

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

## RAPPORT 2016

Rédigé par :

**Jean GUILLARD** (coordination)  
**Christine BARBIER** (physico-chimie)  
**Philippe QUETIN** (météorologie)  
**Frédéric RIMET** (phytoplancton)

*Appui technique : Jean Christophe HUSTACHE & Pascal PERNEY (Prélèvements)  
Denis BARBET (gestion des données et graphiques)*



*Référence à citer* : GUILLARD, J. BARBIER C., QUETIN P., RIMET F., 2017. Suivi de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette. *Rapport 2016*. UMR CARTEL - INRA- USMB – Observatoire OLA. 46 pages



LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

PRESENTATION ET CARACTERISTIQUES DU LAC D'AIGUEBELETTE

CE QU'IL FAUT RETENIR POUR 2016	6
<b>1 MATERIEL ET METHODE</b>	<b>8</b>
1.1 OBJECTIF	8
1.2 MATERIEL	8
1.3 PROTOCOLE ET METHODOLOGIE	9
1.3.1 Les paramètres de suivi	
1.3.1.1 <i>Nitrate, phosphore et silice</i>	
1.3.1.2 <i>Chlorures</i>	
1.3.1.3 <i>Transparence</i>	
1.3.1.4 <i>Chlorophylle a</i>	
1.3.1.5 <i>Oxygène dissous</i>	
1.3.1.6 <i>Phytoplancton</i>	
1.3.2 Fréquence des campagnes de mesures	
1.3.3 Expression des résultats	
1.3.3.1 <i>Teneurs moyennes en nitrates et phosphore total</i>	
1.3.3.2 <i>Chlorures</i>	
1.3.3.3 <i>Moyenne annuelle de la transparence</i>	
1.3.3.4 <i>Moyenne annuelle en Chlorophylle a</i>	
1.3.3.5 <i>L'oxygène</i>	
<b>2 CONDITIONS CLIMATIQUES</b>	<b>12</b>
2.1 TEMPERATURES	12
2.1.1 Moyennes annuelles	
2.1.2 Variations saisonnières	
2.2 PRECIPITATIONS	14
2.2.1 Cumuls annuels	
2.2.2 Variations saisonnières	
2.3 INSOLATION	16
2.3.1 Cumuls annuels	
2.3.2 Variations saisonnières	
<b>3 PRESENTATION DES CAMPAGNES DE TERRAIN</b>	<b>18</b>
<b>4 EVOLUTIONS SAISONNIERES DES PRINCIPAUX PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES</b>	<b>18</b>
4.1 TEMPERATURE ET OXYGENE DISSOUS	18
4.1.1 Distributions verticales	
4.1.2 Variations saisonnières	
4.2 CONDUCTIVITE	25
4.3 TRANSPARENCE	27

<b>4.4 NUTRIMENTS</b>	<b>28</b>
4.4.1 Fin de période hivernale	
4.4.2 Evolution saisonnière	
4.4.2.1 Nitrate	
4.4.2.2 Phosphore	
4.4.2.3 Silice	
<b>4.5 CHLORURE</b>	<b>31</b>
<b>5 SUIVI LONG TERME PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES</b>	<b>31</b>
<b>5.1 NUTRIMENTS ET CHLORURE</b>	<b>31</b>
5.1.1 Nitrate	
5.1.2 Phosphore total	
5.1.3 Chlorure	
<b>5.2 TRANSPARENCE</b>	<b>33</b>
<b>5.3 TEMPERATURE</b>	<b>34</b>
5.3.1 Epilimnion	
5.3.2 Couches profondes	
<b>5.4 OXYGENE</b>	<b>35</b>
5.4.1 Epilimnion	
5.4.2 Couches profondes	
<b>6 LE PHYTOPLANCTON</b>	<b>36</b>
<b>6.1 Evolution saisonnière 2016</b>	<b>36</b>
6.1.1 Evolution des classes d'algues	
6.1.2 Evolution des espèces dominantes	
6.1.3 Evolution du micro et du nanophytolacton	
<b>6.2 Evolution interannuelle</b>	<b>38</b>
6.2.1 Evolution des classes d'algues	
6.2.2 Evolution de la diversité	
6.2.3 Evolution de l'indice de Brettum	
6.2.4 La chlorophylle a	
6.2.5 Etude des profils obtenus via la sonde fluorimétrique BBE	
<b>7 CONCLUSION</b>	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>46</b>

**LISTE DES TABLEAUX**

**Tableau 1** : Pigments caractéristiques des principales classes algales étudiées et longueur d'onde d'excitation (pics d'absorption maximaux) de ces pigments.

**Tableau 2** : Moyennes annuelles des températures de l'air en °C.

**Tableau 3** : Nombre de jours où les températures moyennes journalières sont inférieures à 0 °C pour les stations du Bourget et d'Aiguebelette entre 2010 et 2016.

**Tableau 4** : Température moyennes mensuelle de l'air (°C) en 2016 : Stations d'Aiguebelette et du Bourget - Moyennes des années 1981 – 2010 : Station du Bourget.

**Tableau 5** : Précipitations annuelles aux stations du Bourget et du lac d'Aiguebelette.

**Tableau 6** : Précipitations mensuelles en 2016 – station du Bourget et d'Aiguebelette -Moyennes 1981- 2010 à la station du Bourget.

**Tableau 7** : Insolation annuelle à la station du Bourget et moyenne 1981-2010 et rayonnement global du lac d'Aiguebelette.

**Tableau 8** : Insolation mensuelle en 2016 – station du Bourget et Rayonnement Global d'Aiguebelette et normale 1981- 2010 à la station du Bourget.

**Tableau 9** : Nombre et répartition des campagnes de mesures et de prélèvements pour l'année 2016.

**Tableau 2** : Saturations maximales en oxygène dissous (%) à la fin de la période hivernale dans les couches profondes entre 2009 et 2016.

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1** : Situation géographique et bassin versant du lac d'Aiguebelette.
- Figure 2** : Moyennes annuelles des températures de l'air (°C) Stations d'Aiguebelette et du Bourget de 1981 à 2016.
- Figure 3** : températures de l'air (°C) Station Aiguebelette.
- Figure 4** : Précipitations annuelles stations du Bourget et d'Aiguebelette.
- Figure 5** : Précipitations mensuelles en 2016 – station du Bourget et d'Aiguebelette et moyenne 1981- 2010 à la station du Bourget.
- Figure 6** : Précipitations journalières, niveau du lac d'Aiguebelette et consigne de niveau en 2016.
- Figure 7** : Durée d'insolation (h) au Bourget et Rayonnement Global (kJ.cm<sup>-2</sup>) à Aiguebelette.
- Figure 8** : Comparaison des durées d'insolation mensuelle (h) de la normale 1981-2010 à la station du Bourget en 2016 et du Rayonnement Global mensuel à Aiguebelette.
- Figure 9** : Distributions des températures (°C), de la saturation en oxygène dissous (%) au point A, en 2016.
- Figure 10** : Distributions verticales des températures (°C) et de la saturation en oxygène dissous (%) au point A au début de l'année 2016.
- Figure 11** : Distributions verticales de la température (°C) et de la saturation en oxygène dissous (%) au point A : fin d'hiver, été et fin automne 2015 et 2016.
- Figure 12** : Profils de température (°C) en fonction de la profondeur au point A en 2016.
- Figure 13** : Profils de saturation en oxygène (%) en fonction de la profondeur au point A en 2016.
- Figure 14** : Evolution de la saturation en oxygène dissous (%) au point A, de 2014 à 2016.
- Figure 15** : Evolution des températures (°C) à 2 m au point A du lac d'Aiguebelette - Comparaison 2015 et 2016.
- Figure 16** : Variation saisonnière de la saturation en oxygène dissous (%) à 2 m au point A du lac d'Aiguebelette – Comparaison 2015 et 2016.
- Figure 17** : Variation saisonnière de la saturation en oxygène dissous (%) à 60 m au point A du lac d'Aiguebelette – Comparaison 2015 et 2016.
- Figure 18** : Distributions de la conductivité spécifique (mS.cm<sup>-1</sup>) au point A, en 2016.
- Figure 19** : Variation saisonnière de la conductivité (µS.cm<sup>-1</sup>) au point A en 2016 : à 2 m et 65 m de profondeur.
- Figure 20** : Variation saisonnière de la Transparence (m) avec le disque de Secchi au point A en 2016 (rouge), 2015 (bleu) et 2014 (vert).
- Figure 21** : Transparence de l'eau avec le disque de Secchi et la biomasse phytoplanctonique au point A en 2016.
- Figure 22** : Distributions verticales des concentrations en nitrate (mgN.L<sup>-1</sup>), phosphore total (µgP.L<sup>-1</sup>) et silice (mgSiO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>) e n fin d'hiver 2016.
- Figure 23** : Concentration en azote nitrique (N-NO<sub>3</sub>-) en 2016 dans l'eau des couches superficielles du lac (2, 10 et 20 m), Aiguebelette, Point A.
- Figure 24** : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) en 2016 dans l'eau des couches superficielles du lac (2, 10 et 20 m), Aiguebelette, Point A.
- Figure 25** : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO<sub>43</sub>-) en 2016 dans les eaux du fond du lac à 65 m, Aiguebelette, Point A.
- Figure 26** : Concentration en silice en 2016 dans les couches superficielles (2, 10 et 20 m) et au fond, Aiguebelette, Point A.
- Figure 27** : Distribution verticale des concentrations en chlorure (mgCl.L<sup>-1</sup>) en fin d'hiver 2016.
- Figure 28** : Evolution des concentrations moyennes pondérées hivernales en nitrate (mgN.L<sup>-1</sup>) de 1989 à 2016.
- Figure 29** : Evolution de la classe de qualité en fonction des concentrations moyennes hivernales en phosphore total (mgP.L<sup>-1</sup>) de 1988 à 2016.
- Figure 30** : Evolution des concentrations moyennes pondérées hivernales en chlorure (mg.L<sup>-1</sup>) de 1988 à 2016.
- Figure 31** : Evolution 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 2016.
- Figure 32** : Evolution de la classe de qualité de l'eau en fonction de la transparence minimale annuelle (m) mesurée avec le disque de Secchi blanc de 30 cm au point A de 1988 à 2016.
- Figure 33** : Evolution des températures (°C) à 2 m de profondeur au point A de 1988 à 2016.
- Figure 34** : Evolution des températures (°C) à 60 m de profondeur au point A de 1991 à 2016.
- Figure 35** : Evolution des températures moyennes annuelles (°C) à 60 m de profondeur au point A de 1988 à 2016.
- Figure 36** : Evolution des saturations en oxygène dissous (%) à 2 m de profondeur au point A de 1988 à 2015.
- Figure 37** : Evolution de la saturation en oxygène dissous (%) à 60 m de profondeur au point A de 1991 à 2016.
- Figure 39** : Variations saisonnières de la biomasse des principaux taxons du phytoplancton en 2016.
- Figure 40** : Variations saisonnières de la biomasse par classes de taille en 2016.
- Figure 41** : Evolution interannuelle des principales classes algales (moyenne annuelle des moyennes mensuelles des biomasses).
- Figure 42** : Evolution interannuelle de l'indice de diversité de Shannon.
- Figure 43** : Evolution de l'indice de Brettum.
- Figure 44** : 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.
- Figure 45** : Evolution de la concentration en Chlorophylle a représentée par les Chlorophycées entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.
- Figure 46** : Evolution de la concentration en Chlorophylle a représentée par les Cyanobactéries entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.
- Figure 47** : Evolution de la concentration en Chlorophylle a représentée par les Diatomées entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.
- Figure 48** : Evolution de la concentration en Chlorophylle a représentée par les Cryptophycées entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.

