

# Suivi de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette

## Campagne 2024

Rédigé par :

**Serena Rasconi** (coordination et phytoplancton)

**Philippe Quetin** (météorologie)

**Viet Tran Khac** (physico-chimie)

**Appui technique** : Jean Christophe HUSTACHE & Pascal PERNEY (Prélèvements)  
Pascal PERNEY & Laura CREPIN (Analyses physico-chimiques)



Référence à citer : RASCONI S., TRAN KHAC V. & QUETIN P. 2025. Suivi de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette. Campagne 2024. UMR CARTEL - INRAE- USMB – Observatoire OLA. 36 pages



Ce suivi a été financé par :



et



## Table des matières

Ce qu'il faut retenir pour 2024 .....	5
1. MATERIEL ET METHODE.....	6
1.1. Objectif .....	6
1.2. Matériel.....	7
1.3. Protocole et méthodologie .....	7
1.3.1 Les paramètres de suivi.....	7
1.3.1.1 Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) et Orthophosphates (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ).....	8
1.3.1.2 Chlorure .....	8
1.3.1.3. Transparence.....	8
1.3.1.4. La Chlorophylle a .....	8
1.3.1.5 Oxygène dissous .....	8
1.3.1.6 Phytoplancton .....	9
1.3.2. Fréquence des campagnes de mesure.....	9
1.3.3. Expression des résultats .....	9
1.3.3.1 Teneurs moyennes en nitrate et orthophosphates.....	9
1.3.3.2 Chlorure .....	10
1.3.3.3 Moyenne annuelle de la transparence .....	10
1.3.3.4 Moyenne annuelle en chlorophylle a dans la couche euphotique .....	10
2. Conditions Climatiques .....	11
2.1. Températures mesurées.....	11
2.1.1. Moyennes Annuelles.....	11
2.1.2. Variations saisonnières .....	12
2.2. Précipitations .....	13
2.2.1. Cumul Annuel.....	13
2.2.2. Variations saisonnières .....	14
2.2.3. Relation entre pluviométrie et le niveau du lac.....	14
2.3. Insolation .....	14
2.3.1. Cumul annuel.....	14
2.3.2. Variation saisonnière .....	16
2.4. En conclusion.....	16
3. CAMPAGNES DE TERRAIN .....	17
4. EVOLUTIONS SAISONNIERES des paramètres physico-chimiques .....	17
4.1 Température et oxygène dissous .....	17
4.2 Transparence.....	20
4.3 Nutriments .....	20
4.3.1 Nitrate .....	20
4.3.2 Phosphore .....	21
4.3.3 Silice .....	22
5. SUIVI LONG TERME PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES .....	23
5.1 Température.....	23
5.2 Oxygène.....	23
5.3 Nutriments .....	24
5.3.1 Nitrate .....	24
5.3.2 Phosphore total .....	25
5.4 Chlorure .....	26
5.5 Transparence.....	26
6. LE PHYTOPLANCTON.....	28
6.1 Evolution saisonnière de l'année 2024 .....	28
6.1.1 Evolution des classes d'algues.....	28
6.1.2 Evolution des espèces dominantes.....	29
6.1.3 Evolution du micro et du nanophytoplancton .....	30
6.2 Evolution interannuelle.....	31
6.2.1 Evolution des classes d'algues.....	31
6.2.2 Evolution de la diversité .....	32
6.2.3 Evolution de l'indice de Brettum .....	33
6.2.4 La chlorophylle a .....	34
8. BIBLIOGRAPHIE .....	36

**Liste des tableaux**

<a href="#">Tableau 1 : Moyennes annuelles des températures de l'air en °C</a> .....	11
<a href="#">Tableau 2 : Nombre de jour où les températures moyennes journalières sont inférieures à 0 °C pour les stations du Bourget et d'Aiguebelette entre 2010 et 2024</a> .....	12
<a href="#">Tableau 3 : Températures moyennes de l'air (°C) en 2024 à Aiguebelette et au Bourget. Moyennes des années 2010-2024 au Bourget</a> .....	12
<a href="#">Tableau 4 : Précipitations annuelles aux stations du Bourget et du lac d'Aiguebelette</a> .....	13
<a href="#">Tableau 5 : Précipitations mensuelles en 2024 à Aiguebelette, précipitations mensuelles en 2024 et moyenne 1991-2020 à la station du Bourget</a> .....	14
<a href="#">Tableau 6 : Insolation annuelle en 2024 et moyenne 1991-2020 à la station du Bourget. Rayonnement global au lac d'Aiguebelette en 2024</a> .....	15
<a href="#">Tableau 7 : Rayonnement global mensuel à Aiguebelette en 2024, insolation mensuelle en 2024 et normale 1991- 2020 à la station du Bourget</a> .....	16
<a href="#">Tableau 8 : Nombre et répartition des campagnes de mesures et de prélèvements pour l'année 2024</a> .....	17

**Liste des figures**

<a href="#">Figure 1 : Situation géographique et bassin versant du lac d'Aiguebelette</a> .....	4
<a href="#">Figure 2 : Moyennes annuelles des températures de l'air (°C) - Stations d'Aiguebelette et du Bourget de 1991 à 2024</a> .....	11
<a href="#">Figure 3 : Températures de l'air (°C) station du Bourget. a) Températures de l'air moyennes, mini, maxi en 2024 (la moyenne 1991-2020 correspond à la ligne en trait interrompu) au Bourget. b) Températures de l'air : comparaison Bourget - Aiguebelette</a> .....	13
<a href="#">Figure 4 : Précipitations annuelles stations du Bourget et d'Aiguebelette</a> .....	13
<a href="#">Figure 5 : Précipitations mensuelles en 2024 station du Bourget et d'Aiguebelette et moyenne 1991- 2020 à la station du Bourget</a> .....	14
<a href="#">Figure 6 : Précipitations journalières, niveau du lac d'Aiguebelette et consigne de niveau en 2024</a> .....	15
<a href="#">Figure 7 : Durée d'insolation (h) au Bourget et rayonnement global (kJ.cm<sup>-2</sup>) à Aiguebelette</a> .....	15
<a href="#">Figure 8 : Comparaison des durées d'insolation mensuelle (h) de la normale 1991-2020 à la station du Bourget et du rayonnement global mensuel à Aiguebelette en 2024</a> .....	16
<a href="#">Figure 9 : Distributions des températures (°C), de la saturation en oxygène dissous (%) en 2024</a> .....	18
<a href="#">Figure 10 : Distributions verticales des températures (°C) et de l'oxygène dissous (mg/L) durant toute l'année 2024</a> .....	19
<a href="#">Figure 11 : Évolution de la transparence (m) en 2024</a> .....	20
<a href="#">Figure 12 : Concentration en nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en 2024 dans l'eau des couches superficielles du lac d'Aiguebelette (2, 10 et 20 m)</a> .....	21
<a href="#">Figure 13 : Concentration en orthophosphate (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) en 2024 dans l'eau des couches superficielles du lac d'Aiguebelette (2, 10 et 20 m)</a> .....	21
<a href="#">Figure 14 : Concentration en orthophosphate (P- PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) en 2024 dans les eaux du fond du lac à 65 m</a> .....	22
<a href="#">Figure 15 : Concentration en silice en 2024 dans les couches superficielles (2, 10 et 20m) et à 65m</a> .....	22
<a href="#">Figure 16 : Évolution des températures moyennes annuelles en °C dans la couche de surface (0-10m) et de fond (60m et 65m) de 1988 à 2024</a> .....	23
<a href="#">Figure 17 : Évolution de la saturation en oxygène (%) de 2014 à 2024</a> .....	24
<a href="#">Figure 18 : Évolution des concentrations moyennes annuelles en nitrate (mgN/L) de 1975 à 2024</a> .....	25
<a href="#">Figure 19 : Évolution de la classe de qualité en fonction des concentrations moyennes pondérées hivernales en phosphore total (µgP/L) de 1988 à 2024</a> .....	26
<a href="#">Figure 20 : Évolution des concentrations moyennes hivernales en chlorure (mg/L) de 1988 à 2024</a> .....	26
<a href="#">Figure 21 : Évolution de la classe de qualité de l'eau en fonction de la transparence moyenne annuelle (m) mesurée avec le disque de Secchi de 1988 à 2024</a> .....	27
<a href="#">Figure 22 : Évolution de la classe de qualité de l'eau en fonction de la transparence minimale annuelle (m) mesurée avec le disque de Secchi de 1988 à 2024</a> .....	27
<a href="#">Figure 23 : Variations saisonnières de la biomasse du phytoplancton par classes algales en 2024</a> .....	28
<a href="#">Figure 24 : Variations saisonnières de la biomasse des principaux taxons du phytoplancton en 2024</a> .....	29
<a href="#">Figure 25 : Variations saisonnières de la biomasse par classes de taille en 2024</a> .....	30
<a href="#">Figure 26 : Evolution interannuelle des principales classes algales (moyenne annuelle des moyennes mensuelles des biomasses)</a> .....	31
<a href="#">Figure 27 : Evolution interannuelle de l'indice de diversité de Shannon</a> .....	32
<a href="#">Figure 28 : Evolution de l'indice de Brettum</a> .....	33
<a href="#">Figure 29 : Evolution de la Chlorophylle a dans le lac d'Aiguebelette. La moyenne annuelle, pondérée par le nombre d'échantillons par mois, est calculée à partir des moyennes mensuelles</a> .....	35

## PRESENTATION ET CARACTERISTIQUES DU LAC D'AIGUEBELETTE

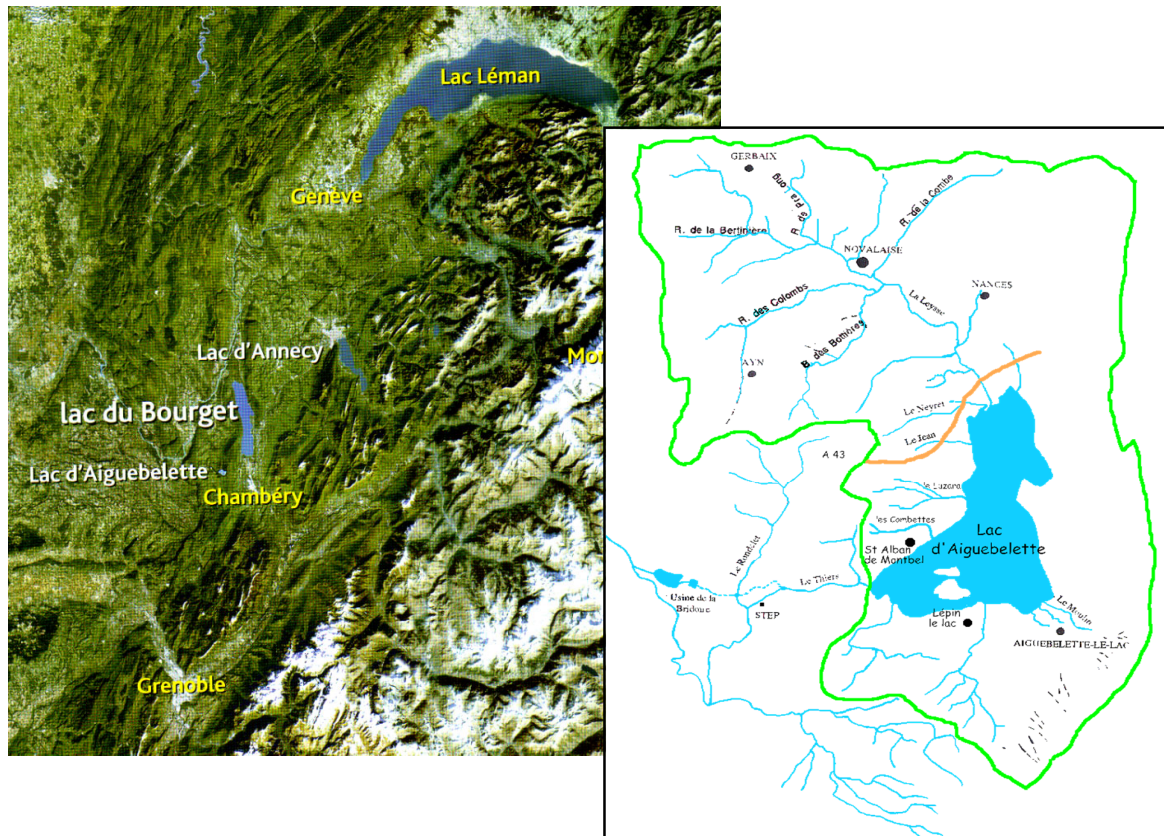


Figure 1 : Situation géographique et bassin versant du lac d'Aiguebelette.

### LAC

Altitude : 374 m  
Longueur maximale : 4 km  
Largeur maximale : 3 km  
Surface : 540 ha  
Volume : 166 millions de m<sup>3</sup>  
Profondeur maximale : 70 m  
Profondeur moyenne : 30,7 m  
Longueur de côte : 14,2 km

### BASSIN VERSANT

Surface totale : 58,9 km<sup>2</sup>  
Altitude moyenne : 750 m  
Affluent principal : la Leysse de Novalaise  
Exutoire : canal du Thiers

### CE QU'IL FAUT RETENIR POUR 2024

Le suivi 2024 de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette (Figure 1) a été réalisé avec le bateau mis à disposition par la CCLA et a été composé de 8 campagnes de prélèvement. Toutes les analyses ont ensuite été réalisées à INRAE, UMR Carrtel (Thonon). Les résultats présentés dans ce rapport s'inscrivent dans la continuité des campagnes précédentes sur l'état trophique de cet écosystème. Le lac d'Aiguebelette a vu son niveau de phosphore total diminuer de 1989 à 2009 pour atteindre la classe de qualité « très bonne ». En 2021 et 2024 le niveau de phosphore total est de nouveau compris en catégorie « verte ».

**Météorologie** : A Aiguebelette, la température en 2024 indique une année similaire à la normale. La pluviométrie est excédentaire de 11,84% par rapport à la moyenne des relevés 2005-2020, l'insolation mesurée est déficitaire de -14,2 %.

**Physico-chimie** : Les conditions météorologiques en 2024 n'ont pas permis le brassage complet de la colonne d'eau lors de l'hiver. Par conséquent, la masse d'eau à partir de 20 m n'est pas suffisamment réoxygénée. La concentration en oxygène du fond en 2024 est de 0,97mg/L, légèrement supérieure par rapport à celle de l'année 2023 qui était de 0,37 mg/L, contre 6,29 mg/L lors du brassage en 2022. La température moyenne de fond est de 5,53°C, en légère augmentation après le brassage complet en 2022 (5,2 °C). La classe de qualité est « bonne » pour le phosphore total en 2024. La transparence des eaux est relativement stable et globalement de bonne qualité depuis 1988. Suite à un déclassement en 2021, la transparence est de nouveau comprise dans la classe bonne depuis 2022.

**Phytoplancton** : L'année 2024 présente une dynamique comparable à celle des années précédentes. Elle est marquée par l'omniprésence de taxons indicateurs de milieux oligotrophes tout au long de l'année. Au printemps, la majorité de la biomasse est constituée principalement des petites diatomées centriques. En été la composition en espèces se diversifie et les valeurs de biomasse et diversité maximales sont atteintes. Le phytoplancton est dominé par la Cryosphyccée *Dinobryon sociale* et la Chlorosphyccée *Planktonema lauterbornii*, très récurrentes dans le lac d'Aiguebelette. Des espèces des petites tailles telles que *Cyclotella costei* et *Plagioselmis lacustris* sont aussi fréquentes. Lorsqu'on considère l'évolution interannuelle, les biomasses phytoplanctoniques sont stables depuis 2009 et les diatomées sont toujours la classe principale. L'indice de Shannon qui mesure la diversité a augmenté par rapport à 2023 (1,18 en 2023 and 1,44 en 2024). L'indice de Brettum, qui mesure le niveau d'eutrophisation du lac en se basant sur la composition en espèces, est stable et indique un niveau trophique du lac méso-oligotrophe.

