la colonne d'eau et à noter la profondeur où le noir et le blanc ne peuvent plus être dissociés. La mesure est répétée 3 fois et la moyenne des valeurs est retenue. C'est une mesure qui peut varier en fonction des conditions météorologiques et en partie de l'observateur.

##### Profils sonde-multi paramètres



Une seule sonde mesure ces 4 paramètres : concentration en oxygène, pH, conductivité et température. Elle permet de réaliser des profils sur toute la colonne d'eau. Pour certains lacs, elle est associée à un capteur de pigments chlorophylliens permettant de connaître la profondeur du pic de concentration en chlorophylle. Les capteurs doivent être calibrés avant utilisation sur le terrain. Les valeurs de conductivité sont ramenées à 25°C. La sonde est placée à la surface de l'eau puis est descendue lentement jusqu'au fond.

#### Paramètres optionnels

Une bouteille de prélèvement permet de récupérer un échantillon d'eau à la profondeur choisie.

Plusieurs prélèvements sont réalisés au-dessus de la zone la plus profonde du lac.

- En surface : La zone de prélèvement en surface est assez étendue. La méthode utilisée est de réaliser 5 prélèvements à différentes profondeurs proches de la surface (par exemple un prélèvement tous les mètres de 0 à 5m de profondeur) puis d'homogénéiser les 5L prélevés dans un seau. Pour réaliser les analyses (physico-chimiques, chlorophylle-a et phytoplancton), des échantillons sont prélevés dans le seau.
- Au fond du lac : La bouteille de prélèvement est utilisée pour prélever 1L d'eau dans la zone la plus profonde du lac. Cet échantillon sert ensuite à réaliser des analyses physico-chimiques sur l'eau du fond du lac.

Les prélèvements proches de la surface permettent de réaliser des mesures dans la zone euphotique, donc dans la zone de production. L'autre prélèvement renseigne sur la physico-chimie des zones sombres, marquées par les processus de recyclages des éléments.

## Chlorophylle-a



Le prélèvement d'eau de surface est filtré afin de concentrer les particules algales sur une membrane qui sera ensuite placée dans une glacière puis congelée. La filtration a lieu au bord du lac.

Au laboratoire, le filtre est placé dans l'acétone puis dans un appareil provoquant des ultra-sons permettant d'extraire la chlorophylle des cellules. Des mesures spectrophotométriques sont ensuite effectuées sur l'extrait chlorophyllien. Une deuxième mesure sur l'échantillon acidifié est nécessaire. En effet, la première valeur détermine la somme chlorophylle-a et phéophytine. L'ajout d'acide converti la chlorophylle en phéophytine (pigments dégradés). Un calcul entre les 2 mesures permet d'accéder au résultat voulu, c'est-à-dire la chlorophylle-a active.

Coût de l'analyse par lac : 60€

## Chimie



Un échantillon est prélevé dans le mélange des eaux de surface et un autre échantillon est prélevé dans le prélèvement de profondeur.

Les flacons doivent être placés dans une glacière puis emmenés au laboratoire dans les 2 jours pour que toutes les analyses puissent être réalisées dans des conditions optimales.

Paramètres mesurés au laboratoire :

- TAC (Titre alcalimétrique complet)
- COT (Carbone organique total)
- Nutriments :  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_{\text{tot}}$ ,  $\text{P}_{\text{ortho}}$  et  $\text{P}_{\text{tot}}$
- Ions :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+/3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$

Coût par lac : 250€ par échantillon

## Plancton



Phytoplancton :

Un flacon est rempli avec l'eau de surface et quelques gouttes de lugol sont ajoutées pour fixer la forme du phytoplancton et arrêter les processus biologiques. Un spécialiste dans le dénombrement phytoplanctonique réalise ensuite les comptages selon la méthode Utermöhl (NF EN 15204, AFNOR, 2006)

Zooplancton :

Un filet à plancton de maille 50µm est utilisé pour réaliser un trait de filet sur toute la colonne d'eau. Les échantillons sont fixés au lugol puis analysés par un spécialiste.

Coût par lac :

Phyto : 250€ - Zoo : 300€

## DONNEES CONTINUES

Une chaîne de capteurs permanents mesurant la température est installée dans tous les lacs au niveau du point le plus profond. Chaque lac est équipé, au minimum, d'un capteur à 2m de profondeur et d'un capteur au fond (cf. Figure 1). Dans certains lacs, d'autres capteurs sont installés à différentes profondeurs intermédiaires (par exemple à 4m de profondeur).

Lors de la mission terrain en septembre, les capteurs sont sortis de l'eau afin de récupérer les données récoltées durant toute l'année.

Les capteurs de température prennent une mesure toutes les heures.

L'observatoire a comme objectif d'ajouter des capteurs haute fréquence pour la mesure de l'oxygène au fond du lac.

### Surface du lac

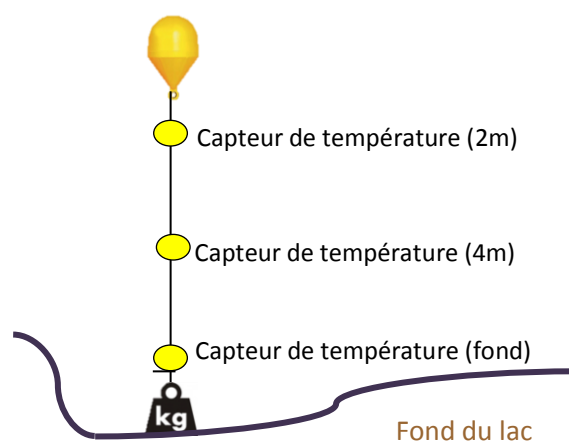


Figure 1: Disposition des capteurs de température permanents dans les lacs

Suite au protocole réalisé, les échantillons sont envoyés vers différents laboratoires de mesure (cf. Figure 2) pour être analysés.

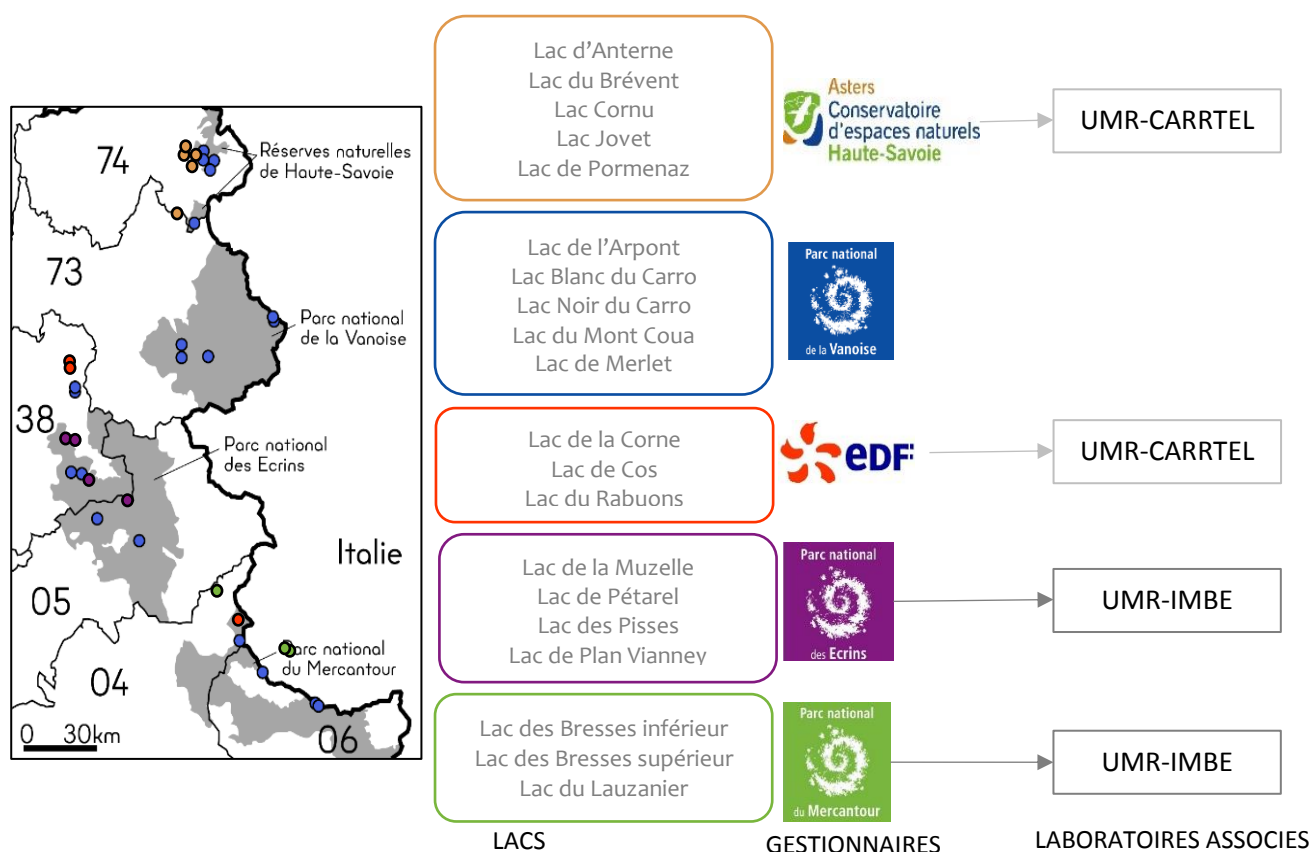


Figure 2: Localisation des lacs, gestionnaires et laboratoires associés

Les gestionnaires saisissent ensuite les données acquises dans la base de données commune : le système d'information du SOERE-OLA (Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement de l'Observatoire des lacs alpins, mis en place par l'UMR-CARTEL : <http://si-ola.inra.fr>). Des fichiers types sont utilisés pour entrer les données de manières uniformes, seules les données haute fréquence des capteurs de températures ne sont pas encore disponibles sur le SI.

D'ici quelques années, le SOERE-OLA devrait mettre en place une plateforme spécifique pour le stockage des données haute fréquence.

Les données relatives aux lacs sentinelles sont en libre accès et peuvent donc être téléchargées par tous.



Observatory on alpine Lakes

**L'Observatoire des Lacs alpins (OLA)**, administré par l'UMR-CARTEL (INRA Thonon) regroupe initialement les données scientifiques collectées sur le suivi écologique des trois grands lacs périalpins : lac d'Annecy, lac du Bourget et lac Léman. Une extension a été faite pour les lacs d'altitude. L'objectif des recherches menées est de comprendre et modéliser l'état et le fonctionnement écologique des systèmes lacustres.

(Source : <http://www6.inra.fr/soere-ola/>)

L'animation du réseau étant portée par Asters, cette structure se charge ensuite de réaliser un rapport du monitoring chaque année. Il donne un aperçu de l'« état de santé » de chaque lac, une fiche de synthèse par lac étant réalisée afin d'analyser les évolutions des lacs à long terme, il a été choisi de créer des outils permettant d'automatiser les analyses : script RStudio, modèle de fiche Indesign (cf. Figure 3).