PRESENTATION ET CARACTERISTIQUES DU LAC D'AIGUEBELETTE

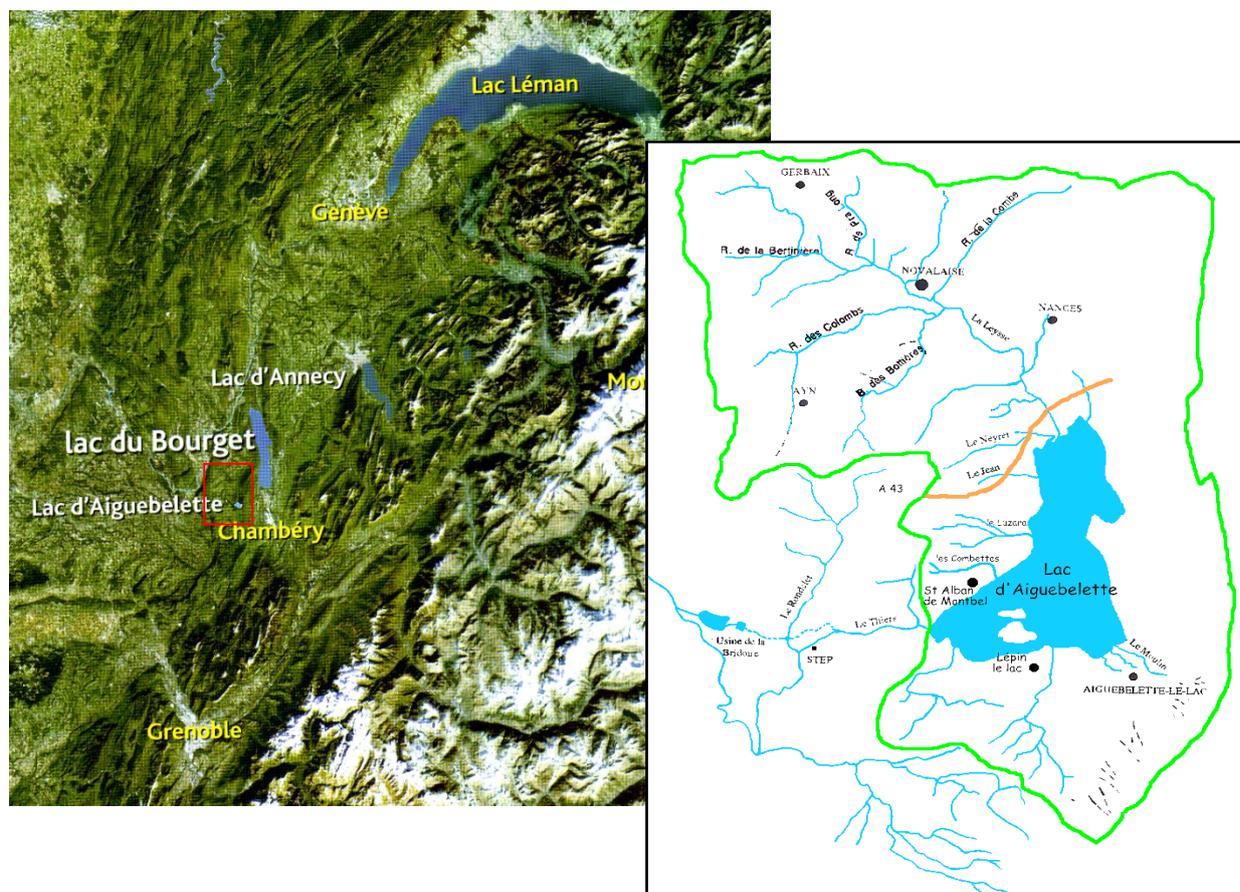


Figure 3 : Situation géographique et bassin versant du lac d'Aiguebelette

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 Laysse de Novalaise
- Exutoire : canal du Thiers

**CE QU'IL FAUT RETENIR POUR 2016**

Le suivi 2016 de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette est le premier réalisé par l'UMR CARTEL (INRA –USMB) après la longue série réalisée par Gérard Paoloni. Le suivi a été réalisé avec le bateau mis à disposition par la CCLA et a été composé de 10 campagnes de prélèvement. Le nombre de sorties a été réduit par rapport aux campagnes précédentes pour des raisons pratiques de disponibilité du personnel INRA. Les résultats présentés dans ce rapport s'inscrivent dans la continuité des campagnes précédentes sur l'état trophique de cet écosystème, en cohérence avec l'analyse réalisée en 2006 sur "*la qualité des eaux des cours d'eau et la quantification des apports en phosphore au lac d'Aiguebelette*". Le lac d'Aiguebelette voit son niveau de Phosphore total stable depuis les années 2010, mais il est nécessaire de poursuivre les efforts visant à continuer à maîtriser les apports en phosphore, afin d'assurer la préservation d'un écosystème lacustre remarquable. Le suivi allégé joue pleinement son rôle d'outil de gestion en mesurant la tendance générale de l'évolution trophique.

**Météorologie** : L'hiver 2015-2016 fut particulièrement chaud (+11% par rapport à la moyenne 2004-2015). Le reste de l'année, l'évolution de la température se situe globalement dans la moyenne. Pour la pluviométrie, l'année se scinde en deux, un premier semestre excédentaire et un second déficitaire. Au final, l'année se termine avec un déficit de 5 % par rapport à la moyenne 2004-2015, avec un mois de décembre où aucune précipitation ne fut relevée. Pour l'insolation (et le rayonnement), l'année 2016 affiche un léger déficit (- 4,4 %) par rapport à la moyenne 1981-2010.

**Phytoplancton** : La composition et la biomasse de ce compartiment sont indicateurs d'un lac considéré comme étant oligotrophe. L'évolution interannuelle indique que depuis 2009 la biomasse algale tend à diminuer et l'indice de qualité Brettum est plus élevé : le lac est qualifié de méso-oligotrophe.

**Physico-chimie** : L'année 2016 se caractérise par la faible importance du brassage hivernal et donc une absence de ré-oxygénation des couches profondes de la colonne d'eau. Les concentrations en oxygène dissous à 60 m sont inférieures à 1 mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> pendant toute l'année. Les conditions climatiques de l'hiver 2015-2016 ont conduit à un brassage partiel de la colonne d'eau jusqu'à une vingtaine de mètres seulement, ce qui n'a pas permis un refroidissement de la couche profonde. En 2016, la température annuelle moyenne à 60 m de profondeur affiche la valeur la plus élevée de la chronique 1988-2015 avec 5,26 °C. La transparence moyenne de 4,5 m en 2016 reste cohérente avec les valeurs des années précédentes, même si c'est une des valeurs la plus faible de la série, mais permet de rester dans la même valeur de la classe de qualité "bonne". La concentration moyenne annuelle pondérée de nitrate est la valeur la plus basse depuis 2003. Pour le phosphore total, la concentration moyenne pour l'année 2016 s'élève à 9,4 µgP.L<sup>-1</sup> : les concentrations en phosphore total ont des valeurs inférieures à 10 µgP/L depuis 2010, donc un statut de type oligotrophe. Avec une valeur de moyenne hivernale de 7,0 mgCl.L<sup>-1</sup>, les concentrations moyennes hivernales de chlorure restent à des niveaux très inférieurs aux valeurs toxiques citées dans la littérature et sont globalement stables depuis le début du suivi.

L'ensemble des paramètres suivis indique bien une stabilité des principaux paramètres biologiques et chimiques de l'écosystème ; le lac est en voie de réoligotrophisation, en étant soumis aux variabilités inter-annuelles.

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 CARTELL (INRA – 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 :

- Permettre aux collectivités locales, maîtres d'ouvrage des principaux travaux d'assainissement, de 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 lourdes. 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 CARTELL, laboratoire INRA de Thonon-les-Bains en association avec l'Université de Savoie Mont Blanc, pour le compte de la Communauté de Commune du Lac d'Aiguebelette et répond aux termes de la convention signée entre la CCLA et le CARTELL.

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.

## **1 MATERIEL ET METHODE**

### **1.1 OBJECTIF**

Le suivi allégé a pour but, à travers des paramètres correctement choisis, de suivre qualitativement le sens d'évolution de l'état trophique d'un 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 du lac.

### **1.2 MATERIEL**

- ⇒ Disque de SECCHI (à quadrant noir et blanc de 20 cm de diamètre)
- ⇒ Une bouteille d'échantillonnage intégré, l'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 et conductivité
- ⇒ Une sonde fluorimétrique immergeable BBE-Moldaenke

### 1.3. PROTOCOLE ET METHODOLOGIE

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 : N 45°33.040' – E 5°48.054' ; environ 70 mètres de profondeur).



Source : IGN

Les paramètres et les niveaux 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 l'INRA, 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 ( $\text{NO}_3^-$ ), le phosphore (orthophosphates  $\text{PO}_4^{3-}$ , phosphore total) et la silice,
- Le chlorure,
- La transparence,
- La chlorophylle a,
- L'oxygène dissous et la température,

##### 1.3.1.1. Nitrate, phosphore et silice

**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 et les orthophosphates constituent les formes minérales solubles directement assimilables par les producteurs primaires. La silice est un nutriment essentiel des diatomées qui l'utilisent pour la construction de leurs frustules.

**Méthode** : Les échantillons sont prélevés à plusieurs profondeurs discrètes (2, 15, 40, 60 et 65 m jusqu'en 2015 puis 2, 10, 20, 40, 60, 65 en 2016), 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 l'INRA depuis 2016. La silice fait partie du suivi allégé du lac d'Aiguebelette en 2016. Elle est dosée par l'INRA sur les mêmes profondeurs que le nitrate et les orthophosphates, selon la norme NF T 90-007.

##### 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 en période hivernale sur les mêmes profondeurs que les échantillonnages d'azote et de phosphore. Les analyses normalisées (NF EN ISO 10304-1) sont réalisées par l'INRA.

### 1.3.1.3. Transparence

**Principe** : Elle est fonction de la quantité de matières en suspension dans l'eau, de la biomasse phytoplanctonique. 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 effectue 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 l'INRA de Thonon suivant la méthode normalisée NFT 90-117 (meth.Laurenzen).

Une autre approche de la biomasse phytoplanctonique est abordée par l'utilisation d'une sonde fluorimétrique BBE-Moldaenke. La sonde bbe spectrofluorimétrique est une sonde immergeable qui permet d'obtenir la concentration en  $\mu\text{g}$  équivalent de chl a.L<sup>-1</sup>, de diverses classes algales en continu le long de la colonne d'eau. Le principe de mesure repose sur les capacités de fluorescence des algues phytoplanctoniques. La sonde est en effet capable de différencier les principaux groupes phytoplanctoniques (diatomées, dinoflagellés, algues vertes, cryptophycées, cyanobactéries riches en phycocyanine et un groupe mixte riche en phycoérythrine) sur la base de leurs caractéristiques pigmentaires propres (Moldaenke 2002).

Les algues d'un même groupe phytoplanctonique, contiennent une qualité et quantité de pigments photosynthétiques similaires. Ainsi, leur spectre d'excitation (avec une longueur d'onde d'émission fixée à 680 nm) est significatif pour chaque classe algale. Il est donc possible de différencier les différents groupes d'algues par leur fluorescence respective et d'obtenir leur concentration, en  $\mu\text{g}$  équivalent de chl a /L, en continu le long de la colonne d'eau. La fluoroprobe utilise 5 diodes émettant à différentes longueurs d'onde (450 nm, 525 nm, 570 nm, 590 nm et 610 nm) pour l'excitation de pigments accessoires propres à chaque groupe phytoplanctonique (Tableau II). Chaque classe microalgale ayant une empreinte spécifique, la composition pigmentaire étant différente suivant le groupe algal considéré, il est alors possible de calculer la contribution relative de chaque taxon (chlorophytes, cryptophytes, cyanobactéries, diatomées,) à la biomasse totale (Moldaenke 2002, Beutler et al., 2002, Leboulanger et al., 2002).

**Tableau 3** : Pigments caractéristiques des principales classes algales étudiées et longueur d'onde d'excitation (pics d'absorption maximaux) de ces pigments Moyennes

Classes microalgales	Pigments	Longueur d'onde d'excitation (nm)
Chlorophycées	Chl <i>a</i> , <i>b</i> , caroténoïde	450 nm
Cyanobactéries	Chl <i>a</i> , phycocyanine	610 nm
Diatomées	Chl <i>a</i> , <i>c</i> , xanthophylle Fucoxanthépidine	525 nm
Cryptophycées (+cyanobactéries riches en phycoérythrine comme <i>Planktothrix rubescens</i> )	Chl <i>a</i> , <i>c</i> , phycoérythrine	570-590 nm

**Méthode** : nous établissons les profils des concentrations des principales classes d'algues présentes dans le lac de 0 à 40 m de profondeur à partir desquels sont définies les variations saisonnières et verticales des concentrations.