## 1. MATERIEL ET METHODE

### 1.1. Objectif

La mise en place d'un suivi allégé sur le lac d'Aiguebelette date de 1988 (convention entre le SMALA, le SILB et la DDA de Savoie) avec une méthodologie identique à celle développée sur le lac du Bourget depuis 1981. Cette convention a été reprise depuis 1999 entre la CCLA et le CISALB. Depuis 2016, l'UMR CARTELE (INRAE – USMB) a repris ce suivi allégé avec un rythme de prélèvements moins soutenu, lié principalement à des contraintes en personnel. Ce suivi permet d'intégrer le lac d'Aiguebelette dans l'Observatoire OLA qui regroupe ainsi les données historiques de suivi sur les grands lacs alpins français dans un système d'information (SI) : <https://si-ola.inra.fr/>

L'objectif du suivi allégé est de décrire l'évolution trophique du lac d'Aiguebelette tout en permettant de :

- Apporter aux collectivités locales, maîtres d'ouvrage des principaux travaux d'assainissement, les éléments pour juger de leur efficacité vis-à-vis du maintien, voire de l'amélioration de la qualité des eaux du lac.
- Constituer un outil d'aide à la prise de décision permettant de réagir aux premiers signes de dégradation.
- Être intégré dans une base de données utilisable dans le cadre d'études scientifiques plus amples. L'intégration du lac d'Aiguebelette dans l'Observatoire OLA et dans son SI est un élément important dans la possibilité d'aborder dans le futur des approches scientifiques intégratives et de comparaison.

Ce suivi est réalisé par l'UMR CARTELE, laboratoire INRAE de Thonon les Bains en association avec l'Université de Savoie Mont Blanc, pour le compte de la Communauté de Communes du Lac d'Aiguebelette et répond aux termes de la convention signée entre la CCLA et le CARTELE.

Le lac d'Aiguebelette est un site qui a été relativement préservé vis-à-vis du processus d'eutrophisation, il convient de suivre son évolution compte tenu de l'augmentation des concentrations en phosphore total observée entre le milieu des années 1970 (mesures SRAE réalisées en 1975 et 1976), la fin des années 80 et la période contemporaine.

Le niveau trophique défini par les études antérieures place le site dans une situation à surveiller. Une augmentation des apports en phosphore pourrait ramener le lac à un niveau méso-eutrophe, incompatible avec les objectifs du contrat. La maîtrise des sources de phosphore constitue donc l'élément déterminant du respect des objectifs de qualité des eaux.

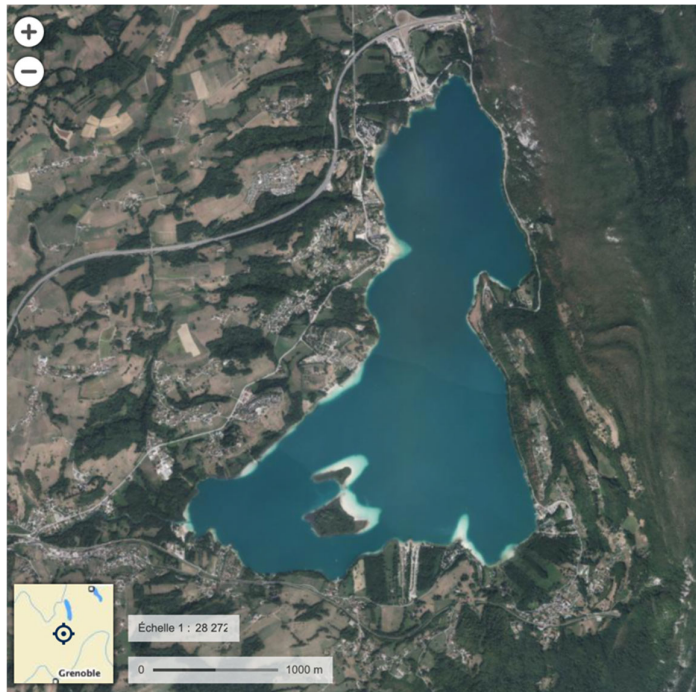
Le suivi allégé a pour but, à travers des paramètres correctement choisis, de suivre qualitativement le sens d'évolution de l'état trophique du lac. Il permet en particulier d'apprécier l'impact des actions de protection et de restauration du milieu au regard de la qualité des eaux.

## 1.2. Matériel

- Disque de SECCHI (à quadrant noir et blanc de 20 cm de diamètre)
- Une bouteille d'échantillonnage intégré, Integrated Water Sampler ou IWS, utilisé aussi sur les autres lacs de l'observatoire
- Une bouteille de prélèvement de type NISKIN
- Une sonde multiparamètres possédant les capteurs suivants : pression, température, oxygène, pH, conductivité turbidité, chlorophylle *a* et PAR (radiation photosynthétiquement active)

## 1.3. Protocole et méthodologie

La méthode consiste à collecter, à la verticale de la profondeur maximale du lac, les données de descripteurs caractéristiques de son état trophique (point A(bis) : N 45°33'8,5'' – E 5°48'20,4'' ; environ 65 mètres de profondeur).



Source : IGN

Les paramètres mesurés et les profondeurs d'échantillonnage ont été définis à partir d'études menées sur le lac du Bourget de 1972 à 1981 (CEMAGREF, 1982). Ce protocole est appliqué au lac d'Aiguebelette depuis 1988. En 2016, le suivi ayant été repris par INRAE, les fréquences d'échantillonnages ont été modifiées.

### 1.3.1 Les paramètres de suivi

La caractéristique essentielle du suivi allégé est la continuité temporelle. Le nombre des descripteurs doit donc être réduit à ceux qui sont représentatifs du phénomène étudié afin de limiter le coût de l'étude. Les descripteurs retenus pour le suivi allégé du lac d'Aiguebelette sont :

- Le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), les orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) et le phosphore total (Ptot)
- Le chlorure
- La transparence
- La chlorophylle *a*
- L'oxygène dissous et la température
- Le phytoplancton (analyse quantitative et taxonomique)

### 1.3.1.1 Nitrate ( $NO_3^-$ ) et Orthophosphates ( $PO_4^{3-}$ )

**Principe** : L'azote et le phosphore sont considérés comme les aliments de base de l'eutrophisation dont ils sont la cause. Ces éléments existent sous diverses formes ; minérales ou organiques, dissoutes ou particulaires. Les nitrates ( $NO_3^-$ ) et les orthophosphates ( $PO_4^{3-}$ ) constituent les formes minérales solubles directement assimilables par les producteurs primaires.

**Méthode** : Les échantillons sont prélevés à 5 profondeurs (2, 15, 40, 60 et 65 m) à l'aide d'une bouteille de prélèvement type NISKIN. La partie analytique a été assurée depuis 1991 par SAVOIE labo selon les normes NFT 90-012 et NFT 90-023, puis par le LCME (Université de Savoie) pour le phosphore total depuis 2006 et enfin par INRAE depuis 2016.

### 1.3.1.2 Chlorure

**Principe** : Bien que ne participant pas directement au processus d'eutrophisation, ce paramètre supplémentaire se justifie en raison de la proximité de l'Autoroute A43 (Chambéry - Lyon), qui traverse le bassin versant du lac d'Ouest en Est sur 3750 mètres. Son évolution est liée au stockage et à l'utilisation de sel de déneigement par les services d'entretien sur les secteurs de route et d'autoroute qui traversent le bassin versant.

**Méthode** : Les prélèvements sont effectués sur les mêmes profondeurs que les échantillonnages d'azote et de phosphore. Les analyses normalisées (NF EN ISO 10304-1) sont réalisées par INRAE.

### 1.3.1.3. Transparence

**Principe** : Elle est fonction de la quantité de matières en suspension dans l'eau, c'est-à-dire de la biomasse phytoplanctonique et également de matières minérales et organiques. Pour le grand public c'est le paramètre le plus représentatif de la qualité des eaux d'un plan d'eau.

**Méthode** : Elle s'exprime par la profondeur en mètres au-delà de laquelle un disque à quadrant noir et blanc de 20 cm de diamètre (disque de Secchi), immergé dans le lac, n'est plus visible à l'œil nu.

### 1.3.1.4. La Chlorophylle a

**Principe** : Pour des raisons pratiques, il a été convenu de doser la concentration en chlorophylle pour mesurer la biomasse du phytoplancton. Ce dosage constitue le volet biologique du suivi allégé.

**Méthode** : On prélève un échantillon moyen sur toute l'épaisseur de la couche euphotique (18 m), à l'aide d'une bouteille à prélèvement intégré IWS. Les échantillons sont ensuite filtrés. Le dosage de la chlorophylle est réalisé par INRAE à Thonon suivant la méthode normalisée Scor-Unesco.

### 1.3.1.5 Oxygène dissous

**Principe** : L'activité photosynthétique des algues enrichit les couches supérieures de l'eau en oxygène et entraîne ainsi une sursaturation ; dans les couches inférieures où la lumière ne pénètre plus, la respiration des micro-organismes et la minéralisation de la matière organique diminuent le taux d'oxygène et provoquent une sous-saturation.

**Méthode** : un profil de concentration en oxygène dissous (en mg/L et en % de saturation) est réalisé à la verticale de la profondeur maximale du lac à l'aide d'une sonde multiparamètres. Les indices annuels sont calculés aux trois niveaux de mesure prédéfinis. Ils représentent les moyennes pondérées des sursaturations à 2 m, au métalimnion et de la sous saturation à 60 m.

### 1.3.1.6 Phytoplancton

Le phytoplancton a été récolté au cours des campagnes de prélèvement dans la couche 0-18 m à l'aide d'une cloche intégratrice d'eau brute (Cloche IWS). Après récolte, les échantillons d'eau ont été fixés avec du Lugol, réactif iodo-ioduré qui assure la conservation du phytoplancton et alourdit les cellules, rendant ainsi leur sédimentation plus facile. Il colore également l'amidon des cellules, ce qui rend leur identification plus aisée. Les échantillons d'eau brute fixés ont été préparés selon la technique d'Utermöhl, méthode normalisée au niveau français et européen (Norme NF EN 15204, Afnor 2006). Un sous-échantillon de 25 ml est versé dans un cylindre surmontant une chambre de sédimentation et laissé sédimenter pendant 12 à 24 heures à l'abri de la lumière (le Lugol se dégrade à la lumière et perd son effet conservateur) et de la chaleur. Ce laps de temps permet aux algues, même les plus légères, de sédimenter au fond de la cuvette. Puis on glisse la partie cylindrique sur le côté de la chambre pour la remplacer par une lamelle de couverture en verre. Enfin, la lame est déposée sur un microscope inversé afin de procéder à l'examen qualitatif et quantitatif du phytoplancton. Les protocoles d'analyses sont décrits avec plus de précision dans le document rassemblant les modes opératoires d'analyse du phytoplancton d'INRAE (Druart & Rimet 2008). L'identification microscopique des organismes phytoplanctoniques se fait sur plusieurs critères morphologiques dont la taille, la présence ou l'absence de flagelles et leur nombre, l'organisation cellulaire (filaments, colonies, individus) et le type de membrane externe (cellulosique, siliceuse, peptidoglycanique...). Les abondances sont exprimées en nombre de cellules ou de colonies par millilitre d'eau brute puis transformées en biomasse ( $\mu\text{g/L}$ ) en considérant que la densité des algues est la même que celle de l'eau.

### 1.3.2. Fréquence des campagnes de mesure

Les rythmes d'évolution des phénomènes lacustres annuels justifient que les fréquences de campagnes soient réparties au cours des différentes saisons afin d'appréhender tous les états de l'écosystème.

### 1.3.3. Expression des résultats

Rappel des indices retenus pour suivre l'évolution trophique du lac d'Aiguebelette selon la méthode du suivi allégé (CEMAGREF 1981).

- Teneur en fertilisants : les nitrates en  $\text{mgN/L}$ , le phosphore total et les orthophosphates en  $\text{mgP/L}$ ,
- Teneur en chlorures en  $\text{mgCl/L}$ ,
- Transparence moyenne annuelle en mètres,
- Concentration moyenne annuelle en chlorophylle *a* en  $\mu\text{g chl}a/\text{L}$ ,
- Sursaturation en oxygène à 2 mètres en  $\text{mgO}_2/\text{L}$ ,
- Sursaturation maximale en oxygène dans le métalimnion en  $\text{mgO}_2/\text{L}$ ,
- Sous-saturation en oxygène à 60 mètres en  $\text{mgO}_2/\text{L}$ .

#### 1.3.3.1 Teneurs moyennes en nitrate et orthophosphates

Ces indices représentent les réserves maximales du lac en nutriments lorsque la consommation est minimale et l'homothermie presque totale. Les moyennes retenues sont les moyennes arithmétiques des concentrations mesurées à 2, 15, 40, 60 et 65 mètres.

### *1.3.3.2 Chlorure*

L'indice annuel retenu est la moyenne arithmétique des concentrations mesurées à 2, 15, 40, 60 et 65 mètres en hiver (janvier-mars).

### *1.3.3.3 Moyenne annuelle de la transparence*

La valeur annuelle retenue est la moyenne des mesures pondérées par l'écart entre les campagnes.

### *1.3.3.4 Moyenne annuelle en chlorophylle a dans la couche euphotique*

L'indice annuel est la moyenne des mesures pondérées par l'écart entre les campagnes.

## 2. CONDITIONS CLIMATIQUES

La météorologie est l'un des facteurs de contrôle des transferts du bassin versant au lac et de la biologie du lac. L'analyse des données météorologiques est utile pour situer les caractéristiques des années étudiées par rapport aux données historiques. Les données proviennent du site InfoClimat (<http://www.infoclimat.fr>), station de Chambéry/Aix les Bains, située à proximité du lac du Bourget (45°38'0 N, 05°53'1 E, altitude 235 m) et de la station lac d'Aiguebelette (45°34'0 N, 5°47'8 E, altitude 375 m) appartenant à la CCLA et gérée par le centre départemental de Savoie de Météo France depuis 2004.

Compte tenu de la proximité des deux plans d'eau, nous utilisons les informations de la station de Chambéry car les chroniques de données sont plus longues et les tendances d'évolution générales sont semblables (Paolini, 2016).

### 2.1. Températures mesurées

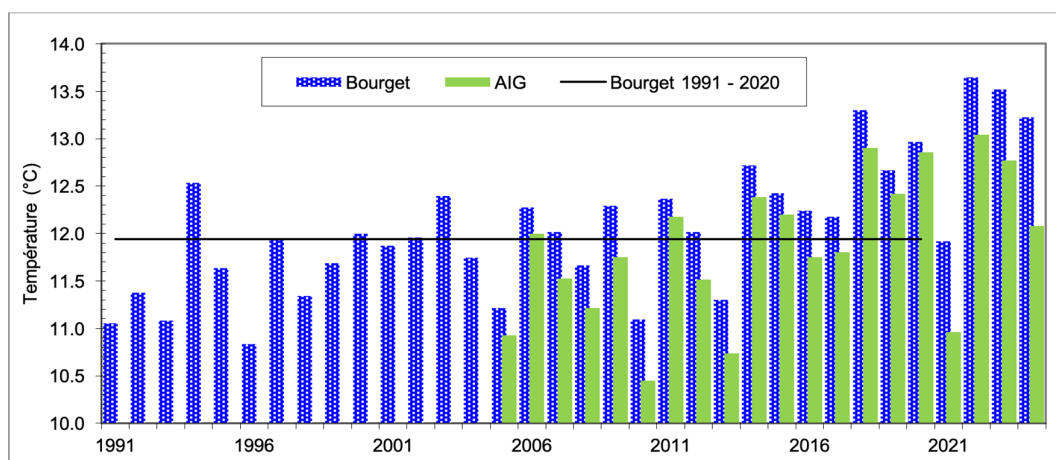
#### 2.1.1. Moyennes Annuelles

A la station météorologique du Bourget, en 2024 la température moyenne est la quatrième plus chaude jamais mesurée depuis 1974 (date de début de la base de données météo). Elle est inférieure de 0,41 °C par rapport à celle de 2022 (13,64 °C, la plus chaude) mais est supérieure de 1,3 °C par rapport à la normale 1991-2020 (Tableau 1 et Figure 2).

La température moyenne annuelle à la station d'Aiguebelette est comme depuis le début des relevés (2005) inférieure à celle du Bourget (12,08 °C vs 13,23 °C), l'écart entre les deux stations est de 1,15°C cette année (c'est le plus grand observé). La température moyenne annuelle d'Aiguebelette est-elle la neuvième (sur 20 ans) la plus chaude jamais mesurée (1 ère : 2022) (Tableau 1 et Figure 2).

**Tableau 1 : Moyennes annuelles des températures de l'air en °C**

	2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	Normale 1991-2020
Bourget	13,23	13,52	13,64	11,9	13,0	12,7	13,3	12,2	12,2	12,4	12,7	<b>11,94</b>
Aiguebelette	12,08	12,77	13,04	10,96	12,9	12,4	12,9	11,8	11,75	12,2	12,4	



**Figure 2 : Moyennes annuelles des températures de l'air (°C) - Stations d'Aiguebelette et du Bourget de 1991 à 2024.**

### 2.1.2. Variations saisonnières

Les données relevées à la station du Bourget montrent que l'on a eu un hiver 2023-2024 encore très doux (nombre de jours de gel : 0 dénombrés (tableau 2) et avec une moyenne sur les mois d'hiver (décembre, janvier, février) la plus haute jamais mesurée (6,3 °C). A part le mois de mai, les températures furent toutes supérieures aux normales (tableau 3), mais avec des écarts par rapport à cette normale moins important que sur les deux dernières années (1,3 °C vs 1,7 et 1,6 °C) (Tableau 3).