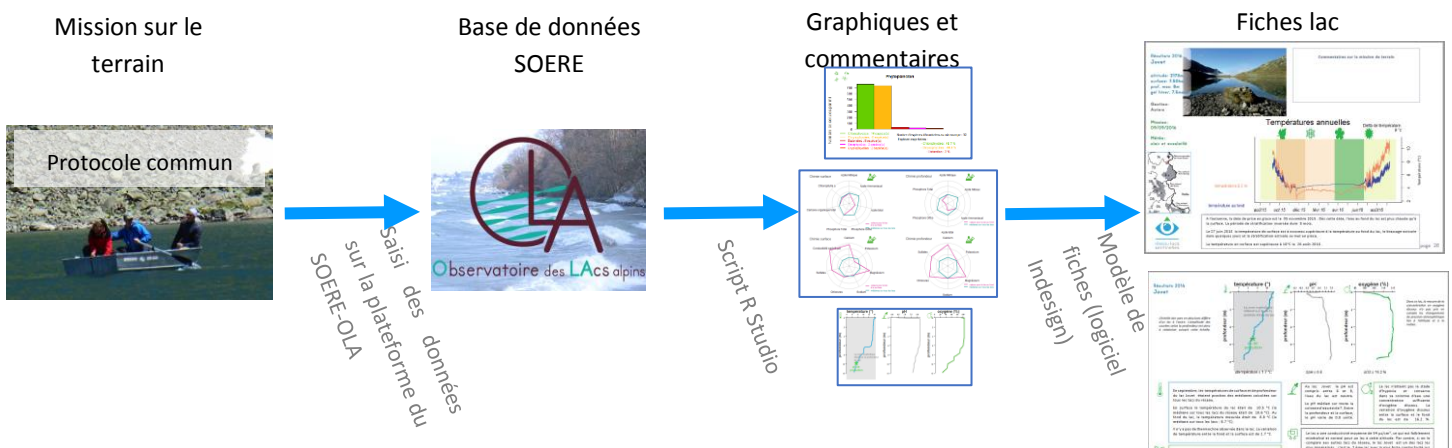


Figure 3: Méthodologie pour la création des fiches lacs

Les données extraites du SI sont utilisées par un script R Studio qui crée des graphiques et commentaires d'analyses de manière automatique. Ceux-ci sont ensuite associés et mis en forme dans les fiches lac. Le rapport du monitoring correspond au catalogue des fiches lac.

## II. Limites du protocole actuel

L'étude des données recueillies durant ces deux années a mis en avant des limites d'interprétation de certains résultats. Le protocole commun dans son ensemble donne une analyse très complète de chaque lac. Néanmoins, certains paramètres sont finalement difficilement comparables entre les lacs.

### A. Différences de protocole selon les gestionnaires

Les efforts de collaboration entre scientifiques et gestionnaires ont permis de mettre au point un protocole commun adapté au lac d'altitude.

Durant ces deux premières années de mise en place, les gestionnaires ont finalement réalisés certains points du protocole différemment.

#### 1. Différences de méthode

*Prélèvements :*

Les gestionnaires du Parc national du Mercantour, des réserves naturelles de Haute-Savoie et des lacs d'EDF utilisent une bouteille de prélèvement. Par contre, au Parc national des Ecrins, les gardes utilisent une méthode plus rudimentaire. C'est une bouteille accrochée sur un manche, elle permet de faire des prélèvements uniquement en subsurface. Il n'y a pas de prélèvement réalisé au Parc national de la Vanoise.

 *Chlorophylle-a :*

Les prélèvements pour les analyses de chlorophylle-a sont réalisés à des profondeurs différentes selon les gestionnaires.

- > Asters : 5 prélèvements entre 0 et 5m de profondeur
- > EDF : 5 prélèvements dans la zone euphotique théorique soit 2,5 fois la profondeur de disparition du disque de Secchi.
- > PN Mercantour : prélèvements sur toute la colonne d'eau

Les méthodes utilisées sont historiques et issues des différentes collaborations avec les équipes de recherche partenaires.

La méthode d'analyse réalisée au laboratoire est différente entre les deux laboratoires UMR-CARTEL et UMR-IMBE. UMR-IMBE : méthode Scor-Unesco

UMR-CARTEL : méthode Strickland Parsons

En soit, ces deux méthodes sont très proches car seules les longueurs d'ondes d'analyses finales sont différentes. Les résultats sont donc comparables. Mais une homogénéisation de la méthode d'analyse pourrait permettre d'enlever toute incertitude.

 *Phytoplancton :*

Comme pour la chlorophylle-a, la zone de prélèvement pour le phytoplancton n'est pas la même entre les lacs.

- Asters : 5 prélèvements entre 0 et 5m de profondeur
- EDF : 5 prélèvements dans la zone euphotique
- PNM : 1 prélèvement en subsurface (soit à 1 m de prof)
- PNE : 1 prélèvement en subsurface (soit à 1 m de prof)

Ces différences de prélèvements sont assez problématiques pour comparer les données entre lacs. Pour certains lacs, notamment ceux du PNE, PNM et d'Asters, les prélèvements réalisés sont susceptibles de manquer la zone principale de production primaire. Les résultats d'analyse de la chlorophylle-a et du plancton sont donc limités.

## 2. Différences d'expertise

Deux laboratoires sont engagés pour réaliser les analyses de phytoplanctons et de zooplanctons. Pour le phytoplancton, l'analyse repose sur une méthode normée (NF EN 15204, Anfor 2006) utilisée par les deux laboratoires. Par contre, pour le zooplancton, les deux laboratoires ne réalisaient pas les mêmes analyses.

 Zooplancton :

Trois groupes majoritaires de zooplancton sont dénombrés à l'UMR-CARTEL alors que seules 2 sont comptées à l'UMR-IMBE. Les rotifères ne sont pas pris en compte pour les lacs des Ecrins et du Mercantour. Les rotifères sont des individus de petites tailles, certaines espèces de rotifères ne sont donc pas prélevées par le filet (maille de 50µm). Il est certain que tous les rotifères présents dans le milieu n'ont pas été prélevés (*Chick et al, 2010*). Cependant, le comptage des rotifères permet d'enrichir l'analyse d'autant que lorsqu'ils sont dénombrés, leur abondance est non négligeable en comparaison des 2 autres groupes (Cladocères et Copépodes).

**Malgré tous les efforts des membres du réseau, certains points de réalisation du protocole sont donc hétérogènes entre les lacs.**

**Si une comparaison des lacs du réseau est souhaitée, les données de chlorophylle-a et de planctons sont difficilement comparables d'un massif à l'autre.**

### B. Les prélèvements réalisés sont des prélèvements discrets

Les prélèvements d'eau réalisés servent à effectuer des analyses chimiques et des dénombrements du phytoplancton. Deux prélèvements sont réalisés, un en surface et un en profondeur.

Pour réaliser le prélèvement en surface, plusieurs profondeurs sont échantillonnées puis les prélèvements sont rassemblés dans un seau. Les échantillons pour le laboratoire sont prélevés dans le seau.

Ainsi, la zone de surface est prélevée de façon discrète par plusieurs prélèvements.

La partie la plus intéressante pour les prélèvements correspond à la zone comprenant le pic de production primaire.

Les prélèvements aux différentes profondeurs peuvent potentiellement éviter la zone la plus productive (concentration en chlorophylle-a élevée et présence importante du phytoplancton). Ainsi, les résultats pourraient être différents entre un prélèvement dans la zone de forte productivité primaire et un prélèvement hors de cette zone.

### C. Certaines données issues des sondes et capteurs nécessitent d'être nettoyées avant publication sur le SI

Une fois les données récupérées depuis les appareils ou après analyses du laboratoire, les données sont publiées sur la plateforme du SOERE-OLA.

Certaines données nécessitent d'être nettoyées afin de supprimer les données aberrantes signe de problème technique lors des mesures. Les données issues des sondes et des capteurs sont particulièrement concernées.

Pour le profil de sonde, un des problèmes récurrents sur les données 2016 était la présence de valeurs étonnantes au fond du lac. Lorsque la sonde atteint la couche de vase au fond du lac, les sédiments se mélangent à l'eau et les mesures n'ont plus de sens. Tous les paramètres (pH, saturation en O<sub>2</sub>..) changent brutalement.

Les données issues des capteurs haute fréquence sont aussi susceptibles d'être fortement faussées, par exemple si le capteur est sorti de l'eau durant l'année.

Pour les années 2015 et 2016, les données n'ont pas toutes été nettoyées avant d'être insérées sur le SI. Il a été nécessaire de les extraire pour les corriger, puis de les publier à nouveau.

Enfin un dernier point concerne la mise en forme des données. Grâce au SOERE la plupart des données sont téléchargées sous le même format pour les 20 lacs. C'est un gain de temps considérable pour une comparaison efficace des lacs. Seules les données issues des capteurs haute fréquence ne sont pas (encore) publiables sur le SI. Ainsi les données sont sous des formats différents selon les gestionnaires et la récupération des données est plus complexe.

**Des données non filtrées sont publiées sur le SI. S'il n'y a pas de vérification, elles peuvent être potentiellement utilisées dans le rapport du monitoring.**

## D. Les données ponctuelles renseignent sur l'état du lac le jour de la mesure

Les campagnes de terrain en septembre permettent de réaliser des profils de sonde et de prélever des échantillons. Ces informations sont intéressantes car elles permettent de caractériser uniquement l'état du lac, cependant elles peuvent être très différentes d'un jour à l'autre. Un orage peut arriver le soir et les mesures réalisées le lendemain seront totalement différentes.

Ces données sont donc intéressantes mais doivent être considérées avec précaution et relativiser s'il s'agit de faire un bilan de l'état général du lac car elles peuvent varier en lien avec de nombreux paramètres : météo du jour, orages récents, horaire de mesure, luminosité lors de la mesure....

**Les données des sondes sont essentielles à la description et caractérisation du milieu. Cependant, s'il on souhaite comparer les profils entre lacs ou entre années, il serait nécessaire de prendre en compte les éventuelles différences de contexte d'échantillonnage.** Pour plus de précision, il serait intéressant de disposer d'information plus précises relatives aux métadonnées et à la météo des derniers jours.

## E. Métrologie : Fiabilité des capteurs

Le matériel utilisé pour réaliser les suivis est différent selon les lacs, chaque gestionnaire utilise son matériel mais toutes les sondes sont du même modèle et de la même marque. D'importants efforts d'uniformité concernant le matériel ont été réalisés lors des achats.

Les capteurs installés dans les lacs pour l'année (thermistors et miniDOT) sont tous de modèles identiques dès septembre 2016. Les capteurs haute fréquence de température sont généralement très fiables et le modèle a justement été choisi pour cette sécurité. Les capteurs d'oxygène sembleraient moins robustes que les capteurs de température. Certains problèmes sur les capteurs peuvent néanmoins survenir :

- Piles usagées
- Mauvaise programmation
- Capteurs hors d'état (problème technique)
- Dérive de la mesure

Les trois premiers points sont rapidement identifiés lorsque les données sont relevées. Le capteur doit alors être changé. Par contre, si le capteur donne une mesure biaisée à cause d'une dérive de la mesure, il est difficile de le remarquer et de connaître l'amplitude de l'erreur.

Les premiers capteurs haute fréquence de température ont été installés en 2014, il n'y a pas de moyen de connaître les biais potentiels de chaque capteur.

Cependant, c'est un problème récurrent lors de l'utilisation de capteurs, ils sont utilisés dans la plupart des études scientifiques. Il est possible d'estimer que les données sont suffisamment fiables pour étudier la dynamique temporelle des lacs. Il y a sûrement plus de variabilité entre les lacs et les années que l'amplitude d'incertitude des capteurs.