#### 1.3.1.5. Oxygène dissous

**Principe** : L'activité chlorophyllienne des végétaux enrichit les couches supérieures de l'eau en oxygène ; dans les couches inférieures où la lumière ne pénètre plus, la respiration des micro-organismes diminue le taux d'oxygène. Cette activité biologique entraîne ainsi, grâce à la photosynthèse, une sursaturation en oxygène dans les couches superficielles et, en raison notamment de la minéralisation de la matière organique, une sous-saturation en oxygène dans les couches profondes.

**Méthode** : un profil de concentration en oxygène dissous (en mg.L<sup>-1</sup> et en % de saturation) est réalisé à la verticale de la profondeur maximale du lac à l'aide d'une sonde multi-paramètres. Les indices annuels sont calculés aux trois niveaux de mesure prédéfinis. Ils représentent les moyennes pondérées des sursaturations à 2 m et au métalimnion et de la sous saturation à 60 m. L'Oxygène dissous est analysé selon méthode de Winkler sur profondeurs 2, 10, 20, 30, 40, 50, 60 et 65 en 2016.

#### 1.3.1.6. Phytoplancton

Le phytoplancton étudié a été récolté de janvier à décembre 2016 au cours des 10 campagnes de prélèvement dans la couche 0-20 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 à 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 de l'INRA (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 algales ou de colonies par millilitre d'eau brute puis transformées en biomasse (µg/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'éco-système.

#### 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 au moment du brassage hivernal : les nitrates en mgN.L<sup>-1</sup> et le phosphore total en mgP.L<sup>-1</sup>,
- ⇒ Teneur en chlorures en mgCl.L<sup>-1</sup> au moment du brassage hivernal,
- ⇒ Transparence moyenne annuelle en mètres,

- ⇒ Concentration moyenne annuelle en chlorophylle a (en  $\text{mgchl}a.\text{m}^{-3}$ ),
- ⇒ Sursaturation en oxygène à 2 mètres (en  $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ ),
- ⇒ Sursaturation maximale en oxygène dans le métalimnion (en  $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ ),
- ⇒ Sous-saturation en oxygène à 60 mètres (en  $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$ ).

#### **1.3.3.1. Teneurs moyennes en nitrate et phosphore total**

Ces indices calculés au moment du brassage hivernal représentent les réserves maximales du lac en nutriments lorsque la consommation est minimale et l'homothermie presque totale. Les moyennes retenues sont les moyennes pondérées des concentrations mesurées à 2, 15, 40, 60 et 65 mètres en hiver jusqu'en 2015, puis de 2, 10, 30, 40, 60, 65 en 2016.

#### **1.3.3.2. Chlorure**

Comme pour les fertilisants, la concentration en chlorures est calculée au moment du brassage hivernal. L'indice annuel retenu est la moyenne pondérée des concentrations mesurées à 2, 15, 40, 60 et 65 mètres en hiver jusqu'en 2015, puis de 2, 10, 30, 40, 60, 65 en 2016.

#### **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 Météociel (<http://www.meteociel.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). Conformément aux recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui considère les moyennes sur trente ans comme étant les valeurs « Normales », les paramètres seront comparés à leurs moyennes sur la période 1981 - 2010.

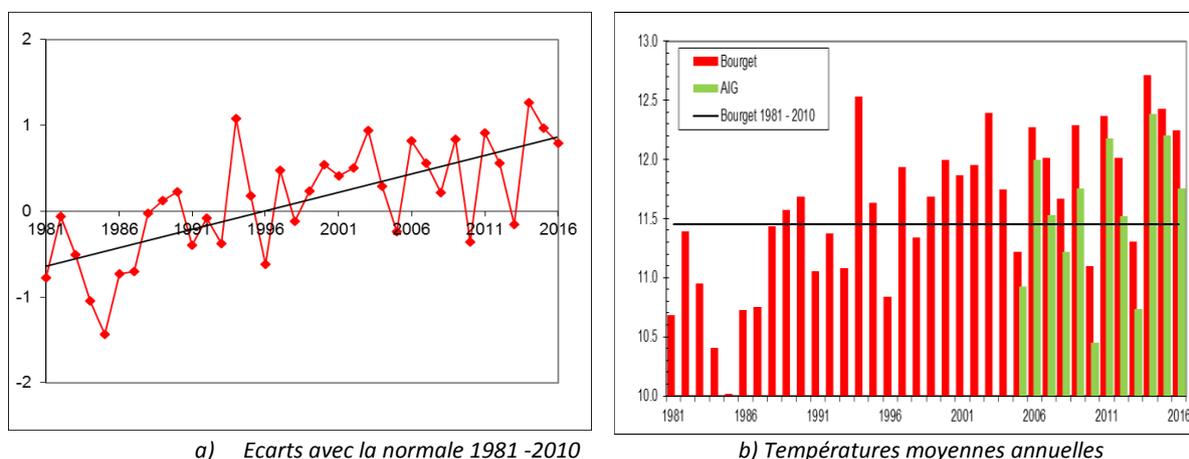
### **2.1. TEMPERATURES**

#### **2.1.1. Moyennes Annuelles**

A la station météorologique du Bourget, en 2016 la température moyenne annuelle est encore une fois au-dessus de la normale 1981-2010 (12,24 °C vs 11,45 °C), soit + 7%. La tendance depuis 1981 est donc toujours à la hausse. La température moyenne annuelle à la station d'Aiguebelette est inférieure à celle du Bourget (11,75 °C vs 12,24 °C), l'écart entre les deux stations (0,49°C cette année) se situe dans la moyenne de ces écarts (0,42 °C) depuis 2005.

**Tableau 2:** Moyennes annuelles des températures de l'air en °C

	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Normale 1981-2010
Bourget	<b>12,24</b>	12,42	12,72	11,30	12,02	12,37	11,09	11,45
Aiguebelette	<b>11,75</b>	12,20	12,39	10,74	11,52	12,18	10,45	

**Figure 2 :** Moyennes annuelles des températures de l'air (°C)  
Stations d'Aiguebelette et du Bourget de 1981 à 2016.

### 2.1.2. Variations saisonnières

Les données relevées à la station du Bourget montrent que l'hiver 2015-2016 est encore un hiver doux. En effet, il est observé seulement une journée où les moyennes journalières sont inférieures ou égales à 0°C entre novembre 2015 et mars 2016. Il en est de même pour celles relevées au lac d'Aiguebelette.

**Tableau 3:** Nombre de jour où les températures moyennes journalières sont inférieures à 0 °C pour les stations du Bourget et d'Aiguebelette entre 2010 et 2016.

	Bourget	Aiguebelette
2009 - 2010	30	45
2010 - 2011	23	41
2011 - 2012	19	22
2012 - 2013	18	31
2013 - 2014	8	3
2014 - 2015	2	10
<b>2015 - 2016</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

**Tableau 4 :** Température moyennes mensuelle de l'air (°C) en 2016 : Stations d'Aiguebelette et du Bourget -  
Moyennes des années 1981 – 2010 : Station du Bourget.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Aiguebelette</b>	5,3	5,8	6,1	10,2	13,7	18,5	21,1	20,8	18,8	11,1	7,2	2,6
<b>Bourget</b>	5,4	6,6	7,2	11,1	14,6	19,3	21,9	21,2	19,4	11,1	7,5	1,6
<b>Bourget 1981-2010</b>	2,2	3,6	7,4	10,7	15,3	18,7	21,0	20,4	16,5	12,1	6,3	3,1

Les températures de l'air à la station d'Aiguebelette suivent logiquement les mêmes variations saisonnières que celles de la station du Bourget, présentant tout le long de l'année 2016 des moyennes légèrement plus basses sauf en décembre.

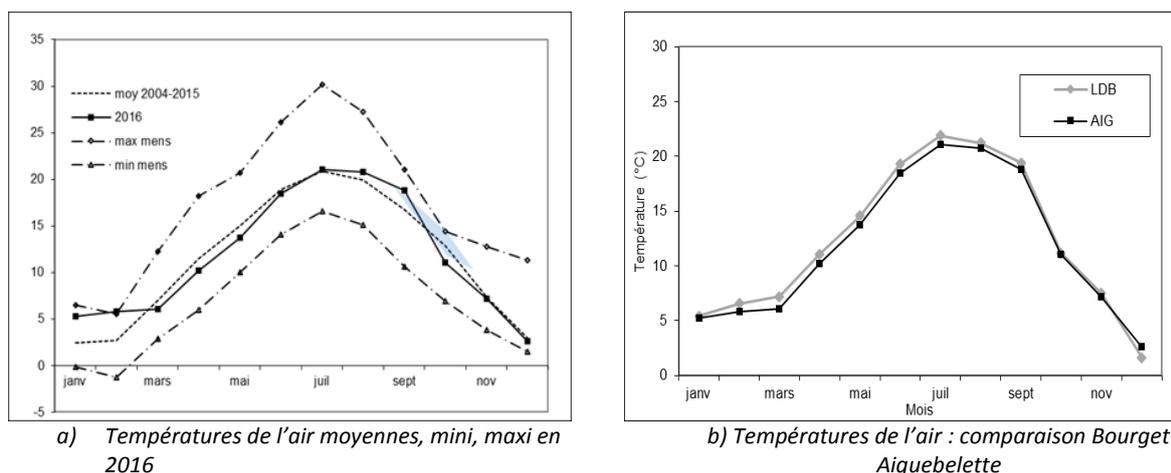


Figure 3: Températures de l'air (°C) Station Aiguebelette.

## 2.2. PRECIPITATIONS

### 2.2.1. Cumul annuel

Pour 2016, au Bourget le cumul pluviométrique est proche de la normale 1991-2010 (-3 %). A Aiguebelette, la pluviométrie de 2016 est dans la moyenne, et est la même que celle de 2010 mais avec un nombre de jours de pluie moindre.

Tableau 5 : Précipitations annuelles aux stations du Bourget et du lac d'Aiguebelette

		2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Normale 1981-2010
Bourget	mm	<b>1179</b>	1322	1231	1472	1172	1039	1020	1221,5
Aiguebelette	mm	<b>1250</b>	1334	1564	1669	1493	1142	1255	
Nombre de jours de pluie	jour	<b>140</b>	127	153	158	147	129	173	
Hauteur de pluie moyenne	mm/j	<b>9,1</b>	10,8	9,8	10,9	9,6	8,2	7,4	

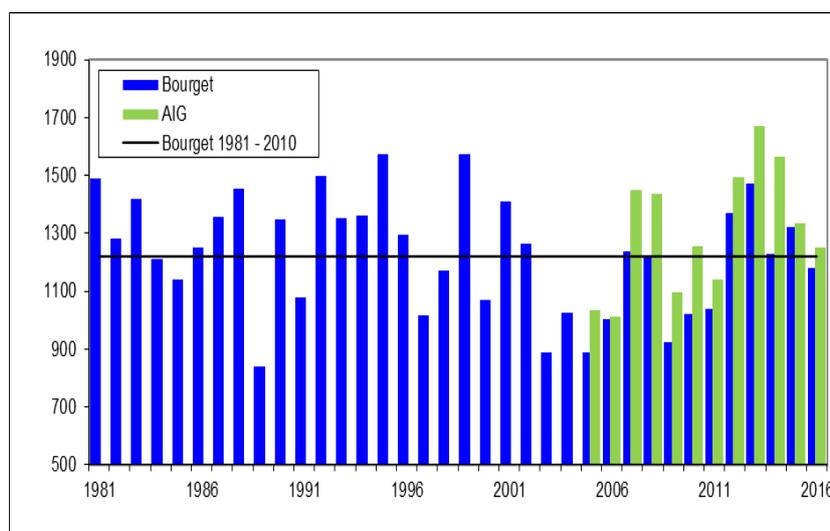


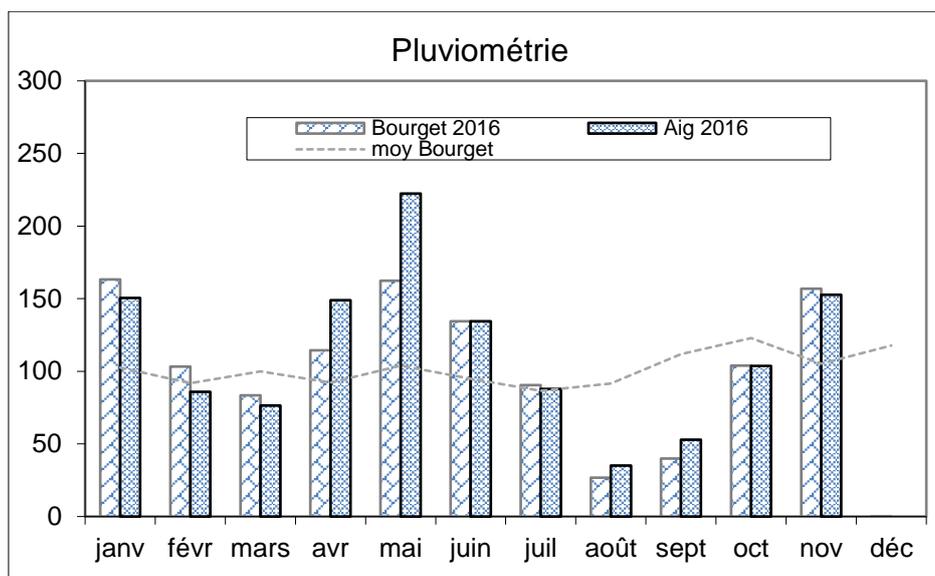
Figure 4 : Précipitations annuelles stations du Bourget et d'Aiguebelette

### 2.2.2. Variations saisonnières

Le second trimestre 2016 fut particulièrement pluvieux, 410 mm, pour une normale de 291 mm. En décembre aucune pluviométrie ne fut relevée sur les deux stations, qui devient donc le mois de décembre le plus sec depuis 1974.