**Tableau 2 : Nombre de jour où les températures moyennes journalières sont inférieures à 0 °C pour les stations du Bourget et d'Aiguebelette entre 2010 et 2024.**

	Bourget	Aiguebelette
2010 - 2011	23	41
2011 - 2012	19	22
2012 - 2013	18	31
2013 - 2014	8	3
2014 - 2015	2	10
2015 - 2016	1	1
2016 - 2017	22	25
2017 - 2018	7	12
2018 - 2019	7	10
2019 - 2020	0	0
2020 - 2021	5	14
2021 - 2022	11	17
2022 - 2023	6	10
<b>2023 - 2024</b>	<b>0</b>	<b>7</b>

**Tableau 3 : Températures moyennes de l'air (°C) en 2024. Station d'Aiguebelette et du Bourget et moyennes des années 1991 – 2020.**

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Aiguebelette</b>	3,8	6,9	9,3	10,9	14,4	18,6	21,3	22,0	15,2	13,6	7,2	2,0
<b>Bourget</b>	4,9	7,7	10,1	11,6	15,6	19,7	22,3	23,5	16,9	14,6	8,2	3,6
<b>Bourget 1991-2020</b>	2,9	4,1	8,0	11,5	15,7	19,4	21,4	20,9	16,8	12,3	6,9	3,5

Au niveau des températures de l'air les deux stations suivent les mêmes cinétiques (Figure 3).

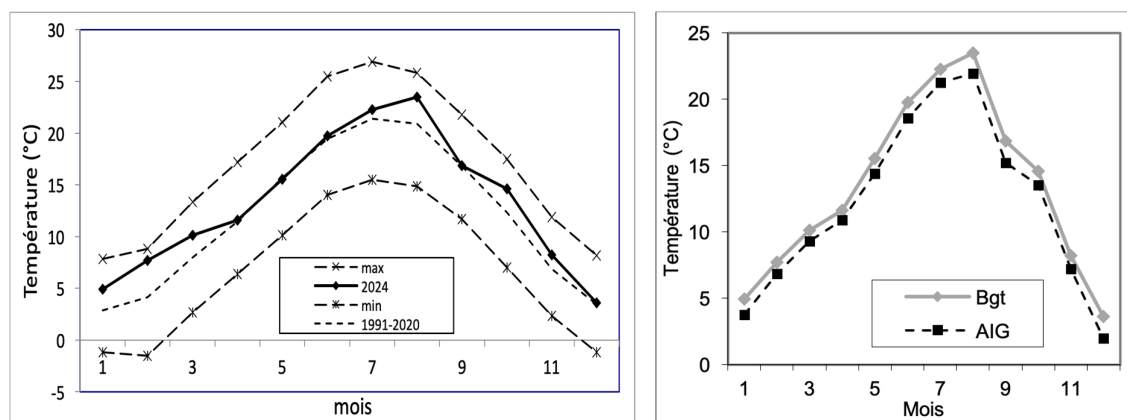


Figure 3 : Températures de l’air (°C) station du Bourget. a) Températures de l’air moyennes, mini, maxi en 2024 (la moyenne 1991-2020 correspond à la ligne en trait interrompu) au Bourget. b) Températures de l’air : comparaison Bourget - Aiguebelette.

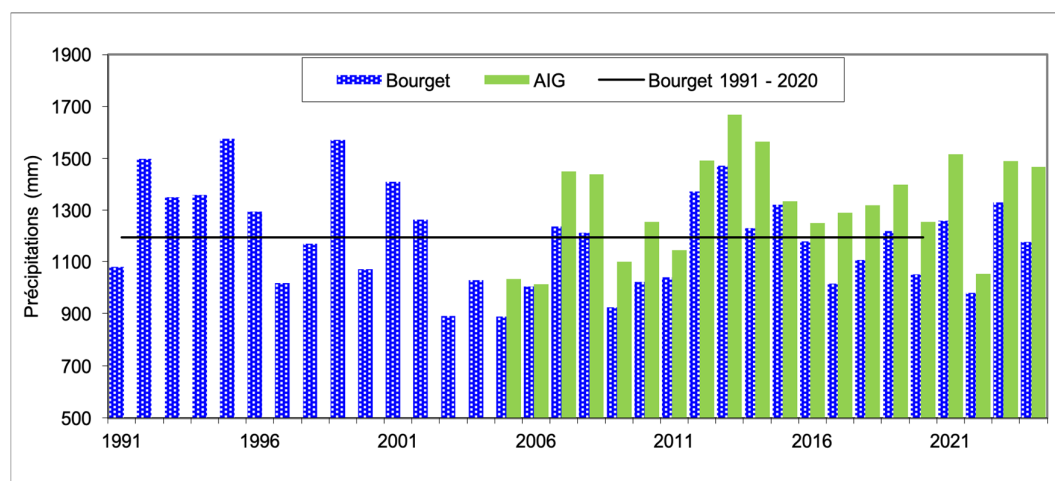
## 2.2. Précipitations

### 2.2.1. Cumul Annuel

Pour 2024, au Bourget le cumul pluviométrique (1179 mm) est déficitaire de 1,4 % par rapport à la normale 1991-2020 (1195,6 mm). Par contre à Aiguebelette, la pluviométrie de 2024 est-elle en excédent de 11,84 % à la moyenne de la période 2005- 2020 (1312 mm) (Tableau 4 et Figure 4).

Tableau 4 : Précipitations annuelles aux stations du Bourget et du lac d’Aiguebelette

		2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	Normale 1991-2020
Bourget	mm	<b>1179</b>	<b>1331</b>	980	1259	1050	1220	1106	1015	1179	1322	<b>1195,6</b>
Aiguebelette	mm	<b>1467</b>	<b>1490</b>	1051	1516	1254	1398	1320	1291	1250	1334	
Nombre de jour de pluie	jour	<b>170</b>	<b>156</b>	131	152	126	140	150	127	140	127	
Hauteur de pluie moyenne	mm/j	<b>8,9</b>	<b>9,4</b>	7,7	9,8	9,5	10,6	8,6	9,8	9,1	10,8	



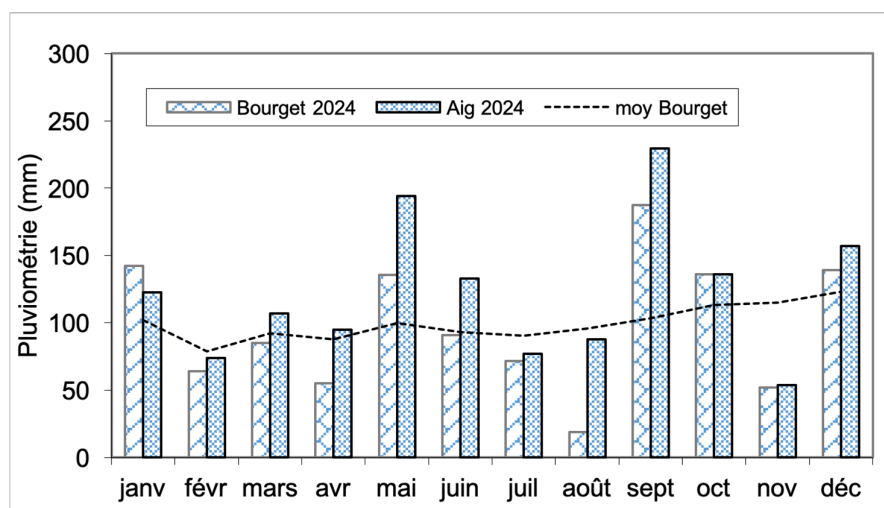
**Figure 4 : Précipitations annuelles stations du Bourget et d'Aiguebelette**

### 2.2.2. Variations saisonnières

Au Bourget, le mois de janvier fut dans la suite du dernier trimestre 2023 (605 mm) excédentaire. Puis il y eut un trimestre où la pluviométrie fut déficitaire. Après un mois de mai pluvieux, le trimestre suivant fut aussi déficitaire. Après les mois de septembre et octobre excédentaires, le mois de novembre fut sec (Tableau 5 et Figure 5).

**Tableau 5 : Précipitations mensuelles en 2024 – station du Bourget et d'Aiguebelette et moyenne 1991- 2020 à la station du Bourget.**

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Aiguebelette</b>	123	74	107	95	194	133	77	88	229	136	54	157
<b>Bourget</b>	143	64	85	55	136	91	72	19	187	136	52	139
<b>Bourget 1991-2020</b>	102	79	92	88	100	93	90	96	103	113	115	123



**Figure 5 :**  
Précipitations mensuelles en 2024, station du Bourget et d'Aiguebelette. Moyenne 1991- 2020 à la station du Bourget.

### 2.2.3. Relation entre pluviométrie et le niveau du lac

La côte du lac est déterminée par la pluviométrie, les apports des affluents et les consignes de niveau gérées par EDF au niveau du canal de Thiers. Sur la figure 6, nous constatons que les consignes sont globalement respectées. Le lac atteint sa côte maximale de 374,18 m, le 8 Janvier ; sa côte minimale de 373,28 m, les 27 et 28 Octobre. L'amplitude maximale relevée en 2024 entre les deux extrêmes est de 0,90 m.

## 2.3. Insolation

Les deux stations météorologiques mesurent deux paramètres différents pour l'insolation : durée d'insolation journalière (heure) pour la station du Bourget et Rayonnement Global (J.cm-2) à Aiguebelette.

### 2.3.1. Cumul annuel

A la station du Bourget, l'année 2024 l'insolation mesurée déficitaire (-14.2 %) par rapport à la moyenne 1991-2020. A Aiguebelette, le rayonnement est lui aussi déficitaire de 2,2 % par rapport à la moyenne 2005-2020 (Tableau 6 et Figure 7).

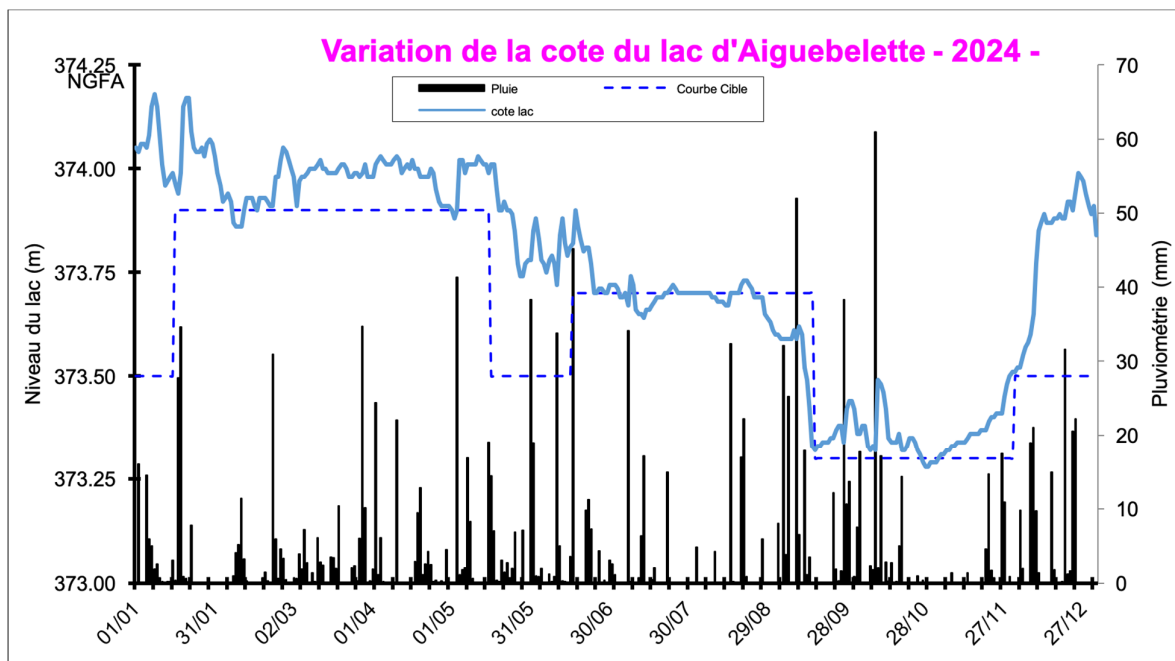


Figure 6 : Précipitations journalières, niveau du lac d'Aiguebelette et consigne de niveau en 2024.

Tableau 6 : Insolation annuelle en 2024 et moyenne 1991-2020 à la station du Bourget. Rayonnement global au lac d'Aiguebelette en 2024.

		2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	Moyenne 1991-2020
Bourget	(h)	1618	1887	2210	1827	2032	2013	1976	2010	1816	2005	<b>1885</b>
Aiguebelette	(kJ.cm <sup>-2</sup> )	429	475	521	432	439	444	416	444	379	423	

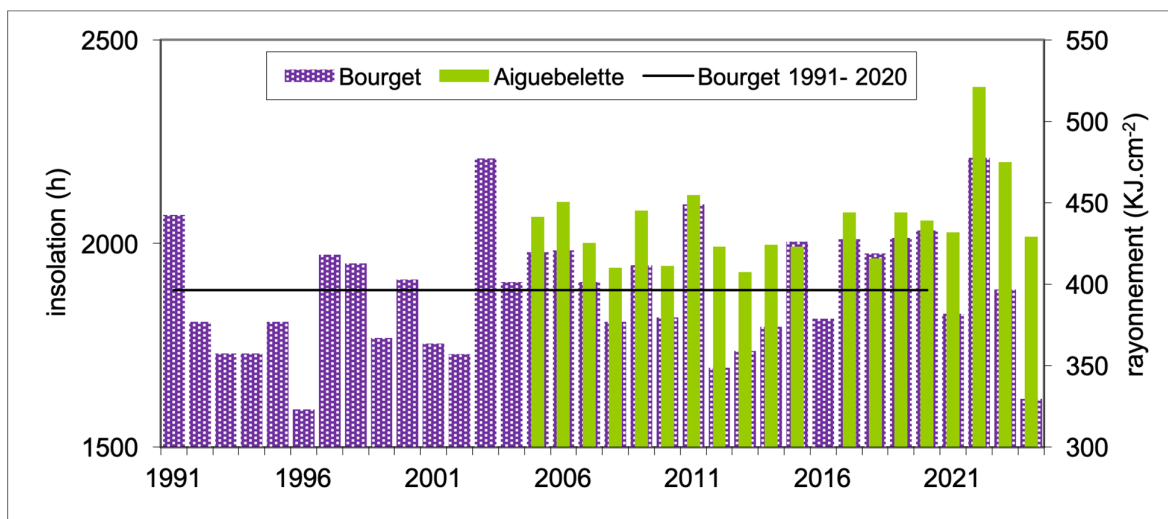


Figure 7 : Durée d'insolation (h) au Bourget et rayonnement global (kJ.cm-2) à Aiguebelette.

## 2.3.2. Variation saisonnière

Au Bourget, à part les mois de janvier, juillet, août et novembre où l'insolation fut excédentaire, tout le reste de l'année fut en déficit (Tableau 7 et Figure 8).