## F. Limites du rapport du monitoring

Actuellement, les données de l'Observatoire sont utilisées pour la création du rapport du monitoring.

Il est important de garder en tête que les commentaires et graphiques réalisés dans ce rapport sont issus d'un script qui analyse les données « automatiquement ». Pour certains paramètres, le script simplifie les données. Par exemple, les commentaires sur la conductivité ou la concentration en phosphore totale utilisent des valeurs moyennes des mesures réalisées.

Ce rapport est un bon moyen d'avoir une analyse rapide des données recueillies dans l'année mais ce n'est pas une analyse détaillée de chaque lac. En effet, le codage du script n'a pas pu prévoir toutes les situations possibles et des analyses trop simplistes peuvent être rédigées. Le script permet de créer une interprétation automatique des données. Nous espérons qu'une relecture attentive des gestionnaires permette de corriger ces erreurs avant la diffusion du rapport.

Les attentes vis-à-vis du rapport annuel sont assez importantes de la part des gestionnaires et des scientifiques associés au réseau. **Ce type de rapport permet de connaître l'état du lac de l'année précédente.** C'est une analyse des données sur le long terme qui permettra de connaître le fonctionnement et l'évolution au cours du temps de ces milieux.

## G. Données intéressantes non regroupées

- Poissons

La conférence organisée par le parc du Grand Paradis sur les Lacs de Haute montagne, dans le cadre du projet Life BIOAQUA a mis en avant les nombreuses problématiques liées à la présence de poissons dans les lacs.

La présence de poissons engendre un changement de l'état du lac, par exemple de sa transparence et des concentrations en nutriments (*Schinder et al, 2001*). Les abondances de phytoplancton et de zooplancton peuvent être fortement dépendantes de la présence de certaines espèces de poissons comme les vairons. Tous les lacs du réseau ont été ou sont encore alevinés.

Les données sur les poissons dans les lacs du réseau existent mais ne sont pas (encore) regroupées dans la banque de donnée de l'Observatoire. Des données relatives à l'alevinage sont disponibles auprès des différents gestionnaires mais il n'y a pas de fichier regroupant toutes ces informations. Il pourrait permettre d'avoir une vision générale sur les populations présentes ainsi que sur les actions menées par les pêcheurs pour le maintien des poissons.

- Capteurs dans les lacs

On sait que tous les lacs sont au moins équipés de 2 thermistors. Certains ont des capteurs de températures supplémentaires ou des capteurs de concentration en O<sub>2</sub>. La page internet relative à chaque lac est supposée contenir ces informations, mais elle n'est pas mise à jour chaque année. Certains lacs sont largement équipés de capteurs pour des projets de recherche spécifique (ex : Lac d'Anterne, lac du Lauzanier, lac de la Muzelle...). Une vision d'ensemble pourrait permettre de savoir quelles informations sont disponibles dans chaque lacs.

De nombreuses données ne sont pas sur le SI alors qu'elles permettraient d'enrichir la base de données, les deux causes majeures sont :

- > les données n'ont pas encore été inscrites par manque de temps ou de moyens
- > les données sont le fruit d'un travail de recherche personnel et ne sont pas disponibles pour tous à l'heure actuelle



## H. Synthèse

Le Tableau 1 permet de faire une synthèse des limites de comparaison inter-lac et inter-année du protocole mis en place.

Certaines données permettent une comparaison des résultats entre les années et entre les lacs. Parfois, la comparaison est difficile car ce sont des mesures relatives à un instant donné. Elles donnent donc une « photographie » du lac à un instant donné. La comparaison reste intéressante mais les interprétations nécessitent de prendre en compte les variations d'autres paramètres (météo, conditions d'échantillonnage ...) C'est par exemple le cas des profils de sonde. Enfin, d'autres mesures pourraient être comparées mais les différences liées aux techniques d'échantillonnage ou d'analyse rendent les comparaisons inter-lacs difficiles.




 : Comparaison pertinente  
 : Comparaison difficile  
 : Comparaison non pertinente du fait des différences de méthode

Tableau 1 : Synthèse des limites de comparaison inter-lac et inter-année du protocole actuel

	Données	Limites de la mesure	Comparaison intra-lac de 2015 à 2016	Comparaison entre les lacs
<i>Observation sur le terrain</i>	Transparence de l'eau	Connaissance du lac à un instant t	✓	✓
<i>Mesure sur le terrain</i>	Profil des sondes (O2, pH, conductivité)	Connaissance du lac à un instant t Matériel non inter-calibré entre les gestionnaires	✓	✓
	Profil de la sonde de chlorophylle-a	Connaissance du lac à un instant t Concentration non fiable Profil récolté uniquement pour 8 lacs (Asters et PNM)	✓	✓
<i>Mesures en laboratoire</i>	Mesure de la concentration en chlorophylle-a	Connaissance du lac à un instant t Echantillonnages différents selon les gestionnaires Méthode de mesure différente entre les laboratoires	✓	✗
	Mesure des paramètres chimiques	Connaissance du lac à un instant t Echantillonnages différents selon les gestionnaires pour l'échantillon de surface Seuls 8 lacs (Asters et EDF) réalisent ces mesures	Surface : ✗ Fond : ✓	Surface : ✗ Fond : ✓
<i>Plancton</i>	Analyse du phytoplancton	Connaissance du lac à un instant t Echantillonnages différents selon les gestionnaires	✓	✗
	Analyse du zooplancton	Connaissance du lac à un instant t Comptages différents entre les experts	✓	✗
<i>Capteurs</i>	Capteurs haute fréquence	Fiabilité des capteurs	✓	✓

En conclusion, deux points sont essentiels concernant les limites du protocole terrain :

- > Les données issues des prélèvements en surface sont majoritairement hétérogènes entre les lacs
- > Les données recueillies en septembre permettent une connaissance du lac à un instant donné

Il est important de rappeler que le protocole est très complet et qu'il nécessite d'importants efforts pour le réaliser. La mise en place du suivi commun des 20 lacs est récente. C'est le résultat d'une forte collaboration entre les gestionnaires, les gardes et les scientifiques. Les données recueillies aujourd'hui seront étudiées plus précisément dans plusieurs années. Il est donc intéressant de connaître dès aujourd'hui les limites du protocole.

La comparaison des lacs avec les données recueillies en 2015 et 2016 a donc une portée limitée pour certains paramètres. Les données permettront toutefois de caractériser les lacs sur leur état physico-chimique et biologique.

Enfin, des critiques du protocole pourront toujours être réalisées. Mais certains points ne pourront pas être résolus, par exemple que les lacs ne sont pas tous échantillonnés au même moment, certains début septembre et d'autres fin septembre. Il y aura toujours des biais possibles dans le protocole, l'important est de les connaître et de les prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

### III. Réflexion sur l'amélioration du protocole

Les points soulevés dans la partie précédente ont tous des solutions pour que le protocole permette un suivi des lacs robuste sur le long terme. Le but est d'obtenir un protocole permettant une comparaison entre les lacs et entre les années. De manière générale, plusieurs options sont possibles pour mesurer les paramètres. Des choix sont donc nécessaires pour trouver un équilibre entre la réalisation d'un protocole relativement « facile » à suivre et l'acquisition de données pertinentes pour les études.

Les actions à mener sont réparties en 4 axes : *Protocole terrain – Fiabilité des données – Nettoyage des données - Amélioration de l'utilisation des données.*

#### A. Protocole terrain et analyses au laboratoire

Plusieurs points pourraient être améliorés sur le protocole terrain, qui est la base de récupération des données et donc une partie essentielle. Il serait nécessaire que le protocole soit ré-homogénéisé entre les gestionnaires.

##### 1. Prélèvements

Il paraît essentiel que la méthode pour récupérer les échantillons d'eau soit la même dans tous les lacs. Au PNE, la méthode utilisée présente des limites, le prélèvement est incomplet. Reste à savoir quelle méthode est applicable sur tous les lacs.

Le choix le plus intéressant serait de faire un prélèvement intégré sur toute la zone euphotique. Cette méthode est utilisée par le protocole de la DCE et permet d'analyser la zone de production, zone éclairée dans laquelle s'opère la production primaire (*Opérations d'échantillonnage d'eau*, AQUAREF, 2016).

Cependant, elle pourrait nécessiter l'utilisation de nouveaux outils d'échantillonnage. Il est également intéressant de préciser que la zone euphotique est très différente entre les lacs, elle peut atteindre 29m pour les plus grands et 0,5m pour les lacs blancs. Elle est de 10m en moyenne.

Différentes méthodes sont possibles pour réaliser un prélèvement intégré :

- Utiliser une bouteille intégratrice. Cet outil permet de prélever en continu un petit volume d'eau le long de la colonne d'eau. Ce serait la méthode idéale mais son coût est un inconvénient. Il faut également penser qu'une seule bouteille ne permettrait pas de réaliser la mesure sur tous les lacs, il est plutôt prévu que chaque gestionnaire ait son matériel. De plus, la bouteille intégratrice pèse quand même 7,5 kg (bouteille de 2.5L de *Hydro-Bios*). Le transport jusqu'au lac est donc un deuxième point problématique.

- Utiliser un tuyau d'échantillonnage (tube descendu verticalement le long de la colonne d'eau). Cette méthode plus rudimentaire permettrait de réaliser un prélèvement comme si l'on utilisait une « pipette ». D'un faible coût, l'inconvénient majeur reste le poids et l'encombrement pour l'emmener sur le bateau.



Le tuyau devrait être lesté pour être droit, il sera ensuite nécessaire de relever le fond du tuyau en premier et de boucher l'extrémité supérieure. Pour limiter l'encombrement, le tuyau pourrait être découpé en portion et assembler juste avant sa mise à l'eau, ce qui permettrait également de ne pas transporter un grand

tuyau pour les petits lacs. C'est une méthode proposée pour l'échantillonnage lors du projet européen EMERGE (European Mountain lake Ecosystems: Regionalisation, diaGnostic &

socio-economic Evaluation) qui a étudié 350 lacs d'altitude (*EMERGE Methods*, Mosello et al, 2002).

Une solution plus évidente est une utilisation plus précise de la bouteille de prélèvement. Le but étant de maximiser les chances d'effectuer un prélèvement dans la zone de forte production primaire en réalisant des prélèvements dans la zone euphotique. La profondeur maximale de la zone euphotique correspond à 2,5 fois la mesure au disque de Secchi, à cette profondeur seul 1% de l'énergie lumineuse de surface est disponible.