**Tableau 6:** Précipitations mensuelles en 2016 – station du Bourget et d'Aiguebelette  
Moyennes 1981- 2010 à la station du Bourget.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Aiguebelette</b>	158	86	76	149	222	134	88	35	53	104	153	0
<b>Bourget</b>	163	103	84	114	162	134	91	27	40	104	157	0
<b>Bourget 1981-2010</b>	103	92	100	92	104	95	89	92	112	123	105	118



**Figure 5:** Précipitations mensuelles en 2016 – station du Bourget et d'Aiguebelette et moyenne 1981- 2010 à la station du Bourget.

Entre les deux stations météorologiques, nous retrouvons les mêmes périodes humides et les mêmes périodes sèches

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

La cote 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 8 nous constatons que les consignes sont globalement respectées. Le lac atteint sa cote maximale de 374,05 m, le 24 avril suite à un épisode pluvieux des trois jours précédents de près de 50 mm. Suite à un épisode pluvieux (100 mm) d'une semaine (entre le 13 et 19 juin) le niveau du lac est en moyenne 22 cm au-dessus de la consigne pendant près d'une semaine. Conformément à la consigne la cote minimale (373,26 m) est atteinte fin septembre et en octobre. L'amplitude maximale relevée en 2016 entre les deux extrêmes est de 79 cm.

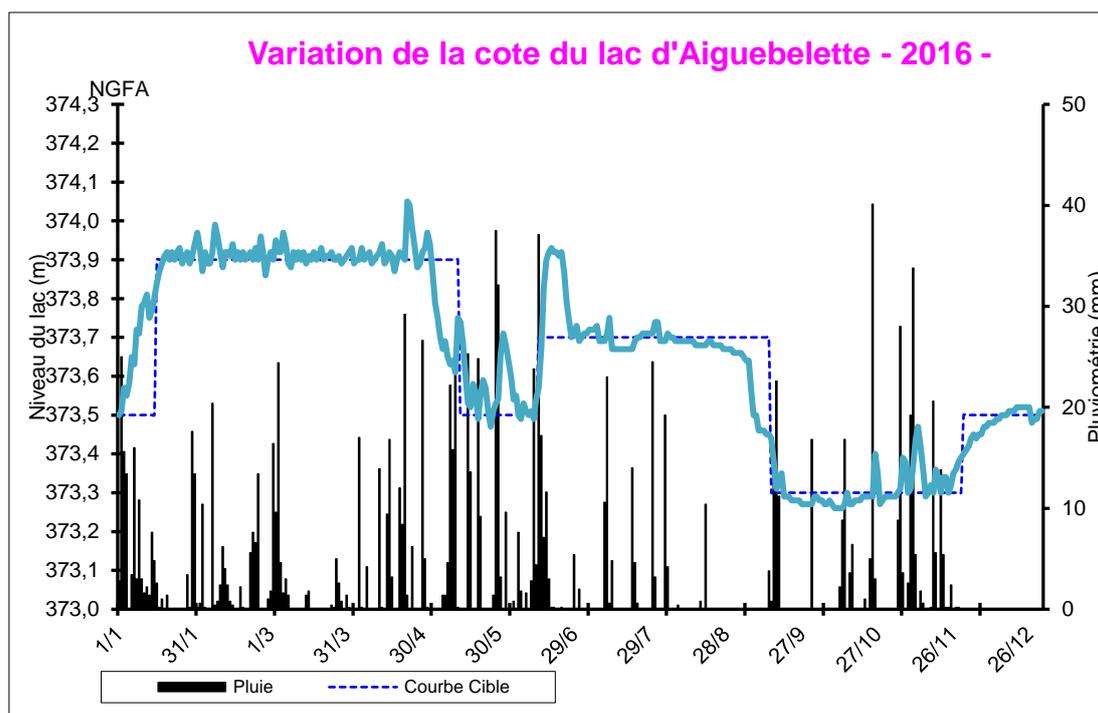


Figure 6: Précipitations journalières, niveau du lac d'Aiguebelette et consigne de niveau en 2016

### 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 2016 affiche un petit déficit (- 4,4 %) par rapport à la moyenne 1981-2010. Par contre à Aiguebelette, le déficit est de 11,6 % par rapport à la moyenne 2005-2015.

Tableau 7: Insolation annuelle à la station du Bourget et moyenne 1981-2010 et rayonnement global du lac d'Aiguebelette

		2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Moyenne 1981-2010
Bourget	(h)	1816	2005	1796	1736		2089	1831	1900
Aiguebelette	( $KJ.cm^{-2}$ )	379	423	424	407	423	455	411	

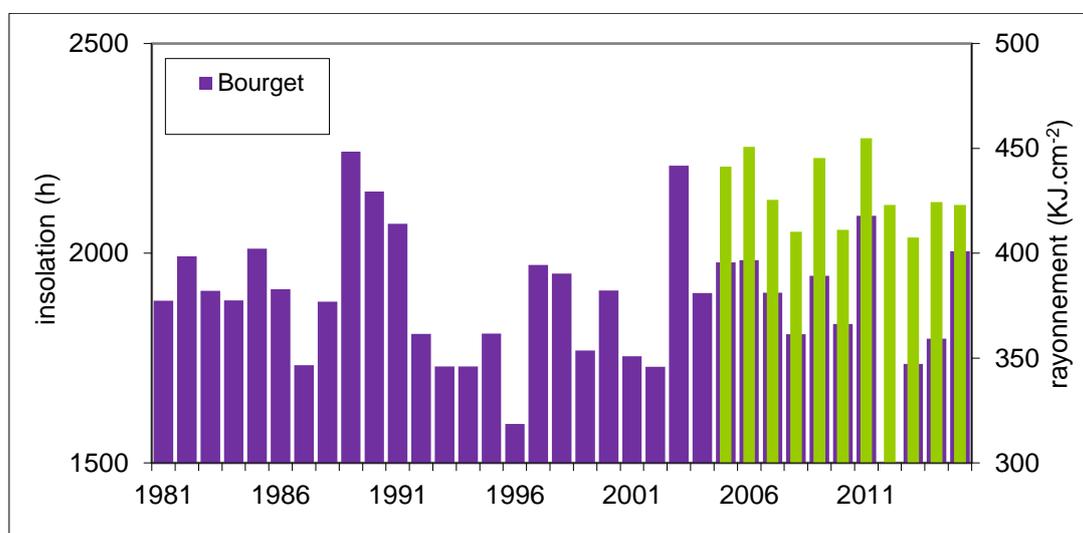


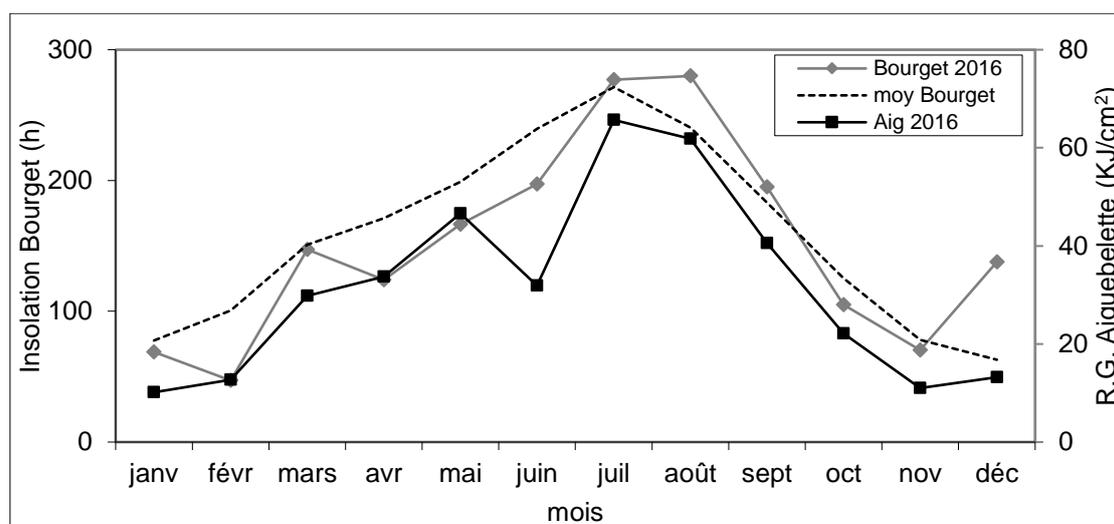
Figure 7 : Durée d'insolation (h) au Bourget et Rayonnement Global ( $kJ.cm^{-2}$ ) à Aiguebelette.

### 2.3.2. Variation saisonnière

Au Bourget, nous constatons que le premier semestre 2016 est globalement déficitaire. Puis succède un été excédentaire. Notons pour le mois de décembre une insolation double de la normale 1981-2010.

**Tableau 8:** Insolation mensuelle en 2016 – station du Bourget et Rayonnement Global d'Aiguebelette et normale 1981- 2010 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>	10,1	12,7	29,8	33,7	46,6	31,9	65,7	61,9	40,6	22,2	11	13,2
<b>Bourget (h)</b>	69	47	147	124	167	197	277	280	195	105	70	138
<b>Bourget 1981-2010</b>	78	101	151	171	199	239	271	240	183	125	78	63



**Figure 8:** Comparaison des durées d'insolation mensuelle (h) de la normale 1981-2010 à la station du Bourget en 2016 et du Rayonnement Global mensuel à Aiguebelette.

### 2.4. EN CONCLUSION

Au Bourget comme au lac d'Aiguebelette, l'hiver 2015-2016 (décembre, janvier, février) fut particulièrement chaud (+11% par rapport à la moyenne 2004-2015). Le reste de l'année, l'évolution de la température se situe globalement dans la moyenne. Pour la pluviométrie l'année se découpe en deux, un premier semestre excédentaire et le second déficitaire. Au final, l'année se termine avec un déficit de 5 % (par rapport à la moyenne 2004-2015), avec un mois de décembre où aucune précipitation ne fut relevée sur les deux sites. Pour l'insolation (et le rayonnement), l'année 2016 affiche un petit déficit (- 4,4 %) par rapport à la moyenne 1981-2010.

### 3. CAMPAGNES DE TERRAIN

La répartition des dates des 10 campagnes effectuées au cours de l'année 2016 est précisée dans le tableau ci-dessous.