Tableau 7 : Rayonnement global mensuel à Aiguebelette en 2024, insolation mensuelle en 2024 et normale 1991- 2020 à la station du Bourget.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Aig (kJ.cm<sup>-2</sup>)</b>	13,1	19,9	34,2	45,0	50,9	51,7	67,1	61,0	34,1	23,6	16,7	11,4
<b>Bourget (h)</b>	77	84	112	128	139	172	269	258	121	95	100	64
<b>Bourget 1991-2020</b>	76	102	158	176	202	236	262	238	181	121	74	66

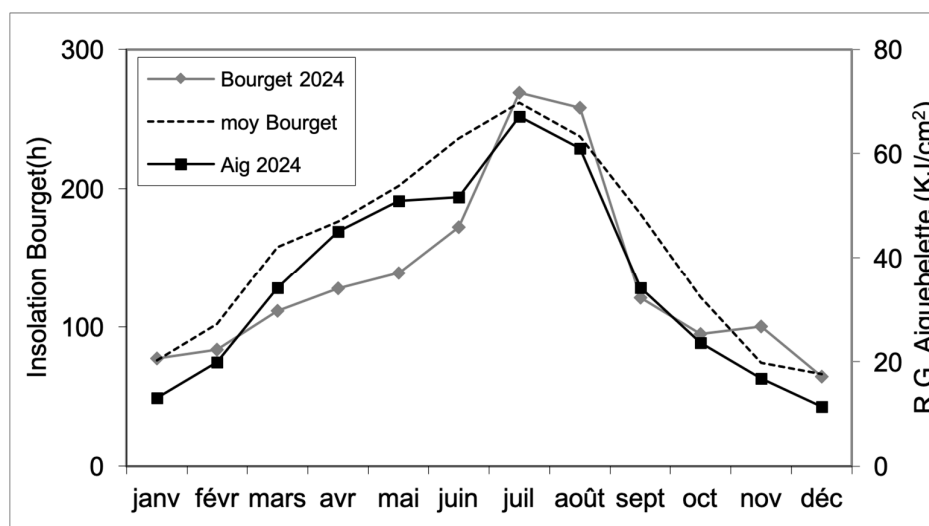


Figure 8 : Comparaison des durées d'insolation mensuelle (h) de la normale 1991-2020 à la station du Bourget et du rayonnement global mensuel à Aiguebelette en 2024.

## 2.4. En

## conclusion

Bien qu'à Chambéry l'année 2024 en température peut être qualifiée de chaude (4e sur la série), celle pour Aiguebelette est dans la moyenne des relevés de la station.

Pour la pluviométrie, avec un cumul de 23 mm inférieur à celui de 2023, l'année 2024 est excédentaire de 11,8% par rapport la moyenne (2005-2020) des relevés effectués.

Pour l'insolation à Chambéry, l'année 2024 est déficitaire (-14,2%) par rapport à la moyenne 1991-2020, le rayonnement à Aiguebelette est lui déficitaire de 2,2 %.

### 3. CAMPAGNES DE TERRAIN

La répartition des dates des 8 campagnes effectuées au cours de l'année 2024 est précisée dans le tableau ci-dessous (Tableau 8).

**Tableau 8 : Nombre et répartition des campagnes de mesures et de prélèvements pour l'année 2024.**

NUMERO	DATE
1	31/01/2024
2	12/03/2024
3	17/04/2024
4	04/06/2024
5	09/07/2024
6	08/08/2024
7	16/10/2024
8	04/12/2024

---

### 4. EVOLUTIONS SAISONNIERES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

#### 4.1 *Température et oxygène dissous*

La température est un des facteurs de forçage principaux de l'évolution des écosystèmes aquatiques au cours d'une année. L'oxygène dissous dans l'eau résulte d'un ensemble de réactions d'oxydoréduction et de processus de diffusion et de mélange. En ce qui concerne les réactions d'oxydo-réduction une situation de déséquilibre est entretenue par deux types d'activité : d'une part, l'activité photosynthétique dans la zone euphotique qui, en piégeant l'énergie lumineuse pour la convertir en énergie chimique, produit de la matière organique et libère de l'oxygène ; d'autre part l'activité respiratoire et minéralisatrice qui consomme de l'oxygène.

Les évolutions saisonnières des principaux paramètres physico-chimiques température et oxygène dissous mesurés in situ sont représentées dans la figure 9.

Ils permettent de mettre en évidence :

- La mise en place progressive de la stratification thermique dans les couches supérieures d'avril à novembre et une température homogène froide dans les couches profondes ;
- Le brassage hivernal partiel de la colonne d'eau en 2024. La profondeur du brassage est observée à 23m le 31 janvier 2024. Cette valeur est faible et du même ordre de grandeur que l'année 2023.
- L'activité photosynthétique dans les couches supérieures d'avril à octobre avec la production d'oxygène et la consommation des éléments dissous, l'activité microbienne dans la zone profonde d'août à décembre avec la consommation d'oxygène dissous.

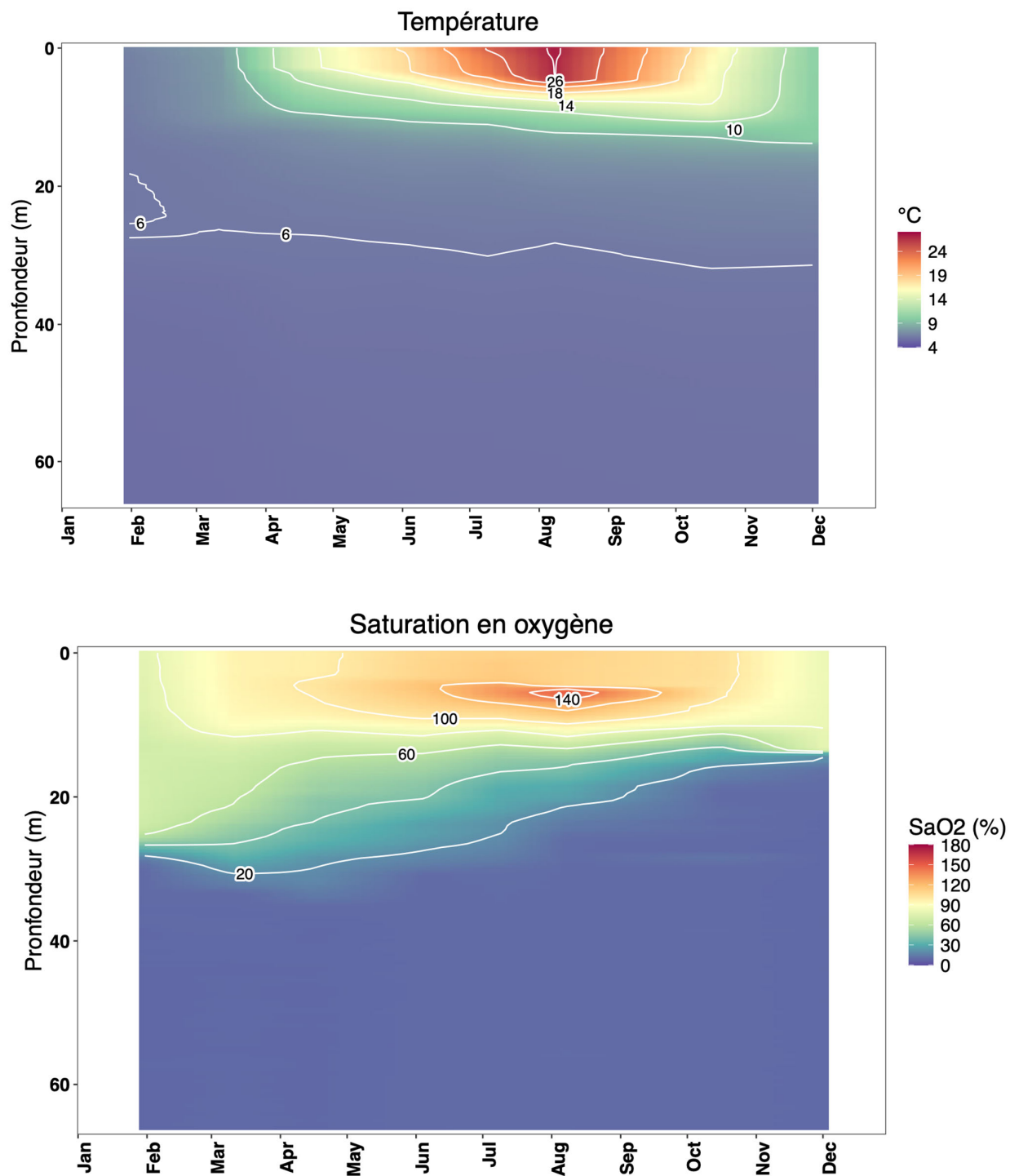
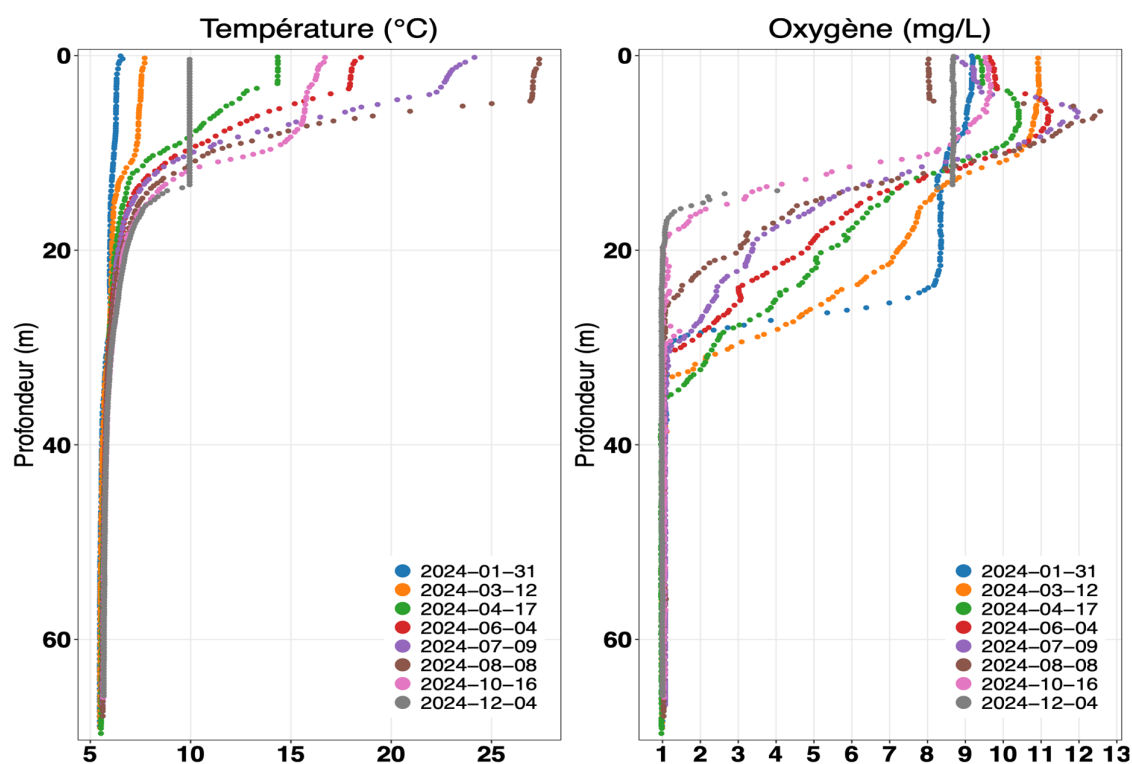


Figure 9 : Distributions des températures (°C), de la saturation en oxygène dissous (%) en 2024.



**Figure 10 : Distributions verticales des températures (°C) et de l'oxygène dissous (mg/L) durant toute l'année 2024.**

Dans un contexte où 2024 constitue l'année la plus chaude jamais observée à l'échelle globale (Copernicus Climate Change Service), elle n'apparaît qu'au quatrième rang des températures locales mesurées autour du Léman depuis 1974 (cf chapitre météo). Les profils de température et de l'oxygène dissous de toute l'année 2024 sont présentés dans la figure 10.

Ces conditions météorologiques n'ont pas permis le brassage complet de la colonne d'eau lors de l'hiver. Par conséquent, la couche d'eau comprise entre 20 m et 30 m demeure insuffisamment réoxygénée, tandis que les eaux situées au-delà de 30 m restent presque privées de toute réoxygénation. La concentration en oxygène au fond est de 0,97 mg/L contre 6,29 mg/L lors du brassage en 2022. La concentration en oxygène du fond en 2024 est légèrement supérieure que celle de l'année 2023 qui est de 0,37 mg/L (Figure 10).

Par la suite, la stratification thermique commence à se mettre en place compte tenu des conditions climatiques (notamment le réchauffement de l'air et l'augmentation de l'insolation) favorables au démarrage de la production phytoplanctonique dès le début du printemps.

La stratification estivale est maximale le 08 août 2024 avec une différence de température entre la surface et le fond de 21,85 °C (27,38 °C – 5,53 °C). La barrière thermique qui bloque les échanges verticaux et isole l'hypolimnion est maximale à cette date. Quant à l'oxygène, la masse d'eau de surface est en sursaturation avec une valeur maximale de 14,62 mg/L.

Le refroidissement automnal entraîne un enfoncement de la thermocline et la disparition du maximum d'oxygène associé à une homogénéisation progressive de l'épilimnion à partir de la surface pour atteindre 13 mètres d'épaisseur au

mois de décembre 2024. Dans l'hypolimnion, la concentration en oxygène reste faible avec 1,00 mg/L, soit inférieur à 10 % de saturation durant toute l'année 2024 (Figure 10).

## 4.2 Transparence

La transparence dépend de la coloration de l'eau et des quantités de matières en suspension qu'elles soient d'origine allochtones (lessivage des sols) ou autochtones (calcite autogène et phytoplancton). Au milieu du lac, éloigné des sources d'eaux turbides ou de remise en suspension des sédiments qui peuvent occasionnellement se produire dans les zones côtières ou être amené par les affluents, les matières en suspension rencontrées sont très couramment d'origine autochtone et la transparence est généralement déterminée par l'abondance du phytoplancton (Figure 11).

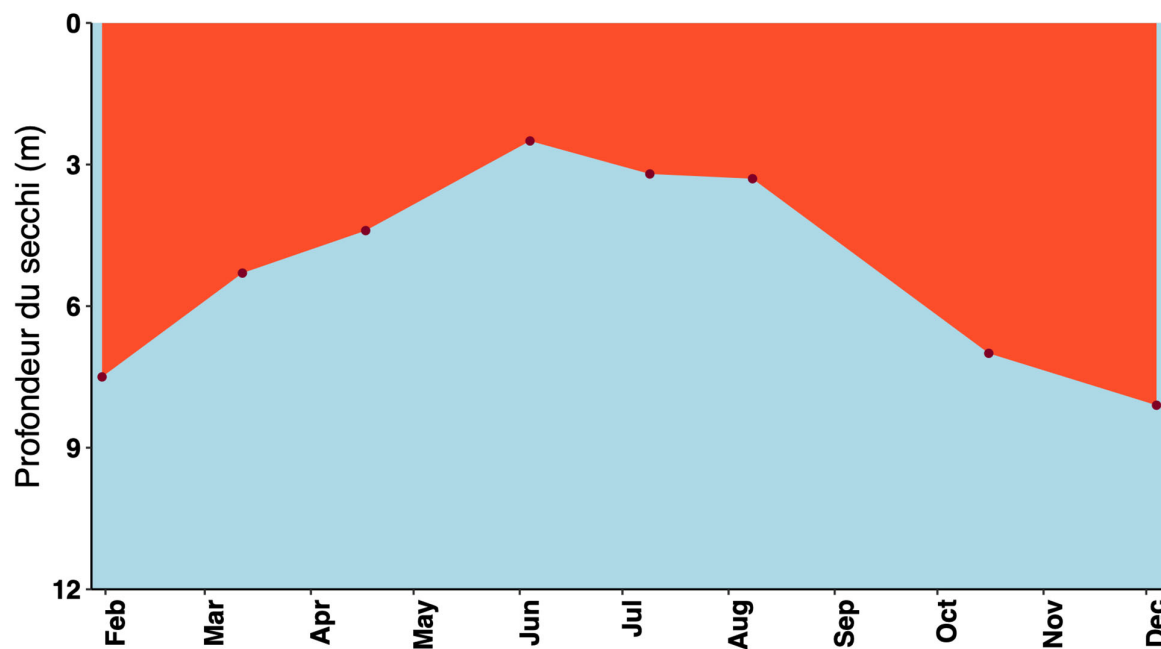


Figure 11 : Évolution de la transparence (m) en 2024.

En janvier, les activités biologiques sont faibles. De ce fait, la transparence en janvier est de 7,5 m. Elle continue à diminuer progressivement jusqu'au mois de juin et atteint une valeur minimale de 2,5 m en juin dû à l'accroissement des activités biologiques. Le niveau de clarté reste similaire pour les mois d'été, suggérant une baisse de l'activité du broutage du zooplancton vis-à-vis le phytoplancton. À l'automne, la transparence augmente de nouveau avec la baisse de la biomasse et le début de la déstratification, pour culminer à 8,1 m en décembre 2024 (Figure 11).