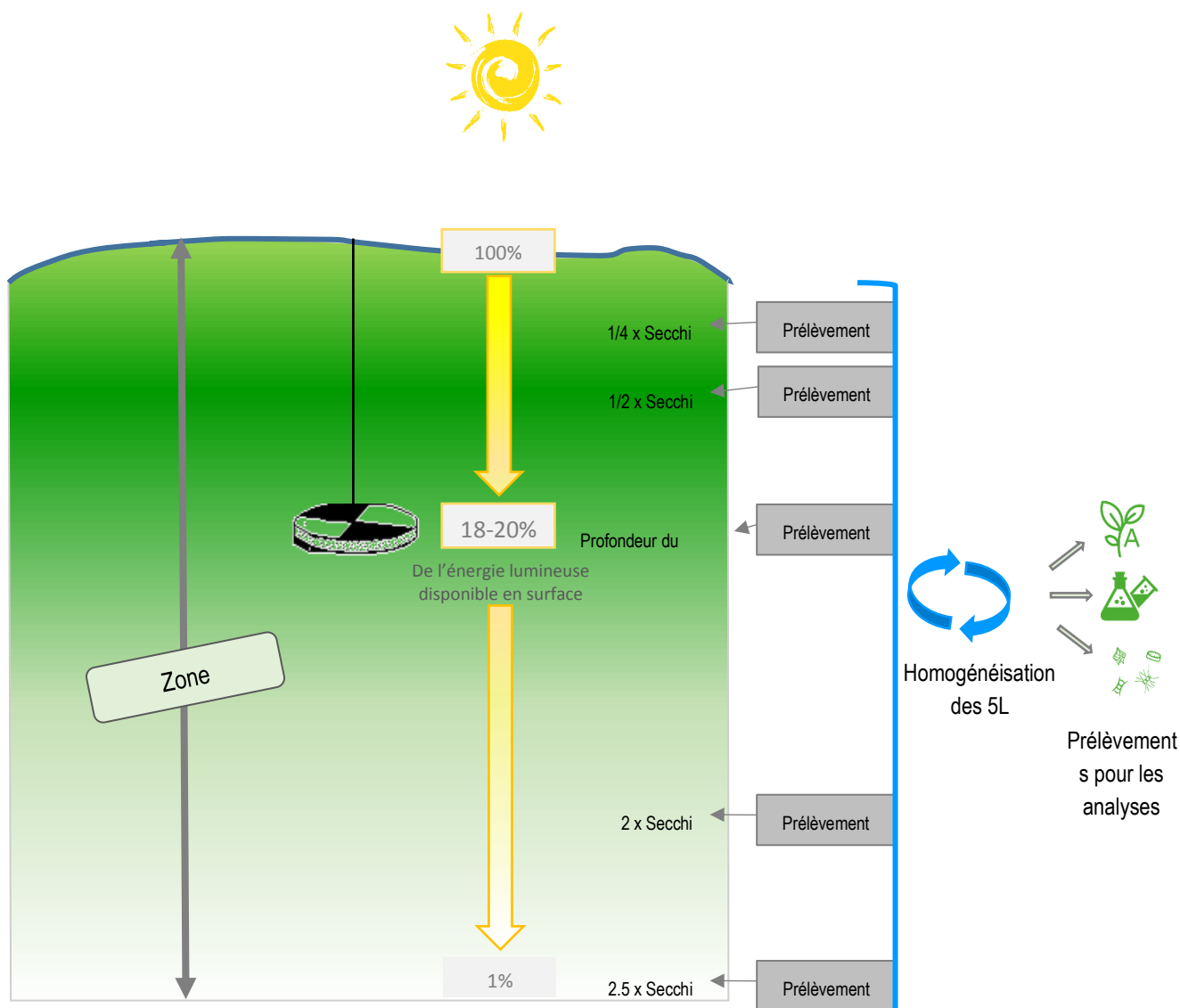


Figure 4 : Nouveau protocole proposé pour le prélèvement en surface

La méthode proposée est de se baser sur la mesure du disque de Secchi (la profondeur de disparition du Secchi correspond à une zone où arrive environ 18 à 20% de l'énergie lumineuse) et de réaliser 5 prélèvements autour de cette profondeur pour couvrir la zone euphotique (cf. Figure 4). A chaque profondeur, 1L d'eau est prélevé. Ils sont ensuite homogénéisés dans un seau puis les prélèvements destinés aux dénombrements du phytoplancton, aux mesures de concentrations en chlorophylle-a et en éléments chimiques sont réalisés. Cette méthode sera testée sur les lac dès septembre 2017.

En conclusion, le point le plus important est que la méthode soit la même entre les lacs. Ensuite, le mieux serait que le prélèvement soit intégrateur. Cependant, au vu des contraintes liées au terrain, une méthode plus précise de 5 prélèvements serait déjà une grande avancée et permettrait une meilleure interprétation des résultats. C'est une action essentielle pour que les données de chlorophylle-a, de chimie et de phytoplancton puissent être comparables entre les lacs.

## 2. Paramètres optionnels

Le protocole complet est réalisé uniquement sur les lacs d'Asters et d'EDF. L'acquisition des données optionnelles (chimie - phytoplancton - zooplancton et chlorophylle-a) par tous les gestionnaires pourrait permettre de mieux caractériser tous les lacs du réseau.

**PNE** : Les analyses chimiques et de chlorophylle-a ne sont pas réalisées. Il faudrait que le PNE puisse réaliser un partenariat avec un laboratoire à proximité pour réaliser les mesures. Le point problématique est le transport nécessaire des échantillons d'eau vers le laboratoire assez rapidement (1 jour après le prélèvement). Si ce temps est trop court, une acidification des échantillons pourraient permettre de les conserver 3 à 4 jours et de mesurer la plupart des concentrations (sauf la mesure de l'azote ammoniacal  $\text{NH}_4$  qui nécessite une mesure très rapidement après le prélèvement).

**PNM** : Il n'y a pas d'analyses chimiques des échantillons, mais uniquement des analyses du plancton et de la chlorophylle-a. Les prélèvements en surface sont donc réalisés, il manquerait donc uniquement le prélèvement en profondeur, puis de conclure un partenariat pour des analyses de chimie de l'eau.

**PNV** : Les analyses chimiques, de phytoplancton, de zooplancton et de chlorophylle-a ne sont pas réalisées. Réaliser ces mesures nécessiterait d'acheter une bouteille de prélèvement, ainsi que de trouver un moyen de transport des échantillons rapide vers un laboratoire d'analyse (potentiellement l'UMR CARTEL).

Le frein majeur pour réaliser ces mesures est un problème de coût d'analyse et de moyens humains par rapport au budget de la structure.

## 3. Méthodes d'analyse de la concentration en chlorophylle-a

Les méthodes utilisées à l'UMR CARTEL et à l'UMR IMBE sont légèrement différentes. Un accord entre les deux laboratoires permettra d'homogénéiser rapidement ce point du protocole. Aucune difficultés majeures ne semblent poser problème. Les deux méthodes sont très semblables.

Le plus intéressant serait de se baser sur le protocole DCE et donc d'utiliser la même méthode (Norme Afnor : NF T 90-117, 1999).

## 4. Comptage du zooplancton

Pour comparer les lacs, il est nécessaire que les comptages de zooplancton entre les laboratoires soient similaires. Un accord sur les classes à déterminer est à trouver. Le comptage des rotifères, même si une portion des espèces n'est pas comptabilisable, est intéressant. L'abondance peut être fortement augmentée en comptant les rotifères dans les lacs de montagne (*Tolotti et al, 2006*).

## B. Fiabilité des données

Si plus de précision sur les données sont nécessaires, une réflexion sur la fiabilité des mesures est importante. Pour obtenir des données comparables, les mesures doivent être le plus identiques possible d'une année à l'autre et tout particulièrement d'un lac à l'autre.

### 1. Vérification des capteurs haute fréquence

Pour des données plus précises, il serait nécessaire de vérifier que les capteurs restent fiables lors de la récupération des données, c'est-à-dire avant de remettre le capteur dans l'eau pour l'année suivante. Peu de retour d'expériences sur la fiabilité des tinytag à long terme sont disponibles.

Pour cela, la méthode proposée est de sortir les capteurs haute fréquence et de les placer sur la berge pendant quelques dizaines de minutes. Il faudrait aussi emporter sur le terrain un capteur calibré récemment (ou utiliser la température donnée par la sonde exo) puis vérifier que les capteurs sortis

donnent des résultats similaires au capteur « neuf ». Les données sont visibles en temps réel et une vérification rapide permettrait de montrer que les capteurs sont toujours fiables.

Cette méthode est relativement simple à mettre en place mais reste pénible car il faut sortir les capteurs les emmener sur la berge, les laisser au minimum 15min puis les reposer dans le lac. Il pourrait s'agir d'un test à réaliser tous les 4-5 ans par exemple.

Une option alternative serait de considérer la pose de capteurs haute fréquence pour la mesure de l'oxygène (miniDOT). En plus des données sur l'O<sub>2</sub> qu'ils permettraient d'acquérir, ils possèdent également un capteur de température. L'observatoire aimerait poser des capteurs d'O<sub>2</sub> au fond des lacs, les données du miniDOT peuvent confirmer les données du thermistor en profondeur.

## 2. Comparaison des analyses des laboratoires

Comme les analyses sont réalisées dans des laboratoires différents, il serait intéressant de vérifier leur homogénéité. Concernant les analyses des paramètres chimiques, peu de différences sont attendues car les analyses sont conduites selon des normes AFNOR. De plus, à l'heure actuelle seul l'UMR-CARTELL réalise les analyses des paramètres chimiques.

Par rapport aux comptages de zooplancton ou phytoplancton, de plus grandes différences sont attendues. Même si le même protocole est utilisé (norme Afnor NF EN 15.204- Utermohl pour le comptage du phytoplancton), on peut s'attendre à des différences liées aux différences d'échantillonnage mais également aux différences d'expérimentateurs et de niveau d'expertise taxonomique.

Une solution pourrait être qu'un seul laboratoire effectue toutes les analyses. Cette méthode éviterait les différences de lecture et rendrait des données plus comparables. Cependant, il est plus logique que différents laboratoires travaillent en collaboration. Le but de l'Observatoire est d'assurer un suivi sur le long terme et donc de réaliser une méthode d'analyse reproductible.

Pour mettre au clair les différences entre les laboratoires, quelques échantillons pourraient être doublement comptés et les différences pourront être observées. Cette idée nécessite des frais supplémentaires d'analyse mais permettrait de clarifier s'il y a vraiment des différences de comptage. Il existe également des journées organisées par F. Rimet (UMR-CARTELL) d'harmonisation des méthodes du comptage de phytoplancton.

## C. Nettoyage des données et mise en forme

Certaines données publiées sur le SI nécessitent au préalable un nettoyage. C'est le cas des données issues des sondes multi-paramètres et des capteurs haute fréquence.

### 1. Données issues des sondes multi-paramètres

Le nettoyage des données des sondes doit permettre de supprimer les données aberrantes : celles des premiers centimètres sous la surface et celles près du fond (risque de mesure dans un mélange sédiments-eau).

Une macro (c'est-à-dire une application automatisée codée sous excel avec le langage de programmation VBA) créée à l'INRA permet d'ôter les mesures prises lors de la remontée de la sonde et les mesures aberrantes (par exemple une mesure de pH supérieure à 14). Elle permettra de simplifier le travail de nettoyage des données réalisé par les gestionnaires. Son utilisation sera présentée lors des Rencontres du réseau Lacs sentinelles 2017.

Cependant, cet outil ne peut pas remplacer une validation des résultats par un spécialiste. C'est le cas pour les grands lacs alpins, les données sont visualisées par des scientifiques avant leur publication. Les gestionnaires n'ont pas tous les connaissances pour juger de la pertinence des données récoltées. Il pourrait être intéressant qu'un scientifique examine les résultats et donne son accord pour la publication des données brutes sur le SI du SOERE-OLA. Cela permettrait d'assurer une fiabilité des données publiées sur le SI.