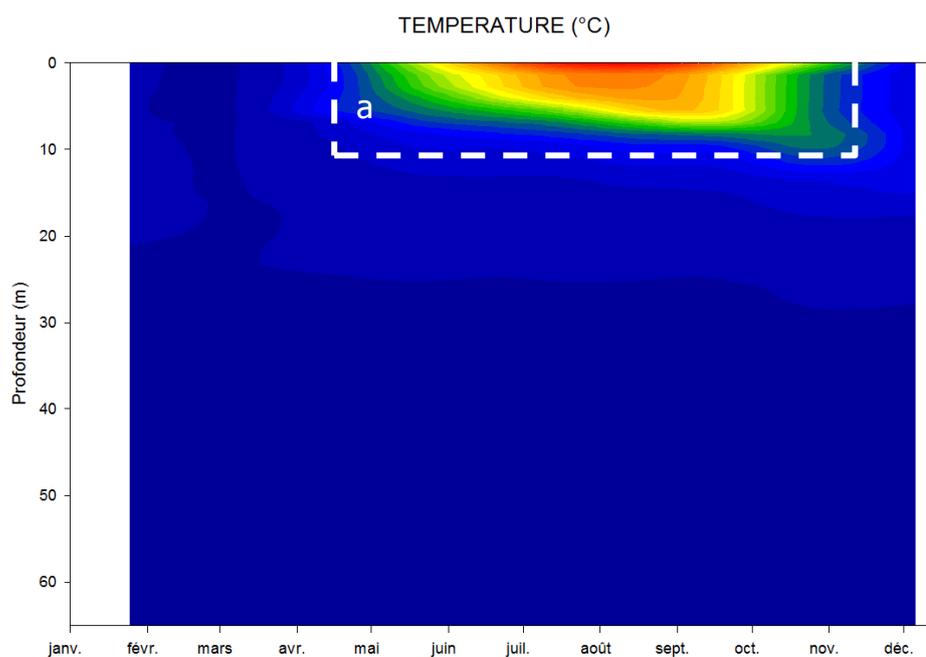
**Tableau 9** : Nombre et répartition des campagnes de mesures et de prélèvements pour l'année 2016.

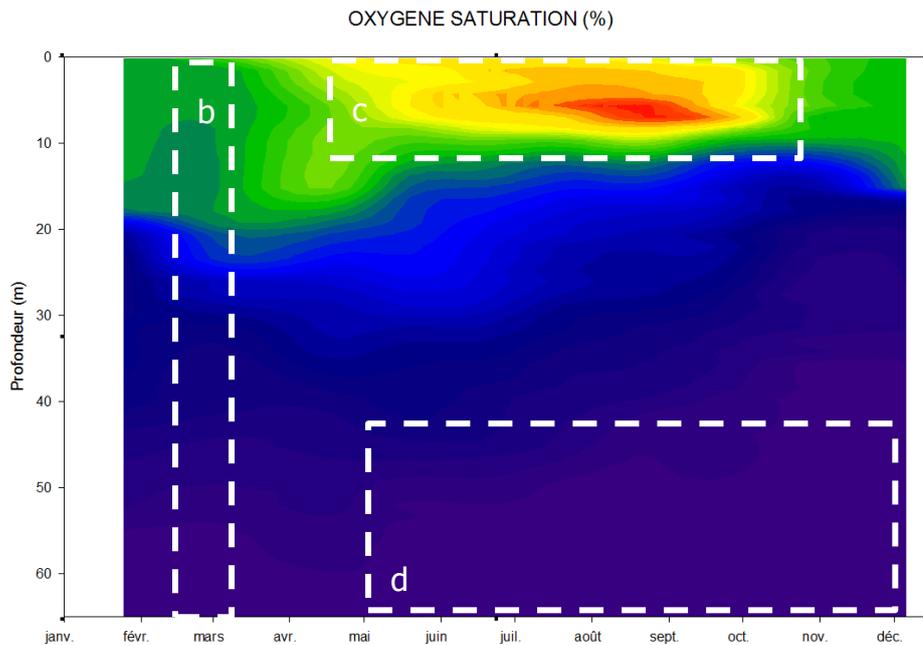
<i>N° de campagne</i>	<i>date de prélèvement</i>	<i>multiparamètre</i>
1	25/01/2016	Sea-Bird CT
2	08/03/2016	Sea-Bird CT
3	27/04/2016	INRA- RBR
4	17/05/2016	INRA- CTM214
5	15/06/2016	INRA- CTM214
6	26/07/2016	INRA- CTM214
7	17/08/2016	INRA- CTM214
8	21/09/2016	INRA- CTM214
9	19/10/2016	INRA-CTD09
10	06/12/2016	INRA- CTM214

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

#### 4.1 TEMPERATURE ET OXYGENE DISSOUS

La température est l'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.





**Figure 9** : Distributions des températures (°C), de la saturation en oxygène dissous (%) au point A, en 2016.

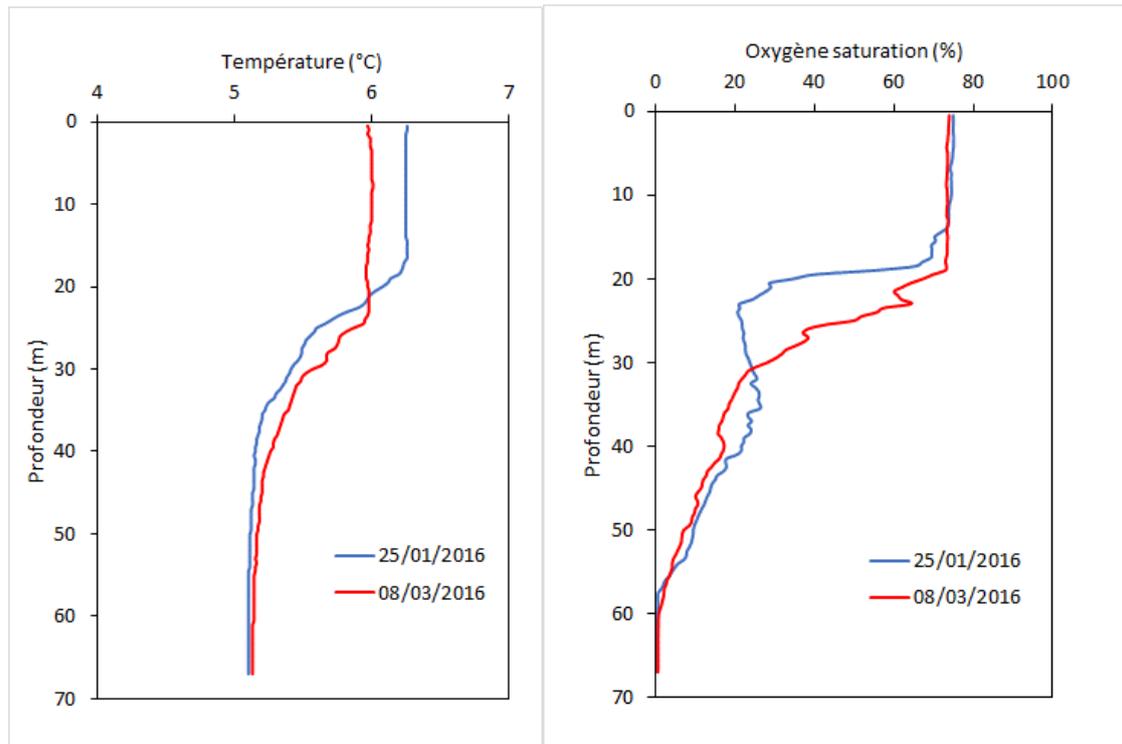
Les évolutions saisonnières des principaux paramètres physico-chimiques température et oxygène dissous mesurés *in situ* sont représentées sur les graphiques ci-dessus.

Ils permettent de mettre en évidence :

- la stratification thermique dans les couches supérieures (a) de mai à novembre et une température homogène froide dans les couches profondes ;
- le brassage hivernal incomplet de la colonne d'eau jusqu'à 20 – 25 m (b), l'activité photosynthétique dans les couches supérieures avec la production d'oxygène et la consommation des éléments dissous (c), l'activité microbienne dans la zone profonde avec la consommation d'oxygène dissous et le relargage dans la zone anoxique.

#### 4.1.1. Distributions verticales

L'hiver 2016 a donné lieu à une homogénéisation partielle de la colonne d'eau jusqu'à environ 20-25 mètres. A la période du maximum d'homogénéisation des eaux le 8 mars 2016, la différence de température entre la surface et le fond (5,99 – 5,13 °C) est néanmoins relativement faible (Figures 2 et 4). Entre le 8 mars 2016 et le 27 avril 2016, les conditions climatiques, notamment le réchauffement de l'air et l'augmentation de l'insolation, s'accompagnent d'une augmentation des températures des eaux de surface (de 5,99 à 11,28 °C) et permettent le démarrage de la production phytoplanctonique (augmentation des concentrations en oxygène dissous de 9,39 à 11,23 mgO<sub>2</sub>/L à 2 m de profondeur). Cette barrière thermique va progressivement bloquer les échanges verticaux et isoler l'hypolimnion. Le 8 mars, la concentration en oxygène dissous à 65 m de profondeur est faible. Elle est de 1,06 mgO<sub>2</sub>/L.

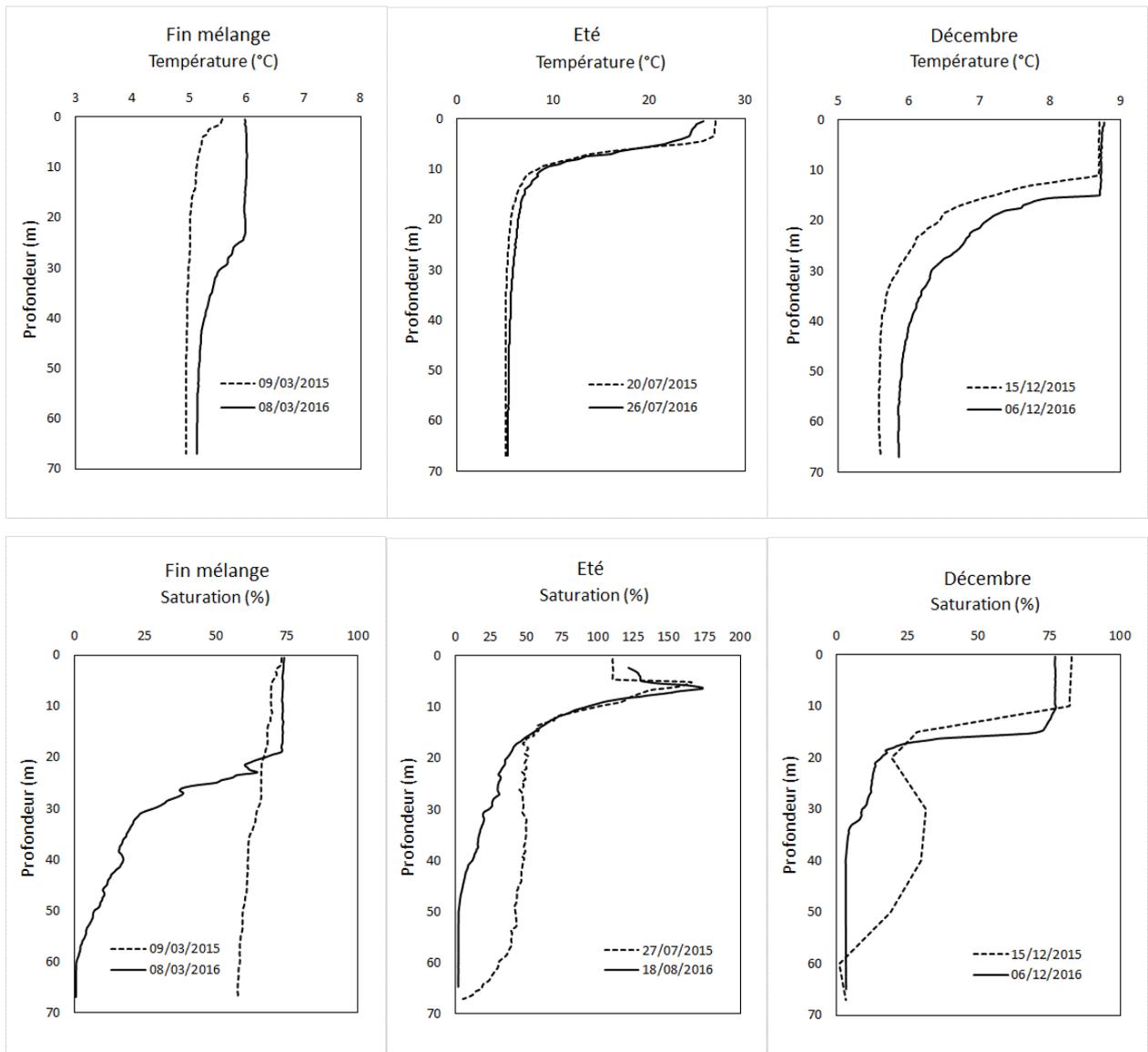


**Figure 10** : Distributions verticales des températures (°C) et de la saturation en oxygène dissous (%) au point A au début de l'année 2016.