## 4.3 Nutriments

### 4.3.1 Nitrate

La concentration en nitrate à 2 m décroît régulièrement pour atteindre son minimum en août 2024, tandis qu'à 10 m et 20 m elle ne baisse que faiblement jusqu'à la même période (Figure 12). Ce déclin s'explique par l'intensification de la

consommation par le phytoplancton à partir de la fin de l'hiver et début du printemps. La valeur la plus basse est observée à 2 m (0,37 mg N/L le 8 août 2024), avant de remonter à 0,51 mg N/L le 3 décembre 2024

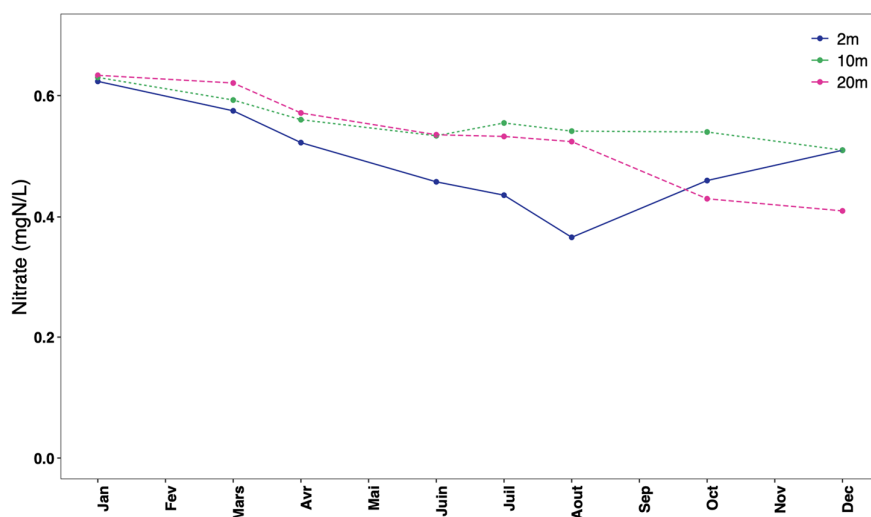


Figure 12 : Concentration en nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en 2024 dans l'eau des couches superficielles du lac d'Aiguebelette (2, 10 et 20 m).

#### 4.3.2 Phosphore

Le phosphore est présent sous différentes formes dans le lac. Le phosphore réactif soluble (orthophosphate) sous forme dissoute, ainsi que le phosphore total, comprenant le phosphore dissous et particulaire, sont analysés. Le lac d'Aiguebelette est caractérisé par des concentrations faibles en orthophosphate (Figure 13).

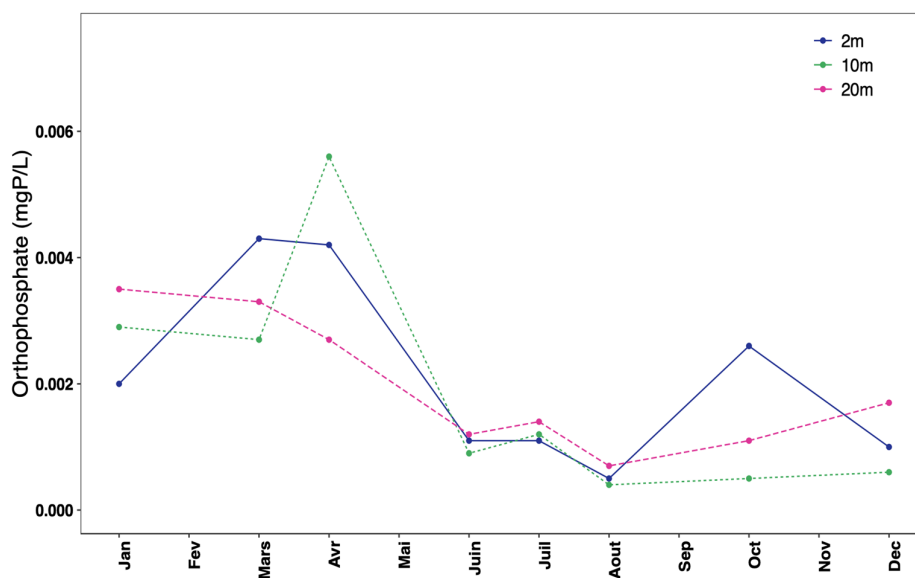


Figure 13 : Concentration en orthophosphate (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) en 2024 dans l'eau des couches superficielles du lac d'Aiguebelette (2, 10 et 20 m).

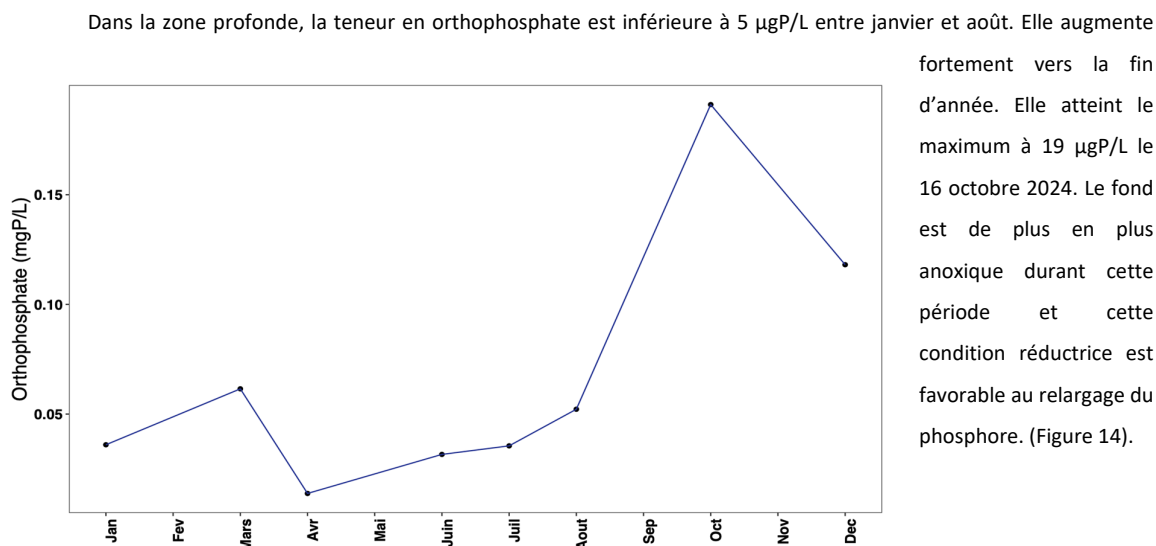


Figure 14 : Concentration en orthophosphate (P-  $\text{PO}_4^{3-}$ ) en 2024 dans les eaux du fond du lac à 65 m.

#### 4.3.3 Silice

La silice est un nutriment essentiel pour les diatomées qui l'utilisent pour la construction de leurs squelette extracellulaire (frustule). Le brassage hivernal partiel de l'année 2024 à 23m n'a pas permis la remise à disposition du stock de silice réactive dans la colonne d'eau à partir de l'hypolimnion. Le stock de silice hivernal de la couche de surface est bien inférieur du celui du fond à 65m (Figure 15)

En 2024, les concentrations en silice dans les eaux de surface et de fond sont respectivement de 2,4 mg/L et de 8,5 mg/L au moment du maximum du brassage hivernal (Figure 15). Ensuite, la concentration en silice commence à diminuer

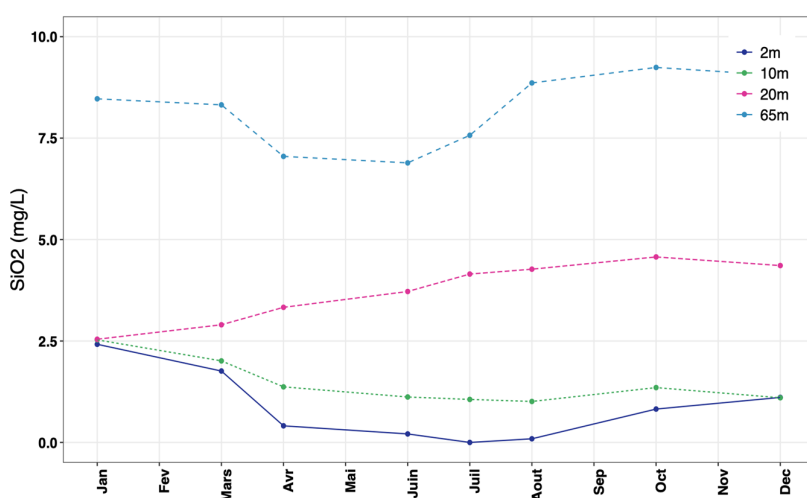


Figure 15 : Concentration en silice en 2024 dans les couches superficielles (2, 10 et 20m) et à 65m.

## 5. SUIVI LONG TERME PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

## 5.1 Température

Les températures moyenne annuelles de la couche de surface (0-10m) et profonde (60-65m) sont présentées dans la figure 16. La température moyenne de surface en 2024 est de 13,71°C. Celle de fond est de 5,60°C. Les évolutions de température de surface et de fond indiquent une tendance d'augmentation statistiquement significative.

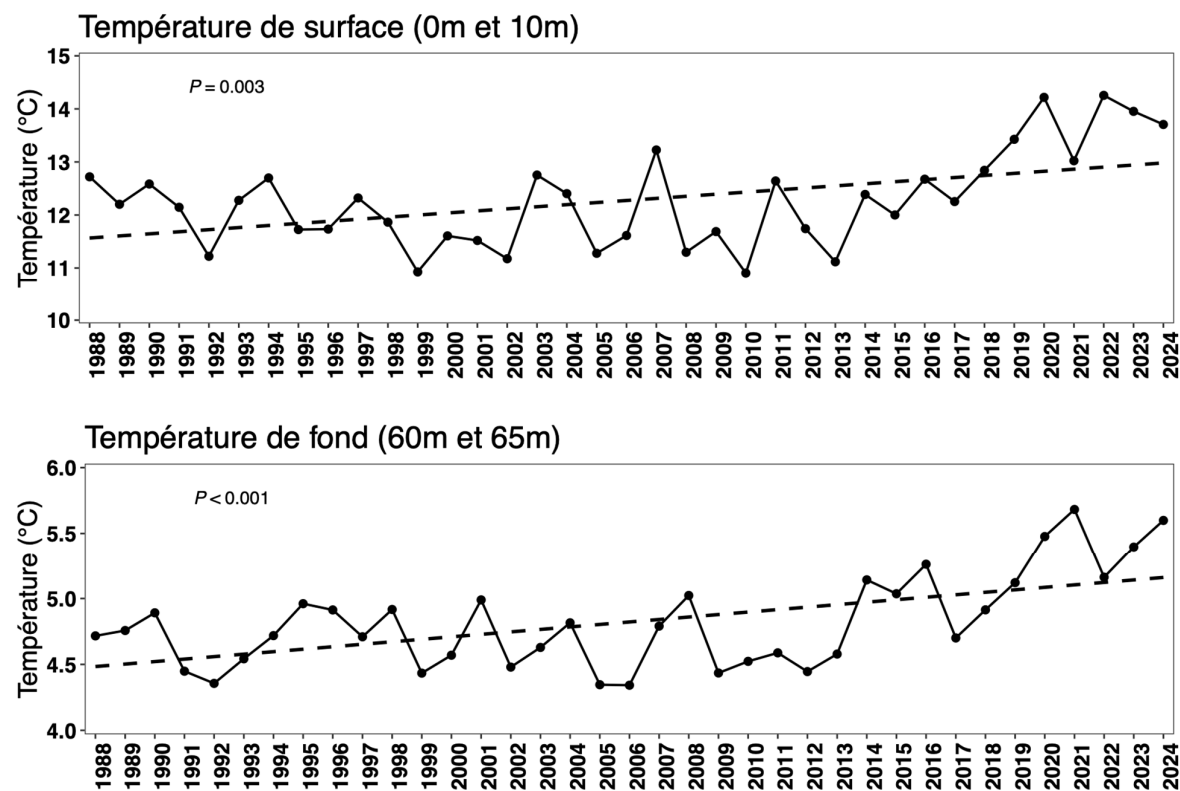


Figure 16 : Évolution des températures moyennes annuelles en °C dans la couche de surface (0-10m) et de fond (60m et 65m) de 1988 à 2024.

## 5.2 Oxygène

Les profils de saturation en oxygène de la colonne d'eau, comparés sur deux décennies (2000–2010 versus 2014–2024), sont présentés dans la figure 17. En lien avec le réchauffement croissant des masses d'eau, les épisodes de brassage hivernal complet se sont raréfiés au cours des cinq dernières années, favorisant une désoxygénation progressive de l'hypolimnion. Par conséquent, la stratification verticale de l'oxygène y apparaît bien plus prononcée récemment qu'au début des années 2000.

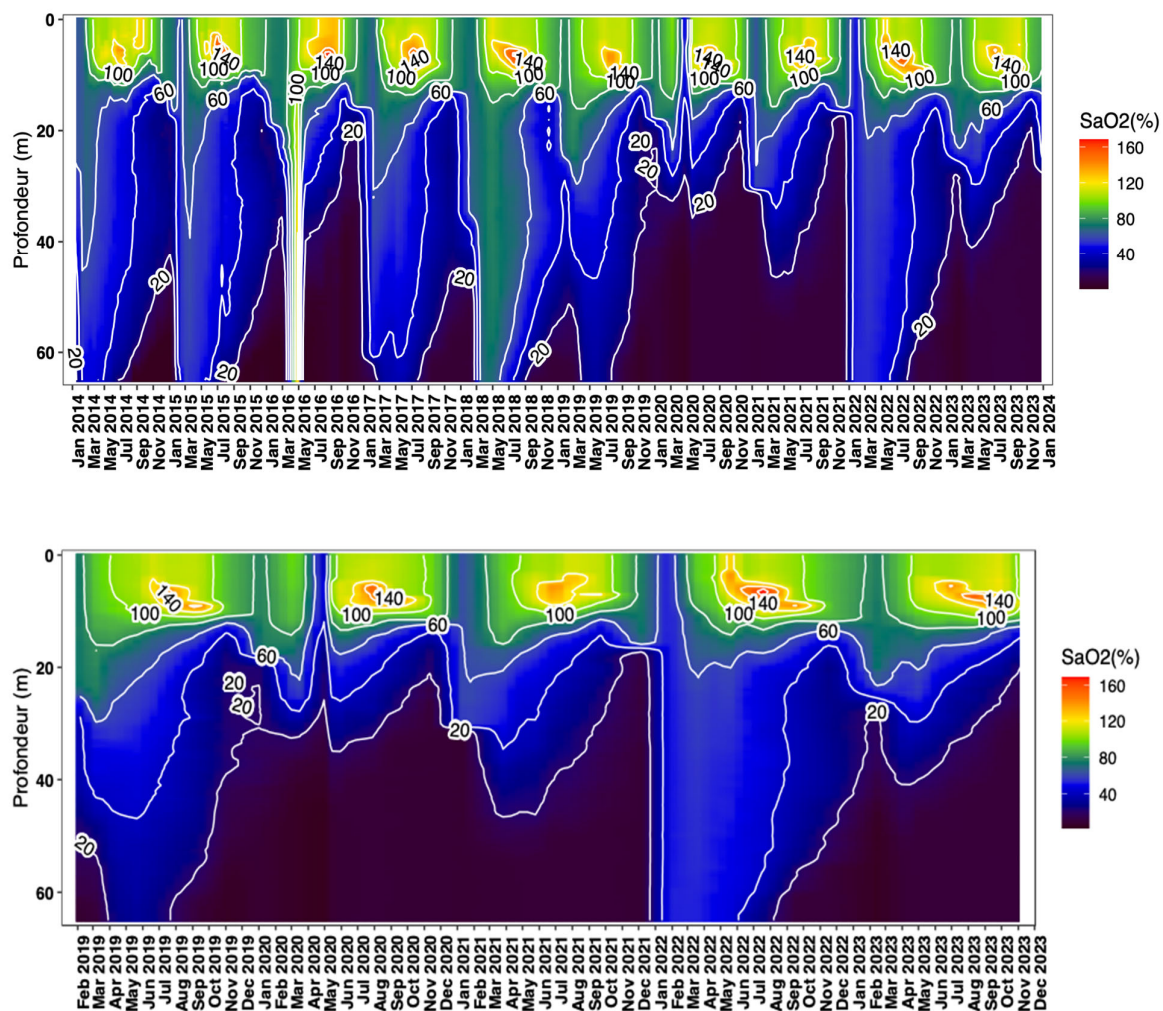


Figure 17 : Évolution de la saturation en oxygène (%) de 2014 à 2024.

### 5.3 Nutriments

Dans le principe, les concentrations moyennes annuelles hivernales (janvier- mars) pondérées par la profondeur en nitrate et en phosphore total constituent un indicateur de l'évolution du stock en fertilisants disponibles pour le développement algal.