## 2. Données issues des capteurs haute fréquence

Les données haute fréquence sont un outil très intéressant mais la quantité de données récoltées peut être complexe à prendre en main. Deux points sont essentiels pour les données haute fréquence :

- La standardisation des données

Toutes les données récoltées sur les capteurs sont à mettre sous le même format pour qu'une analyse soit réalisée. Les données récoltées sur les capteurs sont des fichiers au format *tinytag*, il y a un fichier par capteur. Il est important de mettre en forme toutes les données sous un seul fichier excel. Il contient alors toutes les données issues des différentes profondeurs du lac. Les noms des colonnes sont homogénéisés grâce au logiciel DataStandardizer. C'est une étape essentielle pour homogénéiser les données entre lacs et permettre ensuite une comparaison des lacs.

- Le nettoyage des données

Le logiciel B3 lit les fichiers standardisés au préalable. Il permet de signaler différentes anomalies, dont les plus problématiques sont : des données manquantes, des valeurs répétées, des valeurs aberrantes (supérieur ou inférieur aux limites fixées). B3 permet également de corriger les valeurs suite à une dérive d'un capteur. C'est un logiciel essentiel pour valider les données haute fréquence en utilisant des outils d'assurance et de contrôle qualité (QA/QC).

Des guides d'utilisation des logiciels (Manuels d'utilisation de Data Standardizer et de B3, Rosalie Bruel) sont disponibles pour apprendre à les utiliser.

Enfin, pour terminer cette partie, il serait très pratique d'avoir un espace de stockage des données sur le SI pour les données haute fréquence. Ce point est en cours de réalisation par les gestionnaires de la plateforme du SOERE-OLA.

## D. Amélioration de l'utilisation des données

Cette année, les données ont été utilisées essentiellement pour créer le rapport monitoring et pour une comparaison des lacs. Ces rapports permettent de visualiser les résultats obtenus pour les années 2015 et 2016 et de donner une première idée de l'état du lac et de sa typologie écologique. Par contre, d'autres données sont déjà disponibles grâce à d'autres recherches.

### 1. Etat des lieux des connaissances sur le lac

Pour chaque lac, il serait intéressant d'avoir une fiche récapitulative des connaissances et du matériel installé. Cette fiche existe déjà sous la forme d'une page web sur le site internet du réseau mais elle n'est pas mise à jour. Elle permettrait de comprendre plus en détail le fonctionnement du lac, sans chercher à obtenir plus de données, mais en effectuant un compte rendu des données déjà acquises.

Il pourrait aussi comporter un bilan de l'état actuel (qui correspond au début du suivi pour l'Observatoire). Ce rapport pourrait ensuite être complété par les recherches menées grâce au réseau Lacs sentinelles : étude paléo, étude des diatomées .... et recueillerait aussi les données relatives aux activités aux bords du lac (pêche, alevinage, pastoralisme ...).

### 2. Analyse des données recueillies

Le rapport du monitoring permet d'analyser rapidement les données recueillies dans l'année. Cependant, d'autres analyses pourraient être réalisées car un grand nombre des données ont déjà été recueillies.

La liste ci-dessous permet de clarifier l'intérêt de chaque type de mesure.

- Les **données des sondes** : elles donnent un avis de l'état du lac au moment de la mesure, c'est-à-dire en septembre. Ce sont des données de base pour comprendre les données obtenues à partir des prélèvements (chimie, plancton), elles apportent des connaissances indispensables pour

étudier les groupements biologiques prélevés à la même date. Une comparaison entre les lacs ou entre les années peut être intéressante mais une véritable interprétation des résultats nécessiterait de prendre en considération les paramètres importants comme la météo.

- Les **prélèvements** : Les analyses réalisées sur les échantillons d'eau prélevés (chimie, plancton) permettent de mieux caractériser le lac. Par contre, elles sont difficiles à interpréter avec uniquement 1 ou 2 ans de données et une comparaison entre les lacs est difficile. A plus long terme, ces données permettront d'interpréter des évolutions de l'état du lac.
- Les **données haute fréquence** : elles permettent d'avoir une connaissance poussée de la dynamique annuelle du milieu et de détailler les variabilités saisonnières voire journalières des paramètres mesurés (température et O<sub>2</sub>). Seuls des capteurs de température sont actuellement placés dans tous les lacs. Certains lacs (Brévent, Rabuons et Lauzanier) ont également des capteurs d'oxygène en profondeur à partir de septembre 2016, les données seront recueillies en septembre 2017.

L'autre avantage des données haute fréquence est qu'elles pourraient permettre à l'avenir de faire des recherches plus poussées via la création de modèles par exemple.

Les données des capteurs haute fréquence permettent de comprendre la dynamique du lac, contrairement aux données issues des sondes. En effet, par exemple en 2016, les données issues des sondes sur le lac du Brévent montrent que le lac est oxygéné même en profondeur. Or on sait que des zones hypoxiques voir anoxique sont habituellement présentes (*Diagnose écologique et paléolimnologique du lac du Brévent, Simon Belle, 2012*). Un capteur de saturation en oxygène placé au fond du lac permettrait de connaître la saturation en O<sub>2</sub> de manière continue. L'O<sub>2</sub> est un paramètre essentiel pour comprendre la dynamique trophique du lac

En somme, pour connaître le fonctionnement du lac, il serait intéressant de maximiser le nombre de capteurs haute fréquence présents dans les lacs.

Les données recueillies lors de la sortie en septembre seront utilisées lorsqu'un nombre conséquent d'années de mesures seront disponibles. Actuellement, deux ans de données n'est pas suffisant pour produire des analyses, les différences observées sont peut-être dues à des différences de méthode, de météo ou de date de prélèvement.



## Conclusion

L'amélioration du protocole passe par plusieurs points : un protocole terrain plus homogène entre les lacs, une amélioration de la fiabilité des données et un travail sur les données avant leurs publications sur le SI.

- Le protocole de terrain doit être véritablement homogène entre les 20 lacs, autant du point de vue des méthodes de prélèvements que des analyses réalisées par les laboratoires.
- Il est important que la fiabilité des données soit connue dans un premier temps puis améliorée si c'est possible.
- Les données publiées sur le SI du SOERE-OLA doivent être nettoyées au préalable (notamment celles issues des sondes et capteurs)

Enfin, la création d'une fiche par lac détaillant l'état actuel (les capteurs installés, les connaissances spécifiques à ce lac, les données disponibles, les recherches en cours...) pourrait permettre de clarifier les actions menées par le réseau.

Pour conclure, la Figure 5 montre les données que l'on pourrait obtenir lors d'une campagne de mesure optimale.

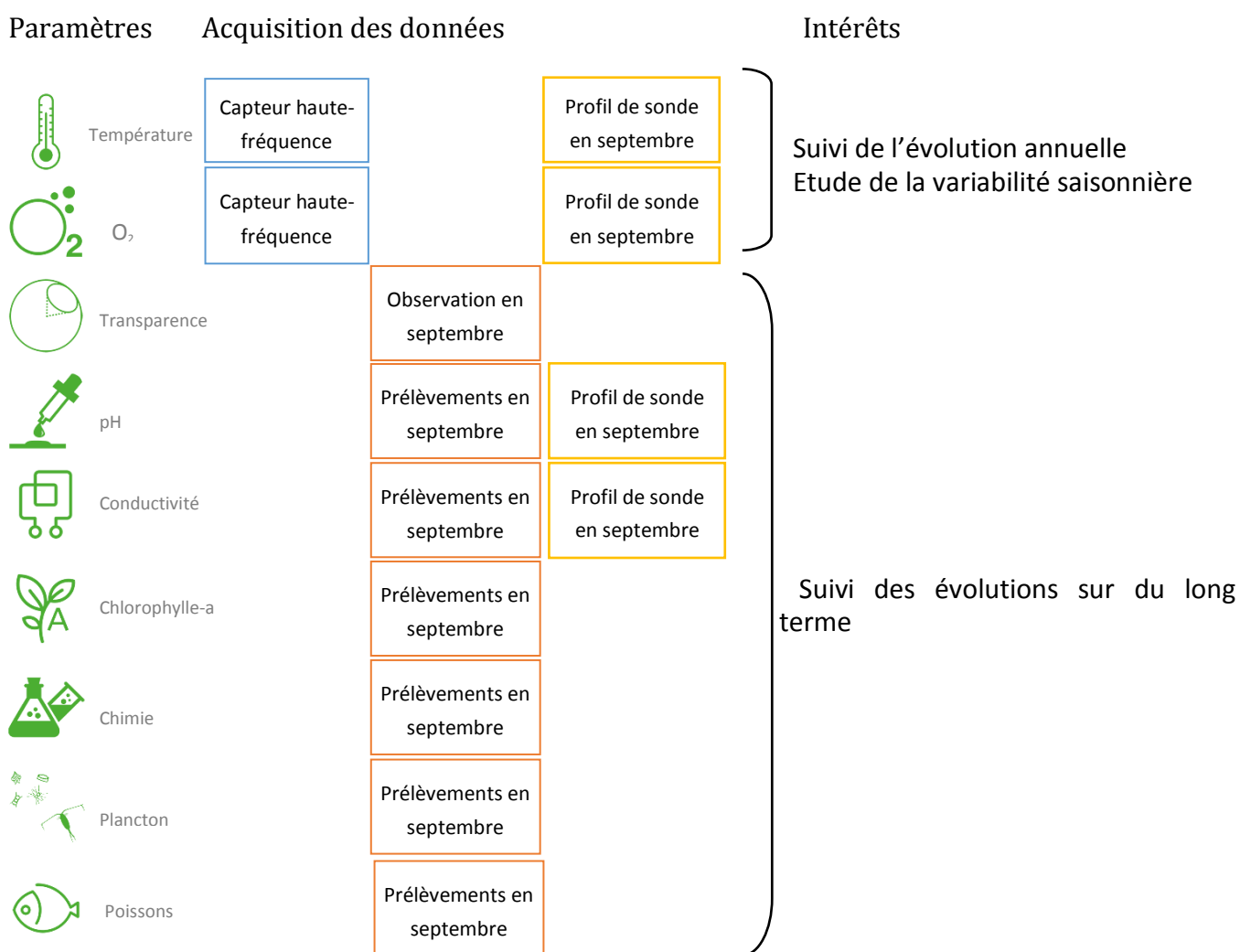









Figure 5: Paramètres et données à obtenir pour un suivi complet

Dans le prolongement de ce travail, une étude des données plus anciennes récoltées sur les lacs d'Asters pourrait permettre de mieux identifier les paramètres essentiels à suivre afin de suivre les changements physiques, biologiques et chimiques des lacs d'altitude.