D'avril à septembre, la distribution verticale de la température entraîne une stratification de l'oxygène dissous en 3 couches superposées qui présentent des concentrations différentes (Figures 11 et 13) :

- L'épilimnion entre 0 et 5 m.
- Le métalimnion entre 5 et 15 m : la distribution verticale de l'oxygène passe par un maximum de 174 % de la saturation le 17 août 2016.
- L'hypolimnion entre 20 m et le fond : les concentrations en oxygène diminuent progressivement avec la profondeur.

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 15 mètres d'épaisseur au mois de décembre 2016 (Figures 11 et 12). Dans l'hypolimnion la zone d'anoxie ( $< 1 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ) est de plus en plus importante. Elle se situe en dessous de 60 m à l'issue du brassage et en dessous de 32,5 m de profondeur le 6 décembre 2016 alors que cette limite de concentration se situait à 56 m en 2015 (Figures 13 et 14).



**Figure 11** : Distributions verticales de la température (°C) et de la saturation en oxygène dissous (%) au point A : fin d'hiver, été et fin automne 2015 et 2016.

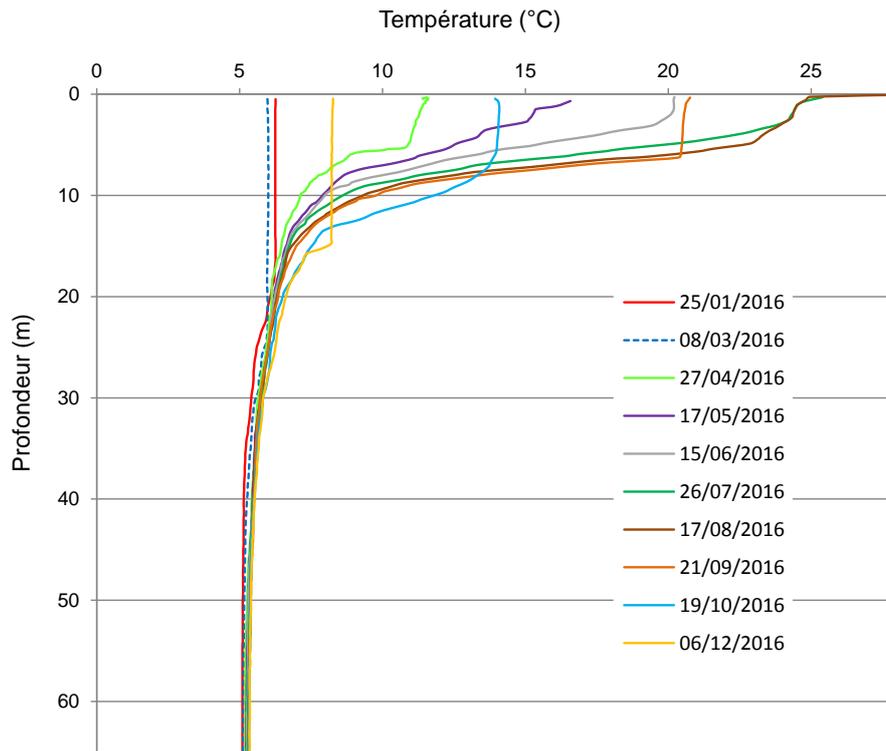


Figure 12 : Profils de température (°C) en fonction de la profondeur au point A en 2016

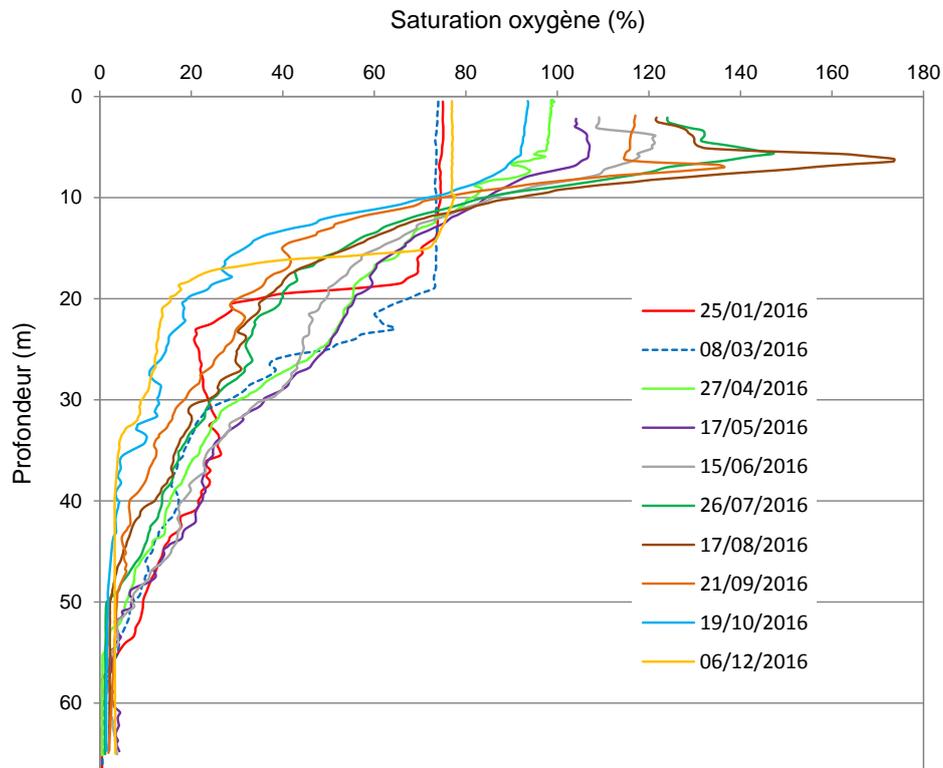
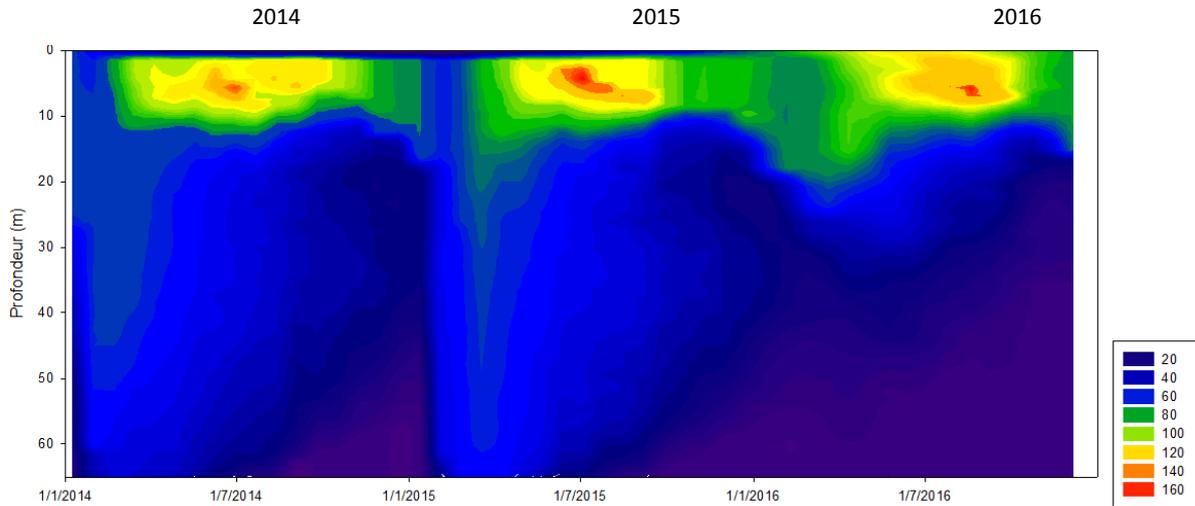


Figure 13 : Profils de saturation en oxygène (%) en fonction de la profondeur au point A en 2016  
 (Profil de sonde pour les mesures en oxygène dissous corrigé par une homothétie avec les mesures effectuées en laboratoire selon la méthode de Winkler sur des échantillons de profondeur définie)

La comparaison des distributions verticales avec les années précédentes est illustrée par le graphe de la figure 14. On remarque la faible importance du brassage hivernal, l'étendue plus importante de la zone déficitaire en oxygène dissous et la zone de sursaturation en oxygène de l'épilimnion et du métalimnion en 2016, comparativement avec 2014 et 2015.



**Figure 14** : Evolution de la saturation en oxygène dissous (%) au point A, de 2014 à 2016.

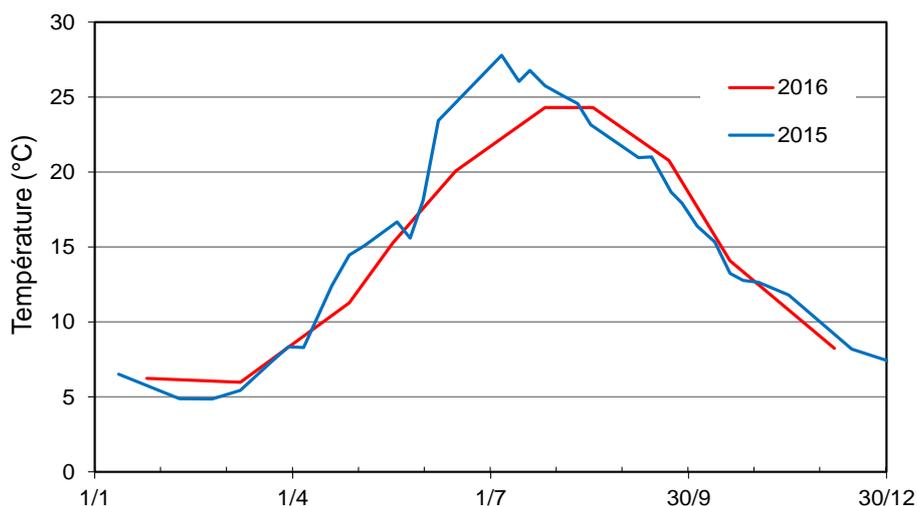
- A la fin de la période hivernale : les concentrations en oxygène sont plus élevées entre 0 et 20 m. Pas de réoxygénation des couches profondes de la colonne d'eau.
- Les températures du mois de décembre maintiennent une stratification avec des températures de surface relativement élevées de 8,3 °C du même ordre qu'en 2015, en relation avec la douceur de la période automnale. L'épaisseur de l'épilimnion est de 15 m. Les deux profils d'oxygène dissous de décembre 2015 et 2016 sont assez semblables.

#### 4.1.2 Variations saisonnières

- **En surface**

- Température

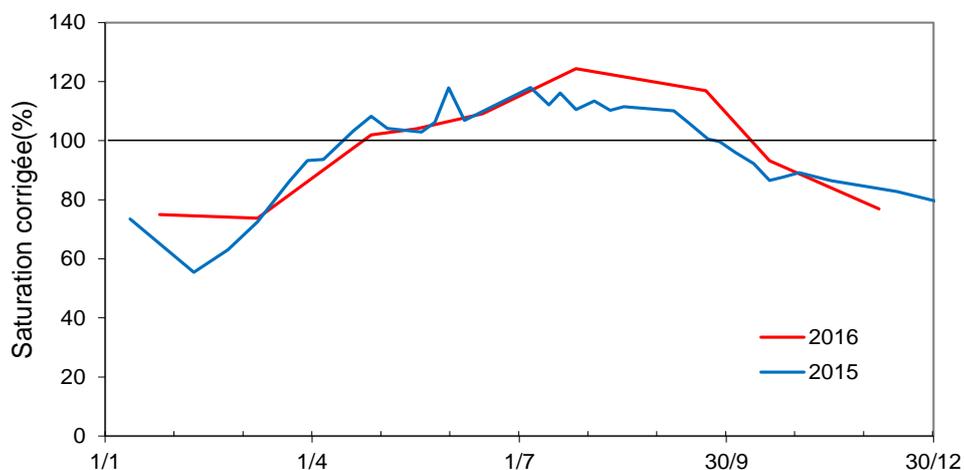
Les conditions météorologiques, et plus particulièrement la température de l'air, influencent fortement la température de la couche supérieure d'eau du lac. L'hiver 2015-2016 est un hiver doux, comme l'année précédente. La courbe de température de la surface de l'eau (Figure 18) suit la courbe des températures de l'air de l'année (voir chapitre 2 conditions climatiques). En 2016, comparativement à 2015, les eaux de surface ont été plus froides d'avril à juillet et d'octobre à décembre 2016. Les températures supérieures à 22 °C sont mesurées sur une durée de 58 jours (du 26 juillet au 21 septembre) par rapport à 84 jours en 2015 (du 6 juin au 29 août). La température maximale à 2 m de profondeur est mesurée lors des campagnes des 26 juillet et 17 août 2016 avec 24,3°C. Cette valeur est inférieure à 2015 avec 27,8°C le 7 juillet 2015.