#### 5.3.1 Nitrate

La concentration moyenne annuelle pondérée de nitrate calculée pour 2024 est de 0,34 mgN/L. Après une tendance en augmentation entre les années 1973 et 1990, la variation interannuelle ne montre plus de tendance particulière. Pour toute la chronologie, il faut surtout retenir que les concentrations observées pour Aiguebelette sont très faibles (Figure 18).

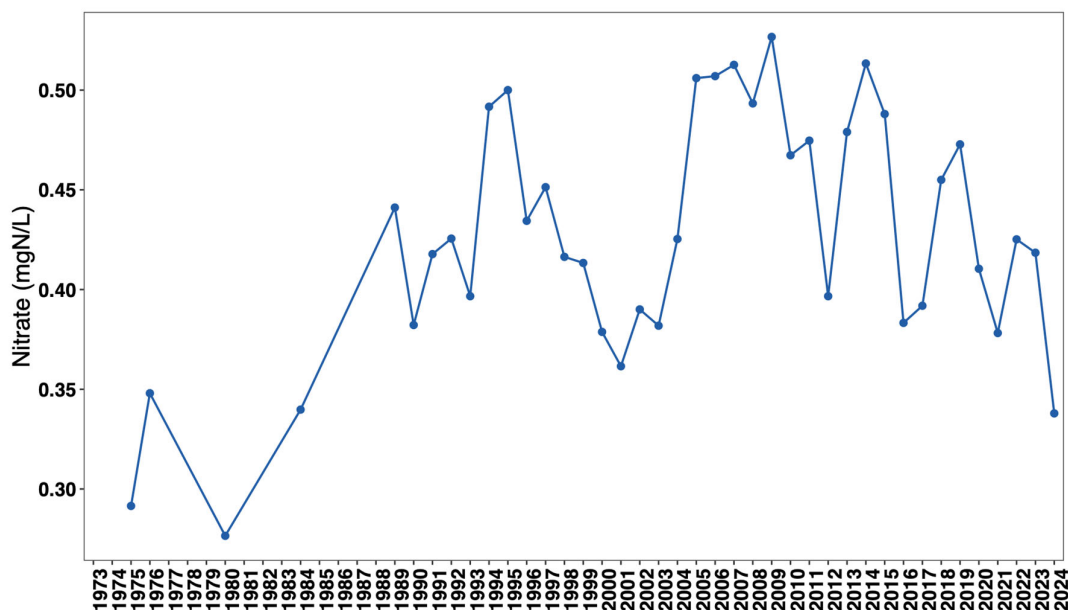


Figure 18 : Évolution des concentrations moyennes annuelles en nitrate (mgN/L) de 1975 à 2024.

### 5.3.2 Phosphore total

La concentration moyenne hivernale (janvier-mars) en phosphore total pour 2024 s'élève à 16,9  $\mu\text{g P/L}$ , soit un niveau sensiblement plus élevé qu'en 2023 (6,7  $\mu\text{g P/L}$ ). L'analyse de la série chronologique depuis 1989 met en évidence des fortes variations interannuelles, résultant tant de processus internes de régulation du phosphore (sédimentation, relargage sédimentaire) que de la limite de quantification des méthodes analytiques pour les faibles concentrations.

Après le passage en catégorie bleu en 2022 et 2023, la valeur moyenne de 2024 indique de nouveau la catégorie verte selon les critères de qualité. En comparant les moyennes hivernales avec les classes de qualité, nous observons que, depuis 1992, l'ensemble des valeurs se situe entre les classes "bonne" et "très bonne" (vert et bleu) (Figure 19).

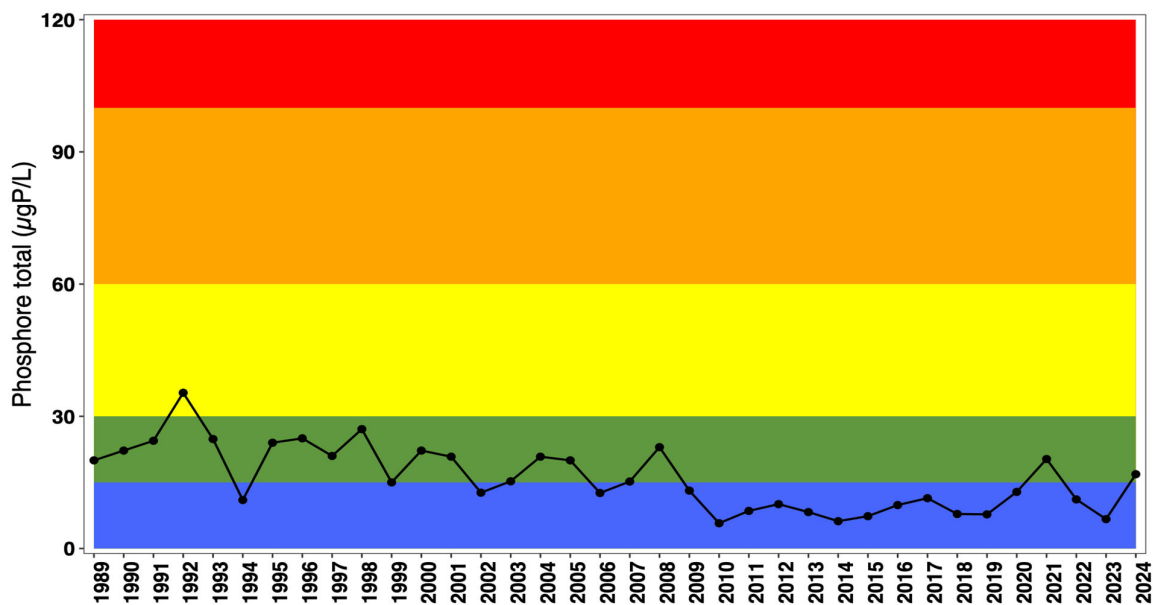


Figure 19 : Évolution de la classe de qualité en fonction des concentrations moyennes pondérées hivernales (janvier-mars) en phosphore total ( $\mu\text{gP/L}$ ) de 1988 à 2024.

### 5.4 Chlorure

La moyenne hivernale (janvier – mars) pour l’année 2024 est de 5,4 mg/L, soit une légère diminution par rapport à l’année 2023. Cette concentration représente la valeur la plus faible de toute la chronologie. Les concentrations moyennes hivernales restent à des niveaux faibles, très inférieurs aux valeurs toxiques citées dans la littérature et sont globalement stables depuis le début du suivi (Figure 20).

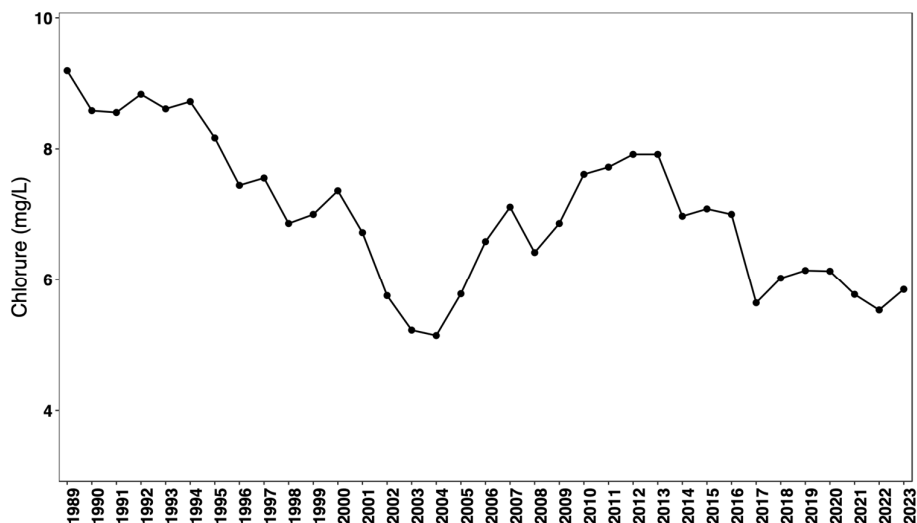


Figure 20 : Évolution des concentrations moyennes hivernales (janvier- mars) en chlorure (mg/L) de 1988 à 2024.

### 5.5 Transparence

Avec 5,2 m, la transparence de 2024 est dans la catégorie verte (Figure 21). L’année 2024 s’inscrit dans la continuité de l’évolution de la transparence de l’eau depuis 1988.

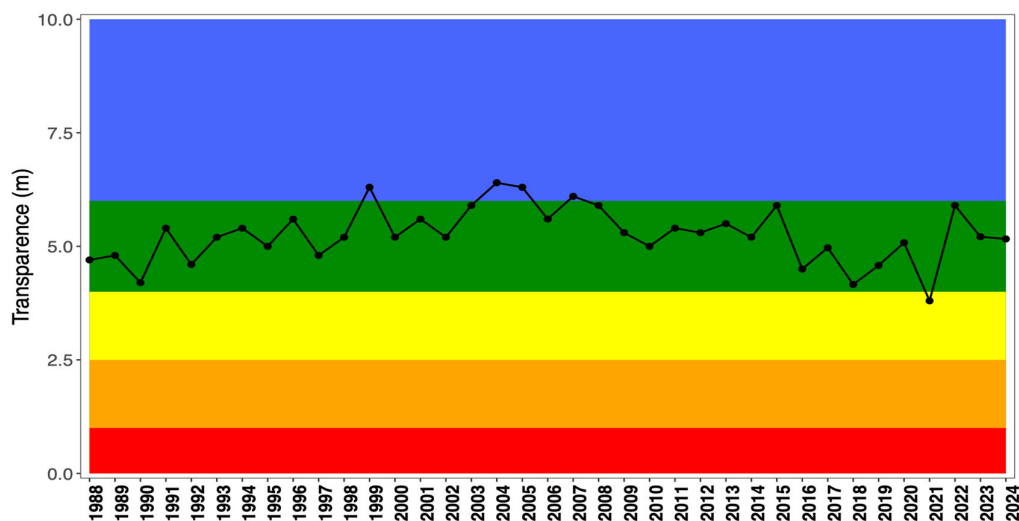


Figure 21 : Évolution de la classe de qualité de l'eau en fonction de la transparence moyenne annuelle (m) mesurée avec le disque de Secchi de 1988 à 2024.

La comparaison avec la grille de qualité montre que depuis quelques années les valeurs moyennes annuelles se situent au niveau de la classe de qualité "bonne" (vert). Quant à la valeur minimale de 2,5 m mesurée au juin 2024, elle continue à être dans la classe verte (Figure 22).

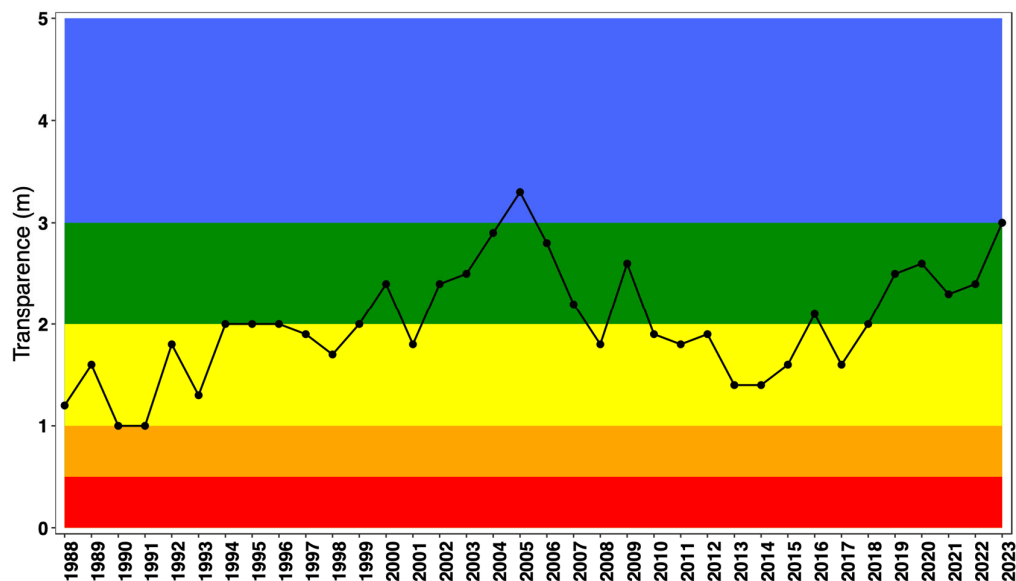


Figure 22 : Évolution de la classe de qualité de l'eau en fonction de la transparence minimale annuelle (m) mesurée avec le disque de Secchi de 1988 à 2024.

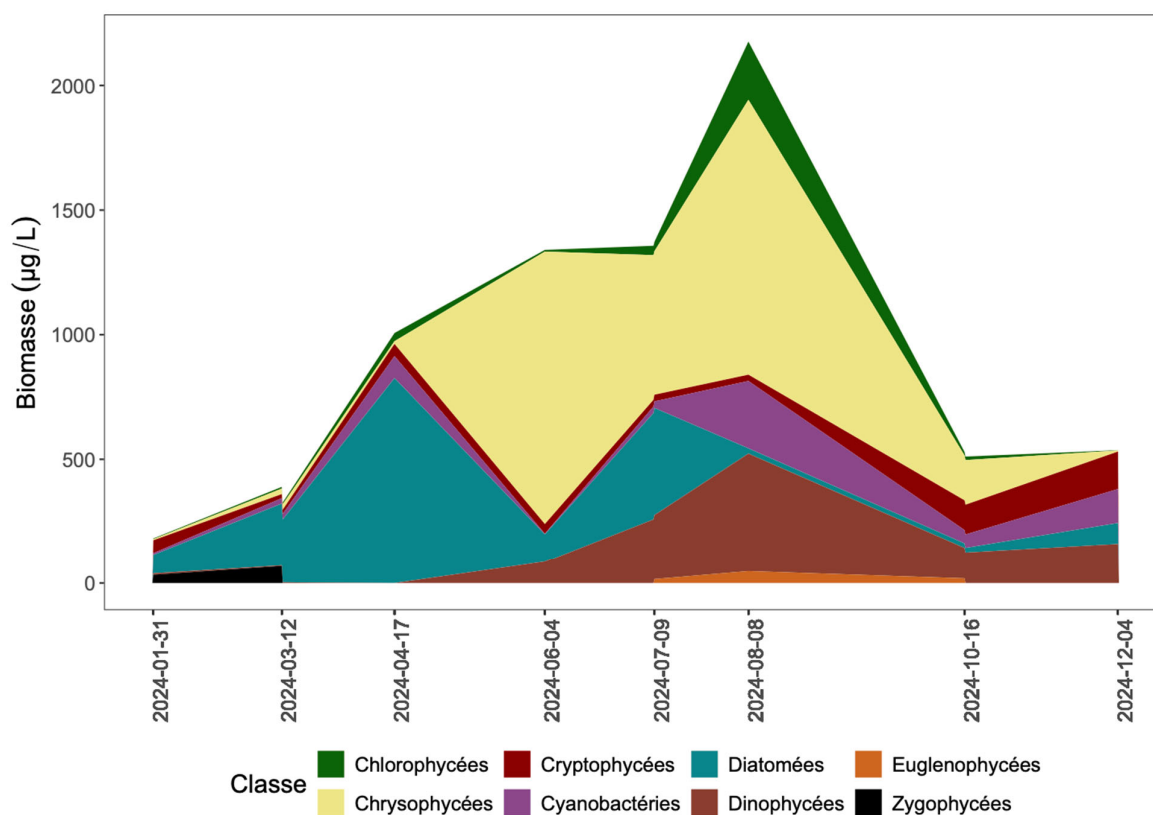
## 6. LE PHYTOPLANCTON

Cette étude comporte l'analyse de l'évolution quantitative des populations phytoplanctoniques à l'échelle annuelle ainsi que l'évolution interannuelle depuis le début des suivis (1999). Différentes métriques, telles que la diversité (indice de Shannon), ainsi que l'indice de trophie de Brettum (Brettum 1989), modifié par Wolfram (Wolfram et al. 2007 ; Wolfram & Dokulil 2007) sont présentés.

### 6.1 Evolution saisonnière de l'année 2024

#### 6.1.1 Evolution des classes d'algues

La figure 23 présente la dynamique saisonnière des principales classes d'algues *sensu* Bourrelly (Bourrelly 1972 ; Bourrelly 1981 ; Bourrelly 1985) pour l'année 2024.