## IV. Tableau de synthèse des propositions

	Points problématiques	Méthode actuelle	Problème	Solutions possibles	Intérêts	Inconvénients	Faisabilité
<i>Protocole terrain</i>	Différentes méthodes d'échantillonnages de l'eau pour les analyses de concentrations en chlorophylle et de phytoplancton	Différentes selon les gestionnaires	Données non comparables entre les lacs	Bouteille intégratrice	Prélèvement intégré sur la zone euphotique réalisé facilement	- Coût - Poids du matériel à transporter sur le lac	
				Tuyau	Prélèvement intégré sur la zone euphotique	- Encombrement du matériel à transporter - Mise en place du tuyau sur le petit bateau	
				Prélèvements précis selon la mesure du Secchi	Facile à mettre en œuvre Pas d'achat de nouveau matériel	Prélèvement non intégré sur la zone euphotique	
	Différence de méthode d'analyse de la chlorophylle-a	Scor-Unesco Strickland Parsons	Différences de méthodes selon les laboratoires	Les deux laboratoires utilisent la méthode de la DCE	Protocole totalement identique	Changement de méthode	
Différences d'expertise	Différences de comptage du zooplancton	Données non comparables	L'IMBE compte en plus les rotifères	Protocole identique donc les données seront comparables	Formation à l'IMBE ?	 ?	
<i>Fiabilité des données</i>	Durée de vie des capteurs haute fréquence	Pas de test de fiabilité des capteurs	Quels est la durée de vie des capteurs et leurs biais ?	Test des capteurs posés lors de la mission terrain	- Les dérives des capteurs sont connues - Les capteurs en dérive sont changés	Action supplémentaire à faire lors de la mission terrain	

	Comparaison des analyses de laboratoires	Les deux laboratoires effectuent les mêmes analyses sur des échantillons différents	Quelles sont les différences d'analyses entre les 2 laboratoires ?	1 laboratoire effectue toutes les analyses	Plus de différences de manipulations	-Les analyses sont censées être reproductibles (condition pour un suivi long terme) -Nécessite de plus long temps de transport des échantillons	
				Test de vérification entre les laboratoires	Les différences potentielles seront clarifiées	Double travail	
<i>Nettoyage des données</i>	Données sondes	Pas de nettoyage des données avant publication sur le SI	Les données ne peuvent pas être utilisées telles quelles (notamment pour le rapport du monitoring)	Utilisation de la macro de l'INRA par les gestionnaires avant la publication des données sur le SI	Données publiées sur le SI sans anomalies Analyse + rapide lors du rapport du monitoring	-Formation des gestionnaires -Plus de travail pour les gestionnaires	
				Validation des résultats de chaque lac par un spécialiste	Données publiées validées	Demande d'expertise d'un spécialiste	
	Données haute fréquence	Pas de nettoyage et de mises en forme des données avant leur transmission à Asters	Les données ne peuvent pas être utilisées telles quelles (notamment pour le rapport du monitoring)	Utilisation des logiciels DataStandardizer puis B3 par les gestionnaires avant la publication des données sur le SI	-Les données publiées seront « justes », pas de publication de données aberrantes - Analyse + rapide lors du rapport du monitoring	-Formation des gestionnaires pour l'utilisation de DataStandardizer et B3 -Plus de travail pour les gestionnaires	
<i>Données manquantes</i>	Pas de synthèse sur les données pêches-alevinage	/		Synthèse des données disponibles	Plus de connaissance sur les lacs		
	Pas de données sur l'O <sub>2</sub> en continue	/		Pose de miniDOT	Plus de connaissance sur les lacs	Coût	

## Bibliographie

AGENCE DE L'EAU RHONE MEDITERRANEE CORSE. **Étude des plans d'eau du programme de Surveillance des bassins Rhône méditerranée et corse - rapport de données brutes et Interprétation -lac d'Anterne**, 2015.

AQUAREF - **Opérations d'échantillonnage d'eau en plan d'eau dans le cadre des programmes de surveillance DCE - Recommandations techniques** – Edition 2016

BELLE S. **Diagnose écologique et paléolimnologique de 3 lacs d'altitude des Aiguilles Rouges (74) : le lac du Brévent, le lac Noir et le lac du Chereys**, 2012.

BRUEL R. **Manuel d'utilisation de Data Standardizer, Standardisation des données capteur**, 2014.

BRUEL R. **Manuel d'utilisation de B3, Compilation des données haute-fréquence et outil de contrôle des données**, 2014.

CHICK JH., LEVCHUK AP., MEDLEY KA., HAVEL JH. **Underestimation of rotifer abundance a much greater problem than previously appreciated**. *Limnology and oceanography : Methods* 8, 79-87, 2010.

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER. **Guide relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)**, Mars 2016.

SCHINDLER DE. , KNAPP RA, LEAVITT PR. **Alteration of nutrient cycles and algal production resulting from fish introductions into mountain lakes**. Springer, 2001

TOLOTTI M., MANCA M., ANGELI N., MORABITO G., THALER B., ROTT E., STUCHLIK E. **Phytoplankton and Zooplankton Associations in a Set of Alpine High Altitude Lakes: Geographic Distribution and Ecology**. *Hydrobiologia*, Volume 562, [Issue 1](#), pp 99–122, 2006.

## Annexe 3 : Détails de la dynamique thermique pour chaque lac du réseau

### LA STRATIFICATION HIVERNALE :

- **Date de prise en glace**

Tout d'abord, la date de prise en glace s'étend de mi-octobre à début décembre pour la plupart des lacs les deux années. La frise de la figure A détaille les dates de prise en glace des lacs.

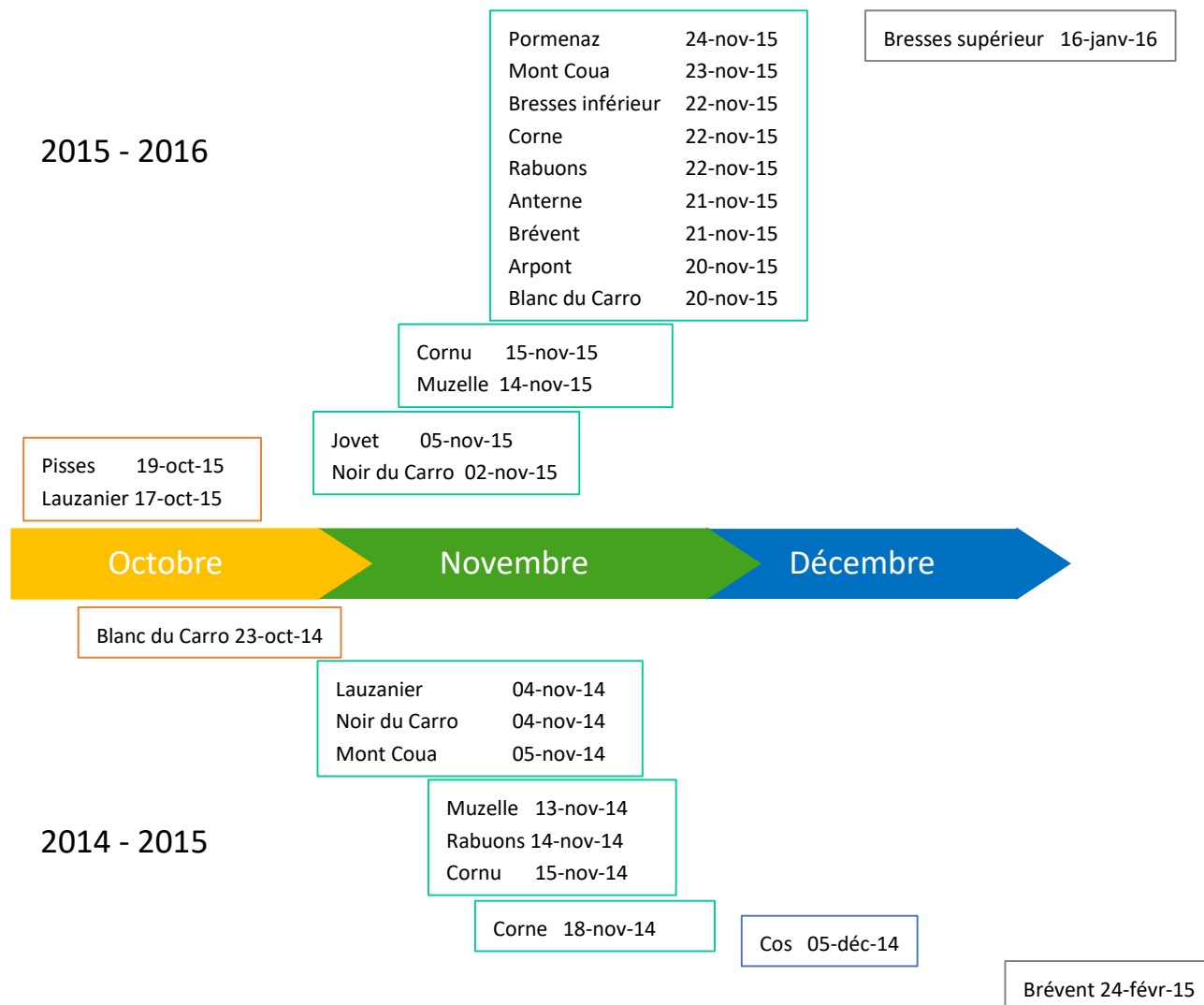


Figure A: Frise résumant les dates de prise en glace pour les deux années

Il faut analyser ces dates en association avec la météo de ces périodes.

L'hiver 2014-2015 a été relativement conforme aux normales de saison alors que l'hiver suivant a été très chaud et sec selon les données de MétéoFrance (*Bilan climatique des hivers 2014-2015 et 2015-2016*). Le début de l'hiver de 2015-2016 a été beaucoup plus doux que celui de l'hiver 2014-2015. Les mois de novembre et décembre 2015 ont même étaient les plus chauds et secs depuis 1900. Les températures du mois de janvier 2016 ont également été très douces pour la saison.

Cette différence des températures entre les deux hivers n'est pas très perçue par les données relatives aux brassages des lacs. Les dates de prise en glace des lacs sont assez similaires pour les deux années. Pour la plupart des lacs, la prise en glace a lieu au mois de novembre. Par contre, en regardant lac par

lac, nous pouvons remarquer des différences. Pour certains lacs, la prise en glace a lieu quasiment à la même date (Muzelle, Noir du Carro, Corne, Cornu). La date de prise en glace a été retardée pour les lacs Blanc du Carro et Mont Coua peut être du fait des hautes températures du mois de novembre 2015. A l'inverse, pour le lac du Lauzanier et le lac Brévent la date de prise en glace est avancée. Le lac du Brévent retrouve une date de prise en glace plus cohérente avec les autres lacs en 2015.

Deux lacs terminent le brassage automnal très tard dans l'année : en janvier 2016 pour Bresses supérieur et en février 2015 pour le Brévent. En étudiant les données des capteurs de température, il semblerait que le brassage du lac de Bresses supérieur dure de septembre 2015 à janvier 2016 (cf. Figure B). Ce sont les premières années de mesure de température sur le lac de Bresses supérieur. Il serait intéressant d'étudier les résultats des années à venir pour voir si l'année 2016 est une exception ou si ce lac a une prise en glace retardée tous les ans.

Pour le lac du Brévent, le brassage semble également très long entre septembre 2014 et février 2015 (cf. Figure C).