**Figure 15** : Evolution des températures (°C) à 2 m au point A du lac d'Aiguebelette - Comparaison 2015 et 2016.

- Oxygène dissous

Les sursaturations en oxygène (> 100%) débutent entre le 8 mars et le 27 avril 2016 avril et se poursuivent jusqu'au mois d'octobre. En 2016, la production photosynthétique reste modérée à 2 m de profondeur, la sursaturation en oxygène s'élève au maximum à 124 % au mois de juillet. La distribution saisonnière est similaire à celle observée certaines années précédentes (Figure 16).



**Figure 16** : Variation saisonnière de la saturation en oxygène dissous (%) à 2 m au point A du lac d'Aiguebelette – Comparaison 2015 et 2016.

- **Dans le métalimnion**

Pendant la période estivale la sursaturation en oxygène est du même ordre de grandeur en 2016 qu'en 2015, avec un maximum de 174 % de saturation en oxygène dissous (16,42 mgO<sub>2</sub>/L).

L'évolution de la profondeur du maximum d'oxygène entre avril et octobre suit, en partie, l'hydrodynamique de la colonne d'eau. En 2016 le pic se positionne entre 4 et 7 m de profondeur et 8 m du 17 mai au 21 septembre 2016 puis disparaît avec le refroidissement et l'homogénéisation de la couche supérieure.

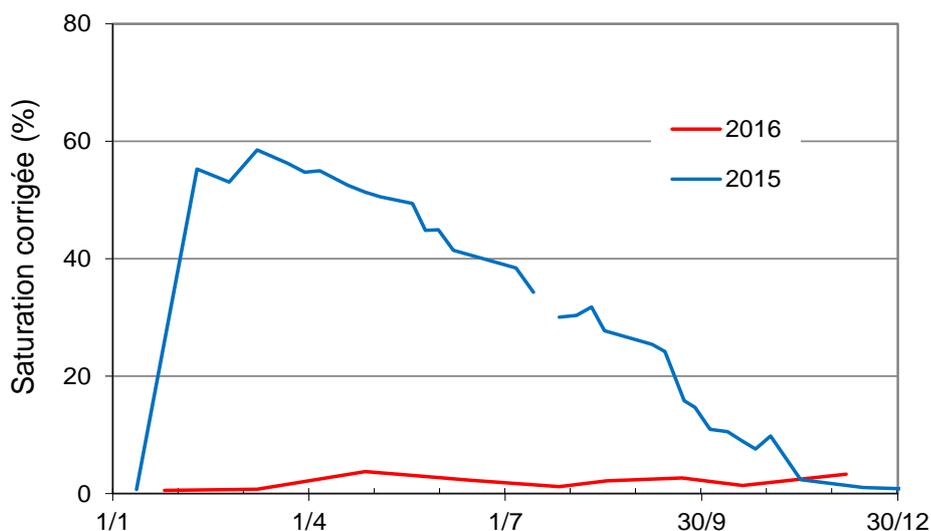
- **Dans l'hypolimnion**

Pendant l'hiver 2015-2016, la réoxygénation des couches profondes est incomplète, la différence entre les couches superficielles et le fond étant marquée. La colonne d'eau n'a été brassée que jusqu'à une vingtaine de mètres de profondeur. Les couches profondes n'ont pas été réoxygénées. Les valeurs de saturations en oxygène mesurées *in situ* dans la zone 30 – 65 m sont très faibles, les plus faibles de toute la chronique (Tableau 1).

**Tableau 40** : Saturations maximales en oxygène dissous (%) à la fin de la période hivernale dans les couches profondes entre 2009 et 2016.

Profondeur (m)	saturation maximale %							
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
30	68	69	53	58	64	66	65	<b>28</b>
40	66	68	37	42	61	64	61	<b>17</b>
50	66	39	26	36	53	62	60	<b>7</b>
60	63	36	14	30	49	58	59	<b>0,8</b>
65	62	34	9	22	46	45	58	<b>0,6</b>

La désoxygénation des zones profondes traduit une consommation de l'oxygène dissous qui découle des processus de respiration des organismes et de minéralisation de la matière organique en cours de sédimentation. Le brassage hivernal n'a pris place que jusqu'à environ 25 m. De ce fait, la réoxygénation des couches profondes n'a pas eu lieu en 2016. Les concentrations en oxygène dissous à 60 m sont inférieures à  $1 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  pendant toute l'année 2016. La concentration maximale de l'année est obtenue le 27 avril avec  $0,49 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ .



**Figure 17** : Variation saisonnière de la saturation en oxygène dissous (%) à 60 m au point A du lac d'Aiguebelette – Comparaison 2015 et 2016.

#### 4.2. CONDUCTIVITE

La conductivité est mesurée *in situ* lors de chaque campagne de prélèvement avec une sonde multi-paramètres et à certaines profondeurs discrètes au laboratoire. La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de  $1 \text{ cm}^2$  de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est directement proportionnelle à la quantité de sels minéraux dissous dans l'eau. Elle traduit la minéralisation totale de l'eau. Sa valeur varie en fonction de la température. Elle est donnée par convention à  $25^\circ\text{C}$ . La conductivité est mesurée en micro-Siemens par cm ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ).

En 2016, le brassage hivernal n'a pas été complet. On note une différence de conductivité de  $21 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  entre la surface et le fond le 8 mars 2016 ( $302 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à 2 m et  $323 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à 65 m). Contrairement à l'année 2015, la répartition des sels n'a donc pas été homogène dans la colonne d'eau (Figure 18b). Dans l'épilimnion, la conductivité diminue à mesure que la stratification thermique se met en place et que l'activité photosynthétique s'intensifie (Figures 18c et 19). La conductivité passe ainsi de  $313 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en avril 2016 à  $236 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en septembre, du fait de la consommation des nutriments et de la précipitation du carbonate de calcium suite à la diminution du  $\text{CO}_2$  par la photosynthèse qui modifie l'équilibre acido-basique du milieu. Ensuite, la diminution de l'activité photosynthétique permet à la conductivité d'augmenter de nouveau jusqu'en décembre pour atteindre une valeur de  $276 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à 2 m. Dans le fond du lac, la conductivité reste stable tout au long de l'année avec des valeurs comprises entre  $322$  et  $337 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Cette augmentation est la conséquence de la désoxygénation qui entraîne le relargage des sels dissous à partir des sédiments.

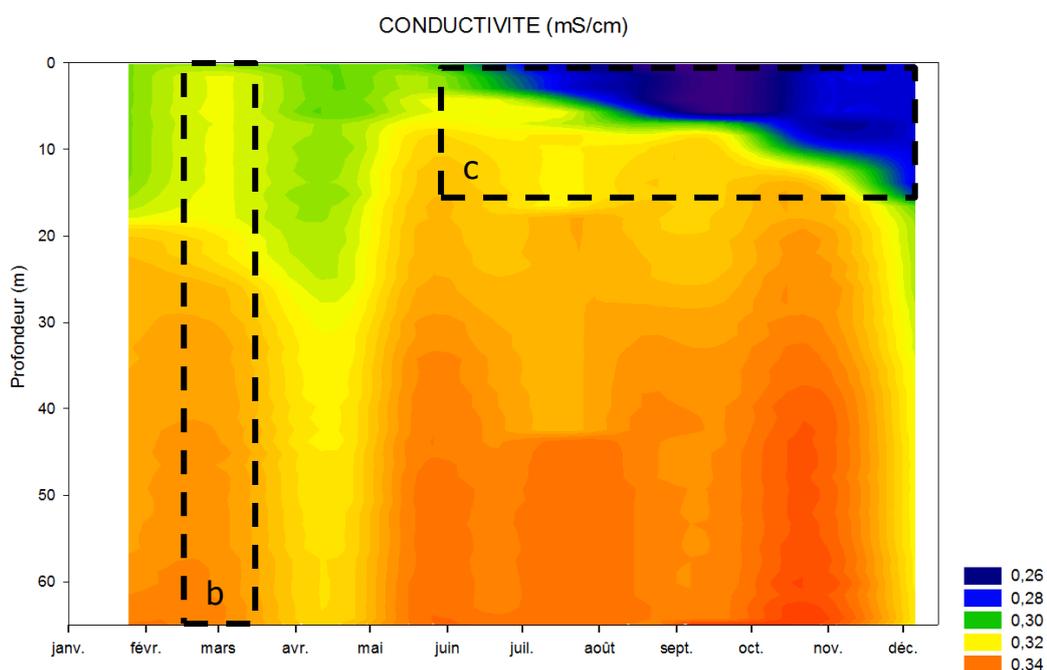


Figure 18 : Distributions de la conductivité spécifique ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) au point A, en 2016.

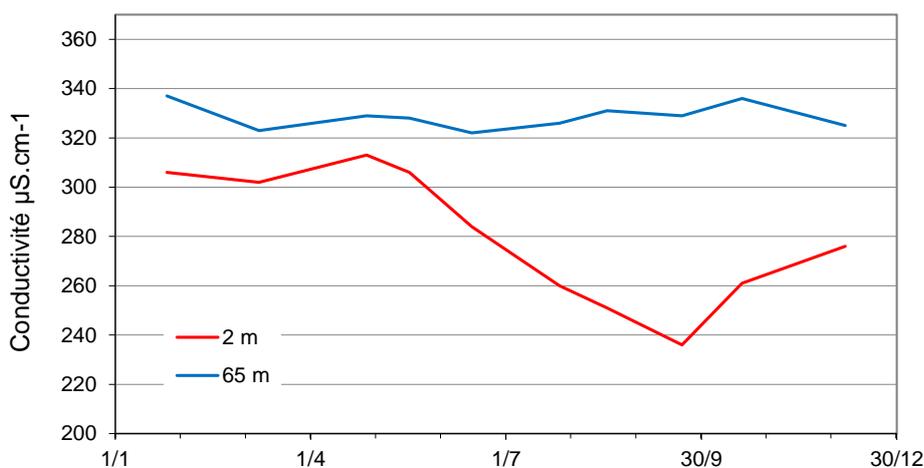
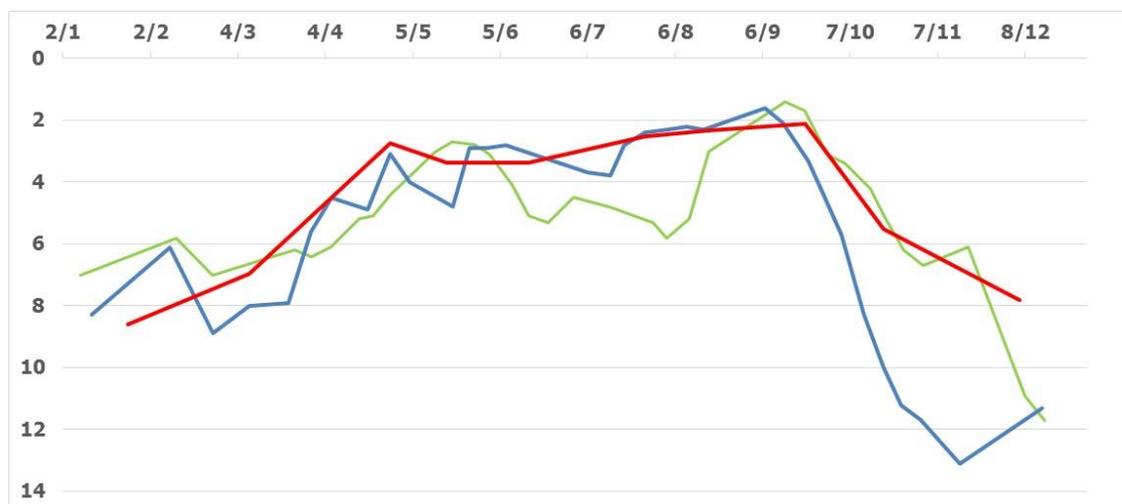