**Figure 23 : Variations saisonnières de la biomasse du phytoplancton par classes algales en 2024.**

Pour l'année 2024, 4 phases peuvent-être décrites :

- Une phase hivernale et printanière (du 31/01 au 17/04), présentant une biomasse quasiment exclusivement constituée par les Diatomées. Dès le début de cette période la biomasse est assez élevée (182 µg/L) et augmente pour atteindre un pic (1006 µg/L) le 17 Avril.
- Une phase de fin de printemps et début d'été (du 17/04 au 9/07), qui présente des biomasses en croissance (moyenne pour les deux mois de 1345 µg/L), dominée par les Chrysophycées et les Diatomées.

- Une phase de fin d'été et automnale (du 8/08 au 16/10) pendant laquelle la biomasse augmente fortement pour atteindre le pic maximum annuel le 8/08 (2176 µg/L). La diversité (Indice de Shannon 2,11) atteint le pic maximum le 16/10.
- Une phase hivernale (du 16/10 au 12/04) pendant laquelle la biomasse diminue pour atteindre les valeurs minimales annuelles (le 10/16, 529 µg/L). Les Cryptophycées et le Dinophycées sont largement dominantes pendant cette période.

### 6.1.2 Evolution des espèces dominantes

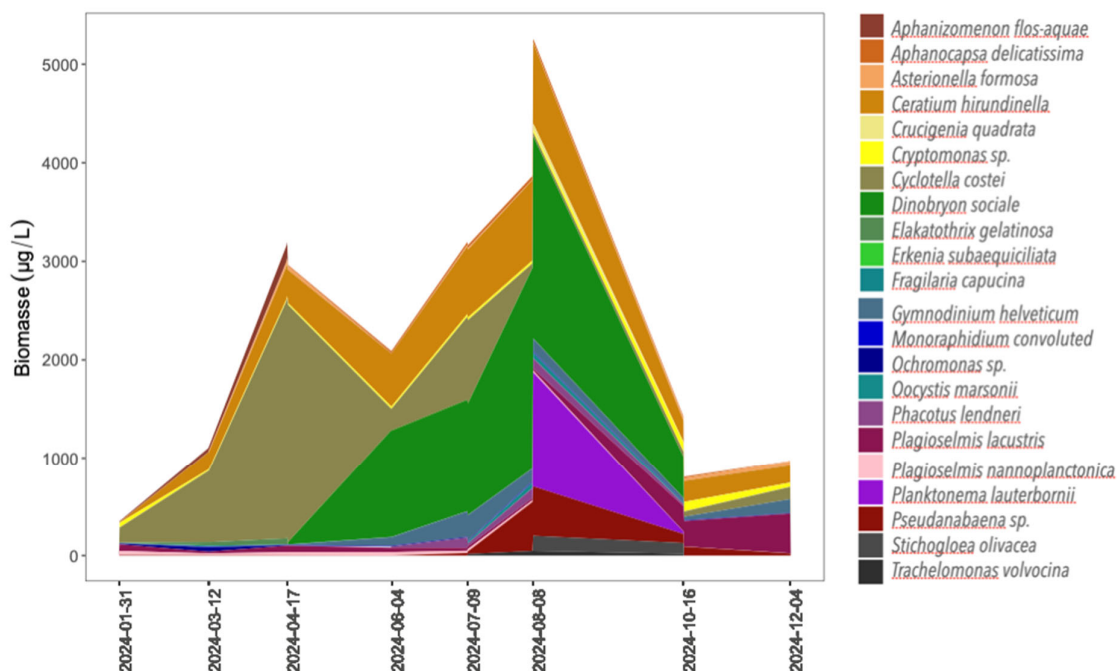


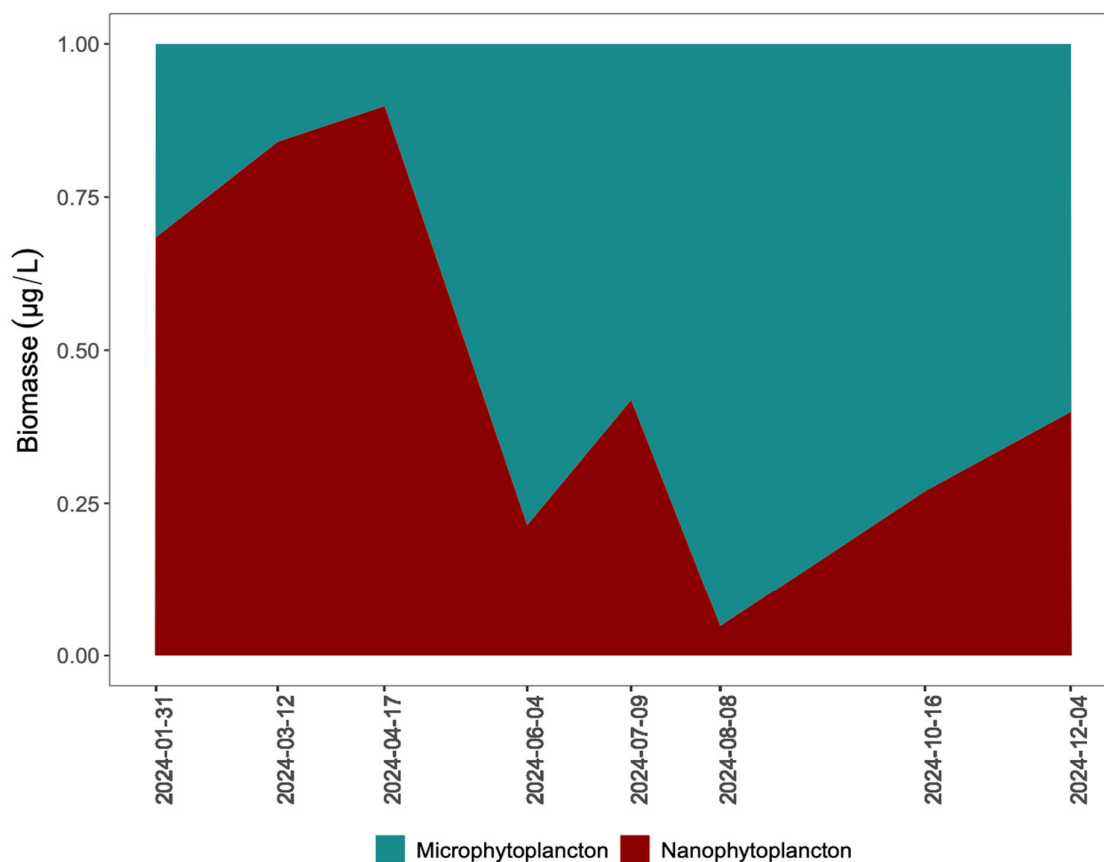
Figure 24 : Variations saisonnières de la biomasse des principaux taxons du phytoplancton en 2024.

Les variations des taxons sont présentées sur la figure 24. Les successions d'espèces sont décrites ci-dessous :

- Pendant la phase hivernale et printanière, la biomasse est quasiment exclusivement dominée par *Cyclotella costei*, une petite diatomée centrique typique des grands lacs en cours de ré-oligotrophisation (Rimet et al. 2009). Cette espèce est adaptée aux eaux brassées et froides rencontrées en début d'année. Elle est très fréquente à Aiguebelette.
- Pendant la période de début d'été, *Cyclotella costei* représente une partie moins importante et la biomasse de Chrysophycées (*Dinobryon divergens* notamment) augmente. Cette espèce, également fréquemment observée à Aiguebelette, est mixotrophe, c'est à dire capable de photosynthétiser et d'utiliser les nutriments dissous dans l'eau, mais peut aussi utiliser la matière organique comme source d'énergie lorsque les nutriments viennent à manquer. Le genre *Dinobryon* est caractéristique des milieux oligotrophes (Padisak et al. 2009).
- Pendant la phase automnale, c'est une Chlorophycée qui va dominer la biomasse : *Planktonema lauterbornii*, une espèce filamenteuse qui est habituellement observée à cette période et qui se développe à l'interface entre l'épilimnion et l'hypolimnion. En fin d'année, la biomasse est faible et constituée de taxons typiques des milieux déstratifiés oligotrophes et habituellement observés à Aiguebelette (*Cyclotella costei*, *Plagioselmis lacustris*).

### 6.1.3 Evolution du micro et du nanophytoplancton

Les taxons nanophytoplanctoniques ont une longueur inférieure à 20  $\mu\text{m}$  et un biovolume inférieur à 10 000  $\mu\text{m}^3$ . Ceux du microphytoplancton, ont une longueur supérieure à 20  $\mu\text{m}$  et/ou un biovolume supérieur à 10 000  $\mu\text{m}^3$ . La figure 25 présente la dynamique de ces deux catégories pour l'année 2024. Le nanophytoplancton est plus facilement ingérable par le zooplancton et permet d'expliquer la cinétique de la biomasse de ce dernier.



**Figure 25 : Variations saisonnières de la biomasse par classes de taille en 2024.**

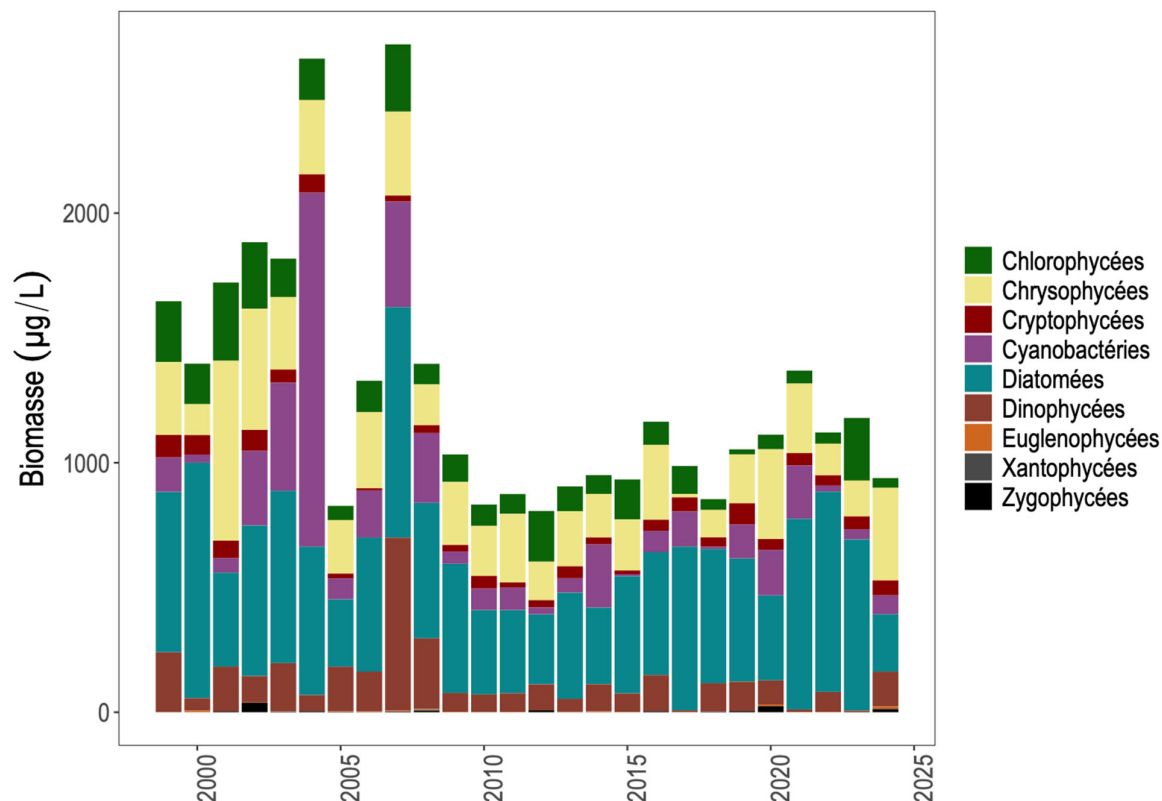
Le nanophytoplancton domine largement le compartiment jusqu'au 06/04, puis ensuite les microphytoplancton devient majoritaire dès le début de l'été jusqu'à l'automne. Le 8/08 il représente plus que 95% de la biomasse totale.

Ensuite le nanophytoplancton augmente et en fin d'année les deux compartiments présentent une biomasse similaire (microphytoplancton 60% et nanophytoplancton 40% de la biomasse totale). Cette dynamique saisonnière est assez proche de celles des années précédentes (2020, 2021, 2022, 2023).

## 6.2 Evolution interannuelle

### 6.2.1 Evolution des classes d'algues

La figure 26 présente l'évolution interannuelle des principales classes d'algues sensu Bourrelly (Bourrelly 1972 ; Bourrelly 1981 ; Bourrelly 1985). Pour chaque mois, une moyenne est calculée par classe algale, puis pour chaque année, une moyenne est calculée à partir de ces moyennes mensuelles.



**Figure 26 : Evolution interannuelle des principales classes algales (moyenne annuelle des moyennes mensuelles des biomasses).**

Entre 2018 et 2021, la biomasse du phytoplancton du lac d'Aiguebelette a augmenté et la biomasse de l'année 2021 était la plus élevée depuis 2008 (2021 : 1369 µg/L, 2008 : 1396 µg/L). Mais cette tendance à la hausse ne se confirme pas avec les années récentes (2022, 2023, 2024) qui présentent des biomasses sensiblement équivalentes à 2020. Les valeurs restent plus faibles que celles que l'on pouvait rencontrer dans le lac d'Aiguebelette avant 2008.

Par rapport aux autres lacs, Aiguebelette présente des biomasses moyennes annuelles similaires à celles du Léman et du Bourget dont les valeurs oscillent également autour de 1000 – 1200 µg/L ces deux années. Par contre, la biomasse d'Annecy est inférieure à celles des trois autres lacs, avec des biomasses oscillant autour de 700 – 800 µg/L depuis 3 ans.

En ce qui concerne la composition en classes algales, on observe que la classe des Chlorophycées, qui caractérise en général les milieux plutôt eutrophes, présente une cinétique interannuelle de raréfaction très claire jusqu'en 2022. Pendant l'année 2024 l'espèce *Elakatothrix viridis*, caractéristique des lacs méso-eutrophes et qui avait été dominante en 2023, a été observée occasionnellement et l'espèce plus représentée dans les Chlorophycées est *Planktonema lauterbornii*, dont l'écologie est bien différente.

Sinon, l'essentiel de la composition en espèces est stable depuis une 15aine d'années, notamment avec la présence de *Cyclotella costei* qui domine largement la biomasse algale.

### 6.2.2 Evolution de la diversité

Un indice de diversité annuelle a été calculé sur la chronique 1999-2024. Pour chaque prélèvement, l'indice de Shannon (Weaver & Shannon 1949) est calculé, puis une moyenne mensuelle est calculée, enfin la moyenne annuelle de ces moyennes mensuelles est calculée pour chaque année. L'évolution de cet indice moyen est reportée dans la figure 27.

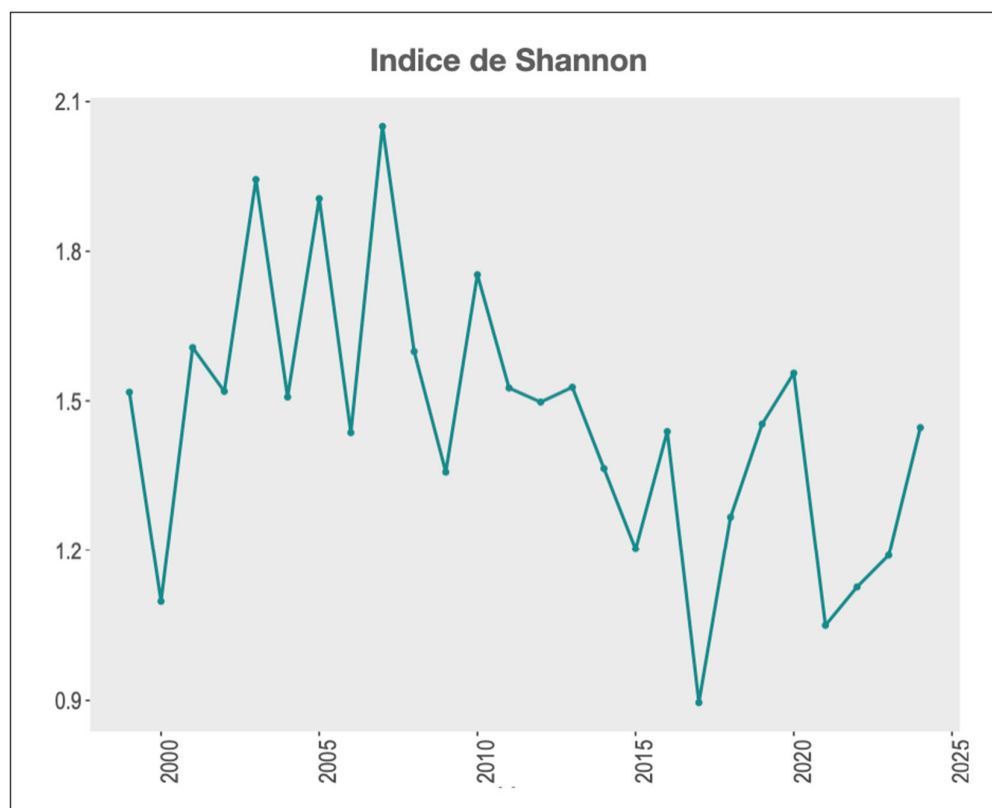
Détail du calcul de l'indice de diversité de Shannon :

$$H = - \sum \frac{n_i}{n} \ln \left( \frac{n_i}{n} \right)$$

H : indice de Shannon

Ni : biomasse de l'espèce algale i

N : somme de la biomasse des espèces algales



**Figure 27 : Evolution interannuelle de l'indice de diversité de Shannon.**

L'indice de diversité du lac d'Aiguebelette est stable, oscillant entre 1,1 et 1,5 depuis 2011. La diversité du Lac d'Aiguebelette est plus faible que celles du Léman (diversité d'environ 2) mais comparable à celles d'Annecy et du Bourget.