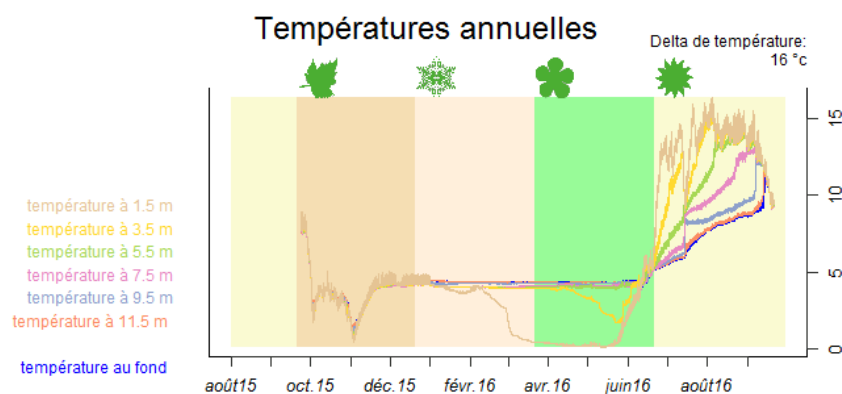


Figure B: Evolution des températures entre septembre 2015 et septembre 2016, lac de Bresses supérieur

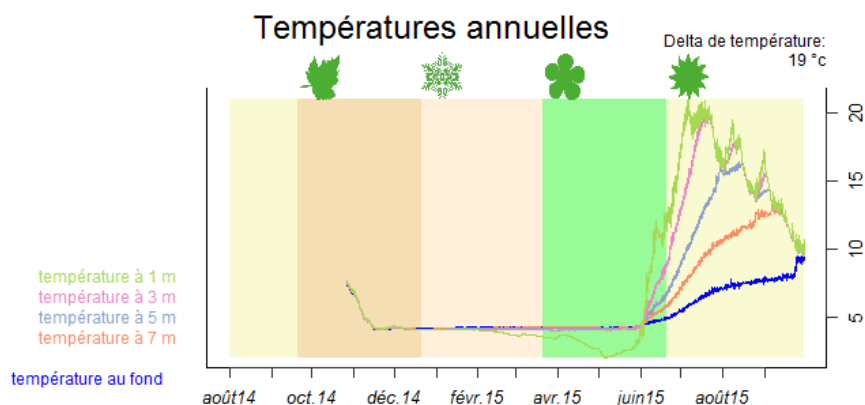


Figure C : Evolution des températures entre septembre 2014 et septembre 2015, lac de Brévent

- **Date de déprise en glace**

Le même modèle de frise permet de visualiser les dates de déprise en glace des lacs sur les deux années (cf. Figure D).

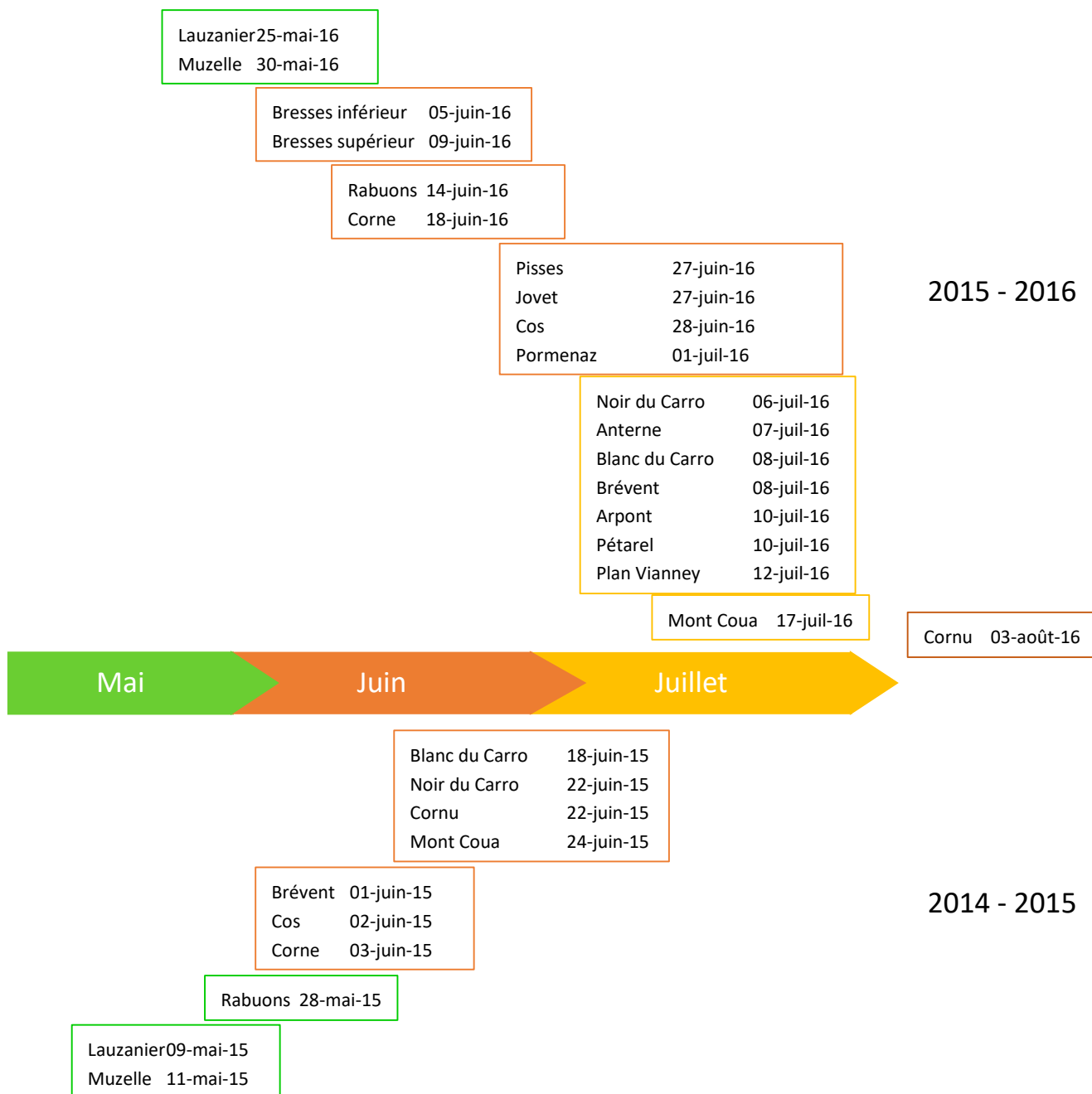


Figure D: Frise résumant les dates de déprise en glace pour les deux années

La date de déprise en glace des lacs en 2015 s'étale de début mai à fin juin. La période est plus étalée en 2016 (il y a aussi plus de lacs mesurés), de fin mai à mi-juillet, avec une exception à début août pour le lac de Corne. Tous les lacs ont dégelés plus tard en 2016 qu'en 2015. C'est assez remarquable que 5 lacs (sur 10) ont entre 15 à 20 jours de décalage entre 2015 et 2016 (Corne : 16 jours, Lauzanier : 18 jours, Muzelle : 20 jours, Noir du Carro : 15 jours, Rabuons : 19 jours).

Concernant les données de météo, l'été 2015 a été très chaud. Le mois de juin a été le 4<sup>ème</sup> mois de juin le plus chauds depuis 1900. Cela peut expliquer une déprise en glace « avancée » des lacs en 2015. A la

fin juin 2015, l'isotherme 0°C avait atteint les 4300 mètres d'altitude (*Bilan climatique de l'été 2015*, Météo France).

En 2016, il y a eu un rafraîchissement au début du mois de mai et de nombreux épisodes pluvieux durant tout le mois de mai. Suite à cela, un pic de chaleur a été mesuré autour du 23 juin. Cela peut expliquer le fait qu'un grand nombre de lacs déglace fin juin et début juillet 2016.

Néanmoins, il faut rester prudent en utilisant des informations relatives à la météo car les conditions en montagne peuvent être totalement différentes des observations régionales et peuvent différer d'un massif à l'autre également.

Ces analyses sont les premières comparaisons de la dynamique thermique des lacs. Plus d'années de mesures permettront de mieux interpréter ces données. De plus, une analyse plus pointue de la météo lors des épisodes de brassages permettrait de détailler les conséquences de la météo sur le lac. Il faudrait pour cela utiliser des données climatiques locales.

### TEMPERATURES ESTIVALES :

Entre les années 2015 et 2016, nous pouvons uniquement comparer la date où la température passe supérieure à 10°C et la température maximale de l'été car pour certains lacs, la température était encore supérieure à 10°C lors des relevés des données en septembre.

*Tableau A: Dates auxquelles la température de surface passe supérieure à 10°C*

Le Tableau A détaille les dates auxquelles la température de surface passe au-dessus des 10°C pour chaque lac.

Certaines données ne sont pas disponibles en 2015 car les capteurs de températures n'étaient pas encore installés. En 2016, seuls deux lacs n'ont pas de données pour cette période (Le Lauzanier et le Merlet supérieur). Pour le lac de l'Arpont, la température n'est pas supérieure à 10°C durant tout l'été 2016.

Tout comme la date de déprise en glace, la date à laquelle la température de surface est supérieure à 10°C est plus tardive en 2016.

En moyenne, la date d'entrée dans la période de haute température est reculée de 20 jours en 2016.

Cette observation peut être expliquée par les observations météo : l'été 2015 a été très chaud et notamment le mois de juin, avec plusieurs épisodes de canicule, notamment du 30 juin au 8 juillet 2015.

	2015	2016
Anterne	29-juil-15	01-juil-16
Arpont		/
Blanc du Carro	15-juil-15	20-juil-16
Bresses inférieur		22-juin-16
Bresses supérieur		23-juin-16
Brévent	12-juin-15	19-juil-16
Corne	15-juin-15	01-juil-16
Cornu	01-juil-15	14-août-16
Cos	28-juin-15	07-juil-16
Jovet		26-août-16
Lauzanier	26-juin-15	
Merlet Supérieur	05-juil-15	
Mont Coua	07-juil-15	04-août-16
Muzelle	28-juin-15	07-juil-16
Noir du Carro	13-juil-15	20-juil-16
Pétarel		10-juil-16
Pisses		27-juil-16
Plan Vianney		12-juil-16
Pormenaz		09-juil-16
Rabuons	24-juin-15	02-juil-16



Les températures maximales des étés 2015 et 2016 sont assez différentes d'un lac à l'autre (cf. Figure E). En 2015, la médiane sur l'ensemble des lacs était de 16.9°C, elle est de 14.9°C en 2016.

Cependant, on ne peut pas en déduire que la température médiane était supérieure en 2015 car plus de données sont disponibles en 2016, notamment des données sur les lacs « froids » (lac de l'Arpont, lac Jovet). Néanmoins, pour l'évolution entre 2015 et 2016, les températures de 2016 sont égales ou inférieures à celles de 2015. Dans 6 lacs sur 14 lacs, la température maximale en 2016 était inférieure d'au moins 2°C des températures de 2015.