### 6.2.3 Evolution de l'indice de Brettum

Le niveau trophique des lacs peut être évalué à partir d'indices basés sur la composition taxonomique et la biomasse phytoplanctonique. Des études menées à INRAE (Anneville & Kaiblinger 2009 ; Kaiblinger et al. 2009 ; Kaiblinger 2008) ont montré que l'indice de Brettum modifié par Kaiblinger et al. (2009) est le plus adapté à évaluer le niveau trophique des grands lacs alpins. Cet indice donne pour 133 taxons leur préférence par rapport à une concentration en phosphore. Plus cet indice est élevé, plus le niveau trophique sera faible. Les valeurs suivantes sont données par les auteurs :

Classe	Concentrations en TP	Niveau trophique
6	≤5 µg/L	ultra-oligotrophe
5	5–8 µg/L	oligotrophe
4	8–15 µg/L	oligo-mesotrophe
3	15–30 µg/L	mésotrophe/faiblement eutrophe
2	30–60 µg/L	eutrophe
1	>60 µg/L	hypereutrophe

Pour chaque prélèvement, un indice est calculé, puis la moyenne mensuelle est calculée. Enfin un indice annuel est calculé sur les moyennes mensuelles. La figure 28 présente l'évolution de ces indices annuels de Brettum.

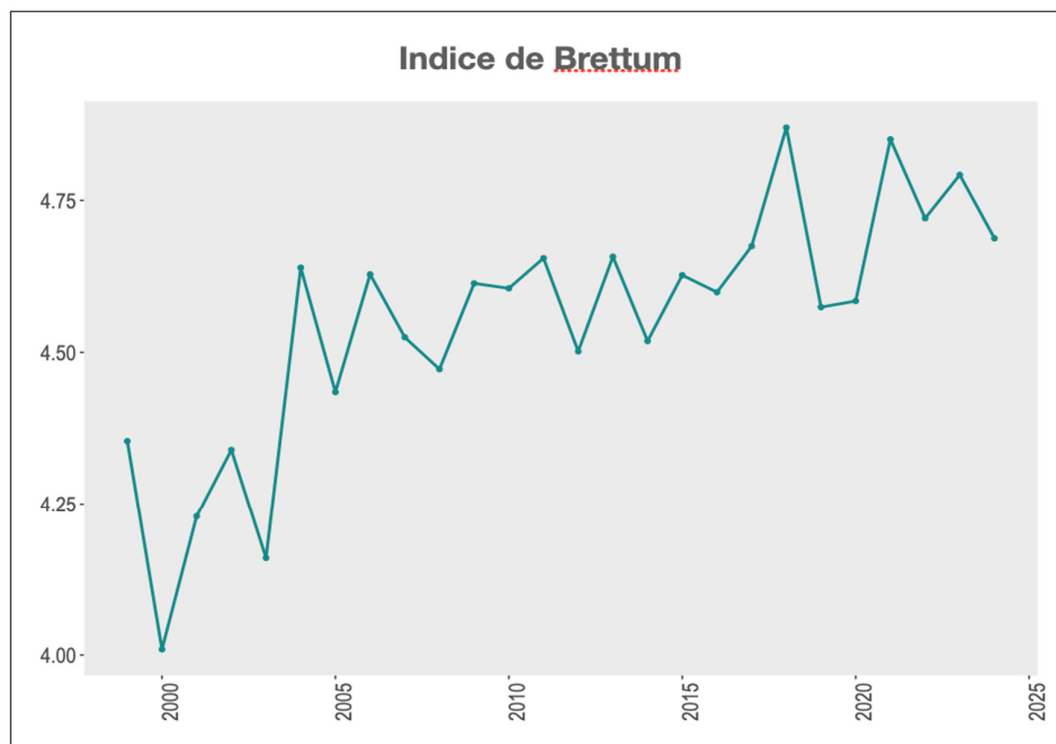


Figure 28 : Evolution de l'indice de Brettum.

Lorsque l'on considère la chronique dans sa globalité, on observe une nette augmentation de l'indice, ce qui indique une nette amélioration du niveau trophique du lac. Entre 2009 et 2018, l'indice de Brettum passe de 4,6 à 4,9 et classe le lac d'Aiguebelette en méso-oligotrophe, ce qui est proche de ce qui est observé dans le lac d'Annecy. Le lac du Bourget présente également des valeurs proches des lacs d'Annecy et Aiguebelette (moyenne 4,72 depuis 2020). Par contre, le Léman présente des valeurs d'indices plus faibles (moyenne de 3,6 depuis 2020) ce qui classe ce lacs en méso-faiblement eutrophe.

A Aiguebelette, en 2019 et 2020 on observe une baisse de l'indice. Ceci est lié à des prélèvements de fin d'été et d'automne qui ont des valeurs d'indices plus faibles que le reste de l'année : ce sont des espèces comme *Mougeotia gracillima* (Zygothécée filamenteuse), *Aphanothece clathrata var. rosea* et *Chroococcus limneticus* (cyanobactéries mucilagineuses non toxiques), qui présentaient d'importantes proportions en termes de biomasses relatives à ces dates qui ont fait chuter la note de l'indice Brettum, car elles sont indicatrices de milieux méso-eutrophes. Ces espèces n'ont pas été présentes dans de telles proportions les années suivantes (2021 à 2024). Par conséquent, la valeur de l'indice Brettum des années 2021 à 2024 sont plus élevées et similaires à celle de l'année 2018 (moyenne de 4,8).

### 6.2.4 La chlorophylle a

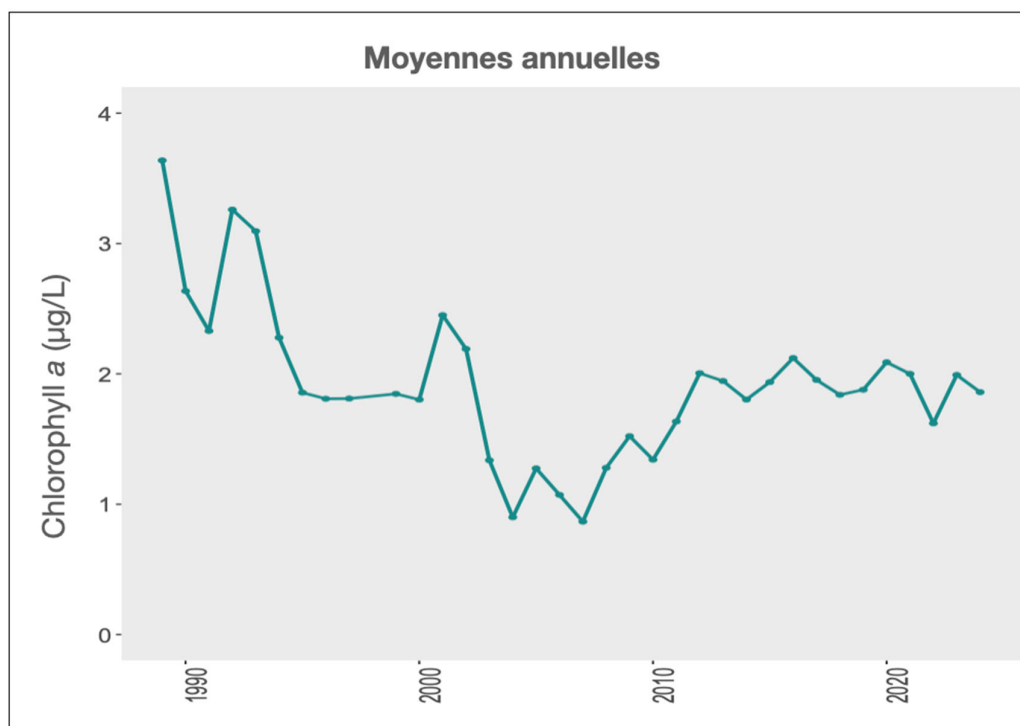
La chlorophylle a (ChloA) est un paramètre proche de la biomasse phytoplanctonique qui renseigne sur sa quantité. Les prélèvements qui ont permis les mesures de chlorophylle (méthode Scor-Unesco, mesure effectuée à partir des absorbances mesurées aux longueurs d'ondes suivantes 410, 750, 665 ; 645 et 630 nm, NF T90-117 AFNOR 1999) ont été réalisés différemment au cours de la chronique 1989-2024 :

- entre le 23/01/1989 et 4/10/2005 : prélèvements intégrés entre la surface et 2,5 x la profondeur du disque de Secchi
- entre le 20/10/2005 et 28/02/2012 : prélèvements intégrés entre 0 et 20 m
- entre le 13/03/2012 et le 7/12/2024 : prélèvements intégrés entre 0 et 18 m

De plus, le nombre de prélèvement par an a également évolué entre 1989 et 2024 :

- de 1989 à 1997 : il oscille entre 14 et 25 prélèvements par an
- de 1999 à 2015 : il oscille entre 30 et 36 prélèvements par an (sauf en 2000 avec 29 prélèvements, en 2003 avec 28 prélèvements, 2007 avec 19 prélèvements, 2009 avec 25 prélèvements et 2010 avec 27 prélèvements)
- 2016-2024 : 5 à 9 prélèvements

Ces différences de protocole, dues à différents facteurs, rendent la comparaison des moyennes annuelles délicates (cf. Figure 29). On note cependant une diminution de la concentration de la ChloA de 1989 à 2005. A partir de 2005 cette concentration augmente pour atteindre un niveau équivalent à la fin des années 2000. Cette augmentation, qui double de 2005 à 2022 n'est pas corroborée par les mesures de biomasses phytoplanctoniques (comptages microscopiques). La moyenne annuelle en 2024 était de 1,86 µg/L.



**Figure 29 : Evolution de la Chlorophylle a dans le lac d'Aiguebelette. La moyenne annuelle, pondérée par le nombre d'échantillons par mois est calculée à partir des moyennes mensuelles.**

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 1999.** NF T90-117. Qualité de l'eau - Dosage de la chlorophylle a et d'un indice phéopigments - Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire. Afnor
- Afnor, 2006.** NF EN 15204. Qualité de l'eau - Norme guide pour le dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée (méthode Utermöhl). Afnor 1-41.
- ANNEVILLE O., KAIBLINGER K., 2009.** Proposal for a phytoplankton lake index applicable to lakes of the Rhône-Alpes basin for the implementation of the European Water Framework Directive. Final report. Agence de l'Eau Rhone Méditerranée et Corse, 1-54. 2009. INRA Thonon, France.
- AREA, 1990.** Autoroute A 43 - Protection du lac d'Aiguebelette (Savoie).;
- BLAKE G., 1985.** Contamination métallique du lac d'Aiguebelette - Campagne 1984 - 12 p.; Université de Savoie - Département d'écologie; Chambéry
- BLAKE G., LASCOMBE C., 1978.** Le lac d'Aiguebelette : Etat de la qualité des eaux et évolution ; Ann. C.U.S., III, 95-119.
- BOURRELLY P., 1972.** Les Algues d'eau douce, Tome I: Les Algues vertes, N. Boubée & Cie edn.
- BOURRELLY P., 1981.** Les Algues d'eau douce, Tome II: Les Algues jaunes et brunes, N. Boubée & Cie edn.
- BOURRELLY P., 1985.** Les Algues d'eau douce, Tome III: Les Algues bleues et rouges, N. Boubée & Cie edn.
- BRETTUM P., 1989.** Algen als Indikatoren für die Gewässerqualität in norwegischen Binnenseen. 1-102. Norsk Institutt for vannforskning NIVA.
- CT lac du Bourget, 2015.** Lac d'Aiguebelette - Suivi 2014 ; 53 p.; CCLA, CALB, CISALB ; Aix-Les-Bains.
- DRUART J. C., RIMET F. 2008.** Protocoles d'analyse du phytoplancton de l'INRA : prélèvement, dénombrement et biovolumes. INRA. 1-200. 2008. Thonon les Bains.
- GIREL C., 1999.** Rapport de stage 1998/1999 - Suivi allégé de deux lacs alpins ; 45 p.; Université Paris 7 UF Environnement, Génie de l'Environnement.
- HYDROLAC, TERE0, SAFEGE ENVIRONNEMENT, 2007.;** Bilan et perspectives du contrat de bassin versant du lac d'Aiguebelette ; Etude de la qualité des cours d'eau et quantification des apports de phosphore, 130 p. CCLA.
- KAIBLINGER C., ANNEVILLE O., TADONLEKE R., RIMET F., DRUART J. C., GUILLARD J., DOKULIL M. T., 2009.** Central European water quality indices applied to long-term data from peri-alpine lakes: test and possible improvements. *Hydrobiologia* 633: 67-74.
- KAIBLINGER K., 2008.** Water quality assessment in lakes with special focus on Phytoplankton indices used within the EU Water Framework Directive (WFD). Rapport I.L. 277/08;DECO470, 1-45. 2008. INRA Thonon.
- KOMAREK J. & ANAGNOSTIDIS K. 1999.** Cyanoprokaryota, 1. Teil Chroococcales. Susswasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Ettl et al. eds. 548 pp.
- PADISAK J., CROSSETTI L. O., NASELLI-FLORES L., 2009.** Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia* 621: 1-19.
- REYNOLDS C. S., HUSZAR V., KRUK C., NASELLI-FLORES L., MELO S. 2002.** Toward a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* 24: 417-428.
- RIMET F., 2015.** Le phytoplancton du lac d'Aiguebelette (Savoie), année 2014. INRA-Thonon, 14 p + annexe.
- RIMET F., DRUART J. C., ANNEVILLE O., 2009.** Exploring the dynamics of plankton diatom communities in Lake Geneva using emergent self-organizing maps (1974-2007). *Ecological Informatics* 4: 99-110.
- SILENE, 1994.** Contrat de Bassin Versant pour le lac d'Aiguebelette ; Etude Générale des Cours d'Eau Affluents du lac - Qualités physicochimiques et hydrobiologiques des eaux des affluents du lac ; Rapport d'Etude ; 78 p.; Prefecture de la Savoie ; DDAF ; DR de L'Environnement ; SMALA.
- SRAE Rhône-Alpes , 1985.** Etat de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette (Savoie) - Campagne 1984.
- TAPOLCZAI K., ANNEVILLE O., PADISAK J., SALMASO N., MORABITO G., ZOHARY T., TADONLEKE R. D., RIMET F., 2015.** Occurrence and mass development of *Mougeotia* spp. (Zygnemataceae) in large, deep lakes. *Hydrobiologia* 745: 17-29.
- WEAVER W., SHANNON C. E., 1949.** The Mathematical Theory of Communication. Urbana, Illinois University of Illinois Press.
- WOLFRAM G., DOKULIL M., 2007.** Leitfaden zur erhebung der biologischen qualitatselemente. Teil B2 - Phytoplankton. 1-50. 2007. Lebensministerium, Austria.
- WOLFRAM G., DOKULIL M., PALL K., REICHMANN M., SCHULZ L., ARGILLIER C., DE BORTOLI J., MARTINEZ J. P., RIOURY C., HOEHN E., RIEDMULLER U., SCHAUMBURG J., STELZER D., BUZZI F., DALMIGLIO A., MORABITO G., MARCHETTO A., REMECREKAR S., URBANIC G., 2007.** Intercalibration Exercise, Technical Report + Annexes, Alpine GIG (Lakes). 2007. Vienna - Ispra.