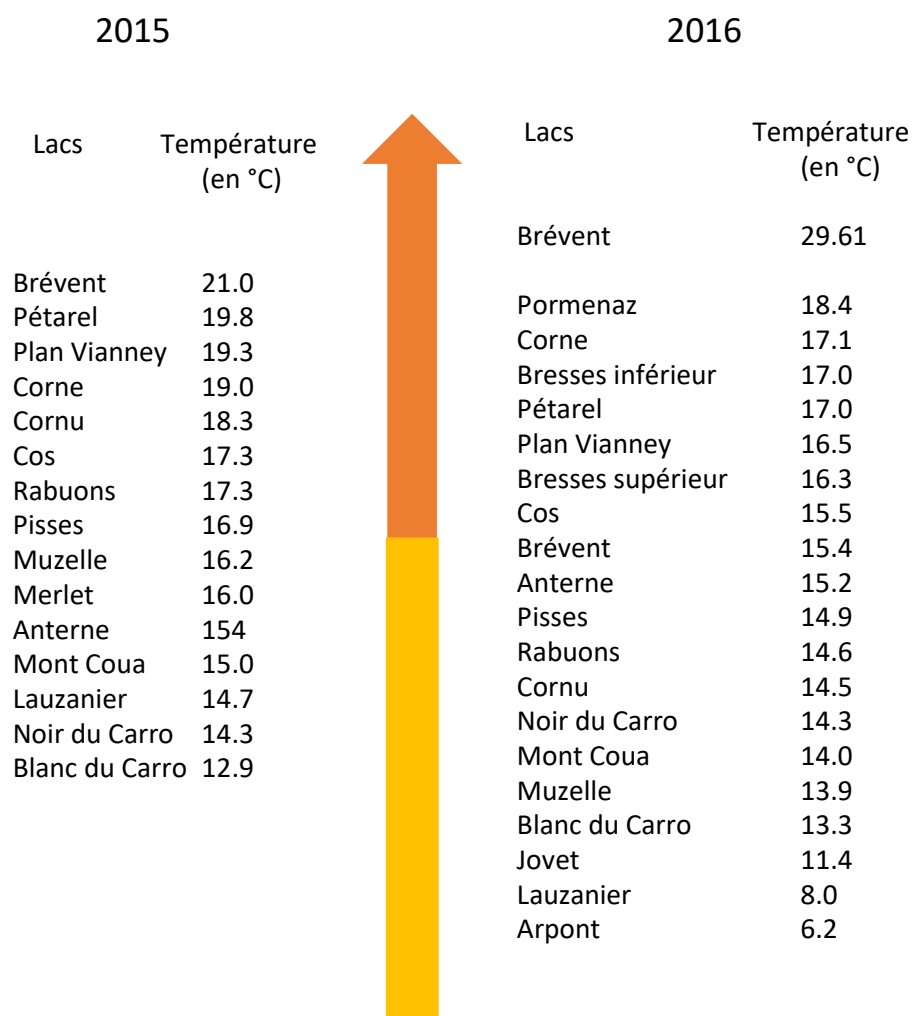


Figure E: Températures de surface maximales estivales

## Annexe 4 : Tableau de données relatives aux profils de sonde et aux analyses physico-chimiques

Lac	2015											2016										
	date de prélèvement de la zone euphotique	Profondeur de la zone euphotique	prof thermocline	prof chloro	pH moyen	delta pH	delta ox(%)	conductivité (µS/cm)	Chloro (µg/l)	Ptot (mg/l)	date de prélèvement de la zone euphotique	Profondeur de la zone euphotique	Profondeur du pic de chloro	pH moyen	delta pH	delta ox(%)	Conductivité (µS/cm)	Chloro (µg/l)	Ptot (mg/l)			
Anterne	02/09/2015	12	9	9.7	7.6	0.2	43.9	184	0.6	0.004	13/09/2016	12	6.3	9.8	7.9	1.9	77.2	189.6	0.6	0.007		
Arpont	10/09/2015	0.625	NA	NA	6.7	0.1	6.8	17.3	NA	NA	22/09/2016	0.5	NA	NA	7	0	1.1	25.3	NA	NA		
Blanc du Carro	09/09/2015	1.1875	1	NA	6.8	0.2	18.2	16.9	NA	NA	20/09/2016	1.13	NA	NA	6.5	0.1	1	14.3	NA	NA		
Bresses inférieur	23/09/2015	13	11	8.8	7.2	0.2	1.5	5.6	1.4	NA	21/09/2016	13	NA	6.5	7.2	0.5	3.3	6	1.9	NA		
Bresses supérieur	23/09/2015	10	NA	6.5	7.5	1.6	15	4.7	2.5	NA	21/09/2016	12	NA	9.0	7.3	0.8	4.1	5	3	NA		
Brévent	07/09/2015	9.05	NA	13.5	6.4	0.8	108	17.4	2.8	0.007	08/09/2016	NA	5.0	14.2	7.6	1.4	85.2	18.4	2.1	0.007		
Corne	31/08/2015	6	4	NA	9.3	1.3	87.6	17.1	11	0.006	14/09/2016	6.75	8.1	NA	7.2	2.4	69.7	17.7	7.6	0.011		
Cornu	07/09/2015	22	10	17.2	5.6	0.8	42.6	2.4	1.4	0.006	08/09/2016	22	1.1	18.2	5.8	0.7	NA	2.9	0.2	0.011		
Cos	31/08/2015	16.25	8	NA	8.9	0.5	26.9	12.1	2.1	0.005	13/09/2016	20	9.9	NA	6.5	1	36.4	11.4	1.3	0.005		
Jovet	09/09/2015	8	NA	5.0	7	0.6	17.4	45.4	2.1	0.007	09/09/2016	8	NA	5.3	7	0.8	16.2	54	0.8	0.007		
Lauzanier	09/09/2015	7	NA	3.7	8.5	0.3	18.3	192.9	NA	NA	20/09/2016	7	NA	2.7	8.4	0.1	8.6	176.2	0.5	NA		
Merlet Supérieur	07/09/2015	25.625	8	NA	8.3	0.4	35.2	164.3	NA	NA	30/09/2016	25	8.1	NA	8.4	0.6	44.7	163.4	NA	NA		
Mont Coua	25/09/2015	4.375	NA	NA	8	0.4	38.1	61.6	NA	NA	19/09/2016	6.63	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
Muzelle	22/09/2015	1.5	NA	NA	7.8	0.2	8	80.7	NA	NA	20/09/2016	18	9.9	NA	8.4	0.7	14.5	82.6	NA	NA		
Noir du Carro	09/09/2015	11	NA	NA	7.3	0.7	49.3	31.9	NA	NA	20/09/2016	11	NA	NA	6.7	0.2	0.4	27.4	NA	NA		
Pétarel	29/09/2015	14.5	NA	NA	6.8	0.4	6.6	15.9	NA	NA	27/09/2016	20	9.2	NA	6.9	0.9	81.9	19.7	NA	NA		
Pisses	01/10/2015	7	NA	NA	8.2	0.1	0.4	78.2	NA	NA	27/09/2016	7	NA	NA	8.6	0.1	1.1	95	NA	NA		
Plan Vianney	23/09/2015	9.25	NA	NA	8.1	0	0.7	78.3	NA	NA	22/09/2016	12	NA	NA	8	0.1	0.5	88.7	NA	NA		
Pormenaz	02/09/2015	9	NA	7.3	6.1	0.6	93.1	21.2	1.6	0.004	13/09/2016	9	1.3	6.6	6.7	0.7	87.2	22.9	1.6	0.009		
Rabuons	15/09/2015	25.125	17	NA	8	1.2	107	40.6	1.3	0.003	19/09/2016	28.75	13.5	NA	7.5	1.5	51.8	42.9	0.8	0.005		

© SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains, Asters, GIS Lacs sentinelles [Données téléchargées de avril 2017 à juin 2017], développé par le dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA

## Annexe 5 : Tableau de données relatives aux analyses biologiques

**S = Richesse**  
**Q = Abondance**  
**H' = Diversité de Shannon**  
**E = Equitabilité de Piélou**  
**Cl maj = Classe majoritaire**

© SOERE OLA-IS, INRA Thonon-les-Bains,  
 Asters, GIS Lacs sentinelles [Données téléchargées  
 de avril 2017 à juin 2017], développé par le  
 dispositif Eco-Informatique ORE de l'INRA

	PHYTOPLANCTON 2015					PHYTOPLANCTON 2016					ZOOPLANCTON 2015					ZOOPLANCTON 2016				
	S	Q	H'	E	Cl maj	S	Q	H'	E	Cl maj	S	Q	H'	E	Cl maj	S	Q	H'	E	Cl maj
Anterne	15	1809	2.79	0.71	Diatomées	17	3848	1.29	0.31	Diatomées	15	528919	0.65	0.17	Rotifères	5	10872	0.93	0.40	Rotifères
Bresses inférieure	7	542	2.01	0.72	Chlorophycées	7	227	1.70	0.61	Chlorophycées	6	10150	0.71	0.28	Copépodes	3	11243	0.99	0.63	Copépodes
Bresses supérieure	3	2469	0.08	0.05	Chlorophycées	5	243	1.20	0.52	Chlorophycées	6	11139	1.01	0.39	Cladocères	2	14426	1.00	1.00	Copépodes
Brévent	7	37783	1.66	0.59	Zygophycées	2	32741	0.03	0.03	Zygophycées	11	2698131	1.30	0.38	Rotifères	8	25608	2.28	0.76	Rotifères
Corne	6	23746	0.46	0.18	Zygophycées	8	26327	1.53	0.51	Zygophycées	8	7572	1.20	0.40	Rotifères	5	1556	0.77	0.33	Rotifères
Cornu	15	777	2.78	0.71	Dinophycées	15	314	2.81	0.72	Dinophycées	11	101383	2.16	0.63	Rotifères	8	1140	1.94	0.65	Copépodes
Cos	9	8137	2.34	0.74	Chlorophycées	8	158030	1.73	0.58	Chlorophycées	5	21786	0.82	0.35	Rotifères	6	49641	0.44	0.17	Rotifères
Jovet	11	4768	2.51	0.73	Diatomées	18	786	2.69	0.64	Chrysophycées	8	936	1.82	0.61	Rotifères	8	86	2.49	0.83	Rotifères
Muzelle	6	316	2.16	0.84	Diatomées	6	1307	1.43	0.55	Diatomées	2	10603	0.00	0.00	Rotifères	NA	NA	NA	NA	NA
Pétarel	9	214	1.10	0.35	Chlorophycées	7	387	1.38	0.49	Chlorophycées	6	549	1.96	0.76	Cladocères	3	6142.2	0.92	0.58	Cladocères
Pisses	10	545	0.45	0.14	Diatomées	6	3131	0.09	0.03	Diatomées	5	627	0.99	0.43	Copépodes	2	1613	0.12	0.12	Copépodes
Plan																				
Vianney	4	1723	1.06	0.53	Diatomées	5	2502	1.04	0.45	Diatomées	6	19391	0.62	0.24	Rotifères	3	1062	0.56	0.35	Copépodes
Pormenaz	14	9246	2.75	0.72	Chlorophycées	14	7272	1.44	0.38	Chrysophycées	14	992872	1.15	0.30	Rotifères	11	392904	0.71	0.21	Rotifères
Rabuons	8	1565	1.57	0.52	Chlorophycées	8	925	1.31	0.44	Chlorophycées	8	8056	1.38	0.46	Rotifères	7	19464	1.07	0.38	Rotifères
valeur min	3	214	0.08	0.05		2	227	0.03	0.03		2	549	0.00	0.00		2	86	0.09	0.04	
valeur Q1	6.25	603	1.07	0.39		6	476	1.24	0.41		6	7693	0.74	0.28		3	1570.25	0.60	0.24	
valeur médiane	8.5	1766	1.83	0.65		8	1307	1.43	0.49		7	10871	1.08	0.38		5	8507.1	0.92	0.39	
valeur Q3	10.75	7295	2.47	0.72		11.5	5560	1.61	0.56		10.25	81484	1.36	0.45		7.75	18204.5	1.05	0.64	
valeur max	15	37783	2.79	0.84		18	158030	2.81	0.72		15	2698131	2.16	0.76		11	392904	2.49	1.00	