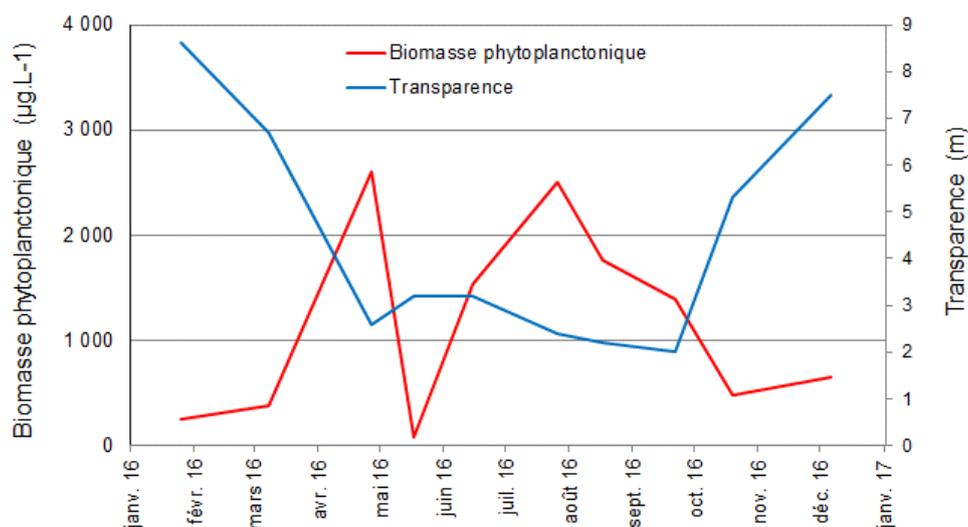
Figure 19 : Variation saisonnière de la conductivité ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) au point A en 2016 : à 2 m et 65 m de profondeur.

### 4.3. 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 authigène 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 4 :** Variation saisonnière de la Transparence (m) avec le disque de Secchi au point A en 2016 (rouge), 2015 (bleu) et 2014 (vert).



**Figure 21 :** Transparence de l'eau avec le disque de Secchi et la biomasse phytoplanctonique au point A en 2016.

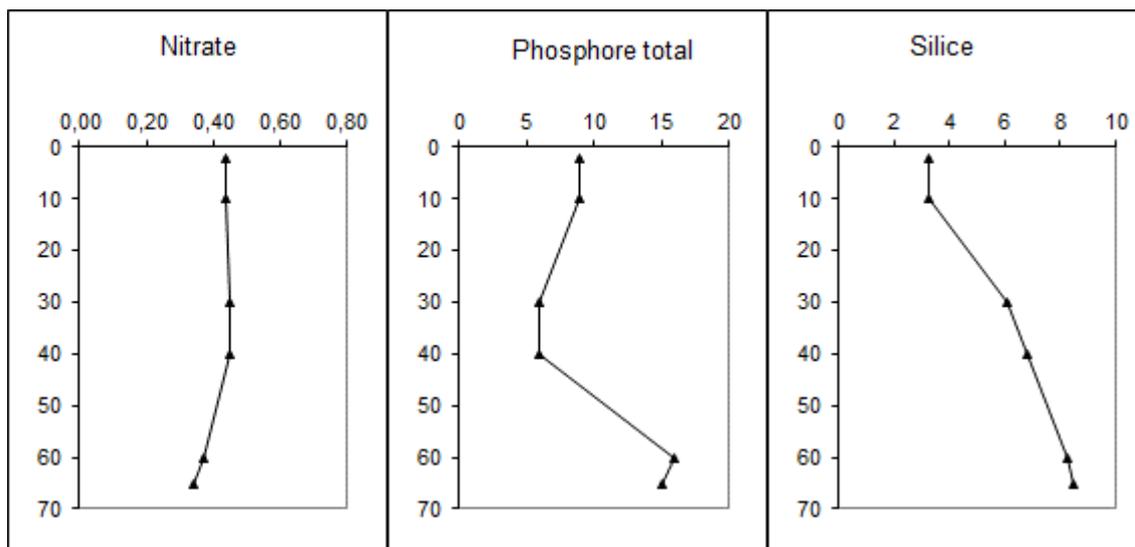
En 2016, les valeurs sont globalement proches des valeurs des années antérieures (2014, 2015). Avec une diminution de la transparence dès mars, un premier minimum avec 2,7 m le 24 avril (pic printanier des diatomées) puis par une deuxième valeur minimale similaire à 2,1 m le 21 septembre (pic automnal). Entre les deux pics, la transparence ne montre pas de phase des eaux claires bien marquée, comme classiquement décrit dans la littérature. La transparence en juillet et août est similaire à 2015, mais sensiblement plus faible qu'en 2014, ce phénomène de 2014 peut être dû à une période de plus faible production pendant les mois de juillet et d'août liée à un déficit d'insolation.

À partir du mois de septembre, avec la diminution de la biomasse dans les eaux de surface (baisse des températures de l'air, de la lumière), la transparence augmente pour atteindre une valeur de presque 8 m en décembre, inférieure aux données des années précédentes. Cette valeur peut être imputée à un mois de décembre particulièrement clément.

#### 4.4. NUTRIMENTS

##### 4.4.1. Fin de période hivernale

En fin de période hivernale (période de circulation des eaux), mars 2016, les concentrations en nitrate et en phosphore total ne montrent pas la même homogénéité sur toute la colonne (Figure 22) qu'en 2015. Les concentrations se situent respectivement entre 0,34 et 0,45 mgN.L<sup>-1</sup> pour les nitrates et entre 6 et 16 µgP.L<sup>-1</sup> pour le phosphore total.

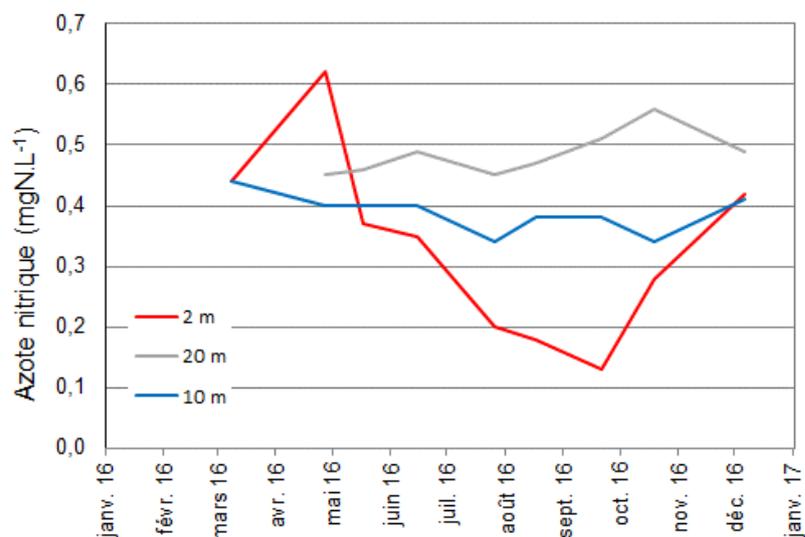


**Figure 22 :** Distributions verticales des concentrations en nitrate (mgN.L<sup>-1</sup>), phosphore total (µgP.L<sup>-1</sup>) et silice (mgSiO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>) en fin d'hiver 2016.

##### 4.4.2. Evolution saisonnière

###### 4.4.2.1. Nitrate

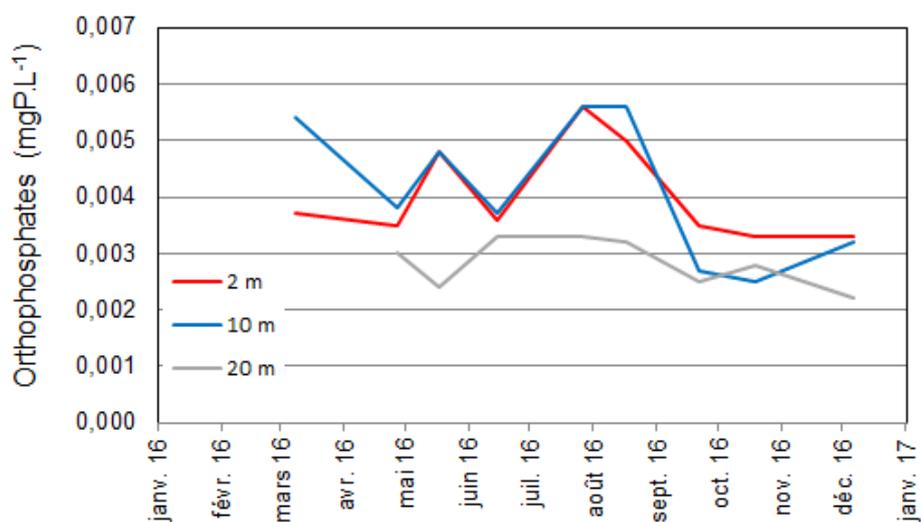
La concentration en azote nitrique des couches superficielles diminue significativement à partir du 27 avril 2016 consécutivement à l'apparition du pic de biomasse phytoplanctonique annuel. La consommation est significative dans les couches 0-10 m. Elle se poursuit jusqu'à atteindre 0,13 mgN/L à 2 m de profondeur le 21 septembre 2016 puis ralentit permettant à la concentration en azote nitrique d'atteindre une valeur de 0,42 mgN/L le 6 décembre 2016 (Figure 23).



**Figure 23** : Concentration en azote nitrique (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en 2016 dans l’eau des couches superficielles du lac (2, 10 et 20 m), Aiguebelette, Point A.

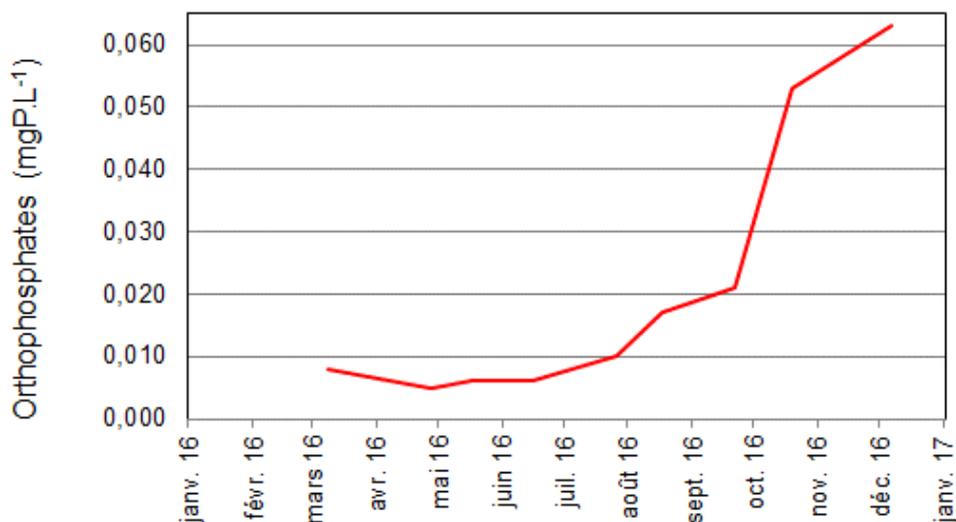
#### 4.4.2.2. Phosphore

Le phosphore est présent sous différentes formes dans le lac. Le phosphore réactif soluble (orthophosphate), 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 24** : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) en 2016 dans l’eau des couches superficielles du lac (2, 10 et 20 m), Aiguebelette, Point A.

Dans les conditions réductrices caractéristiques d’un hypolimnion en anoxie, la re-minéralisation de la matière organique et le relargage du phosphore par les sédiments s’opèrent. Dans cette zone profonde, la teneur en orthophosphate augmente à partir du mois de septembre 2016 pour atteindre 0,063 mgP/L le 6 décembre 2016 (Figure 25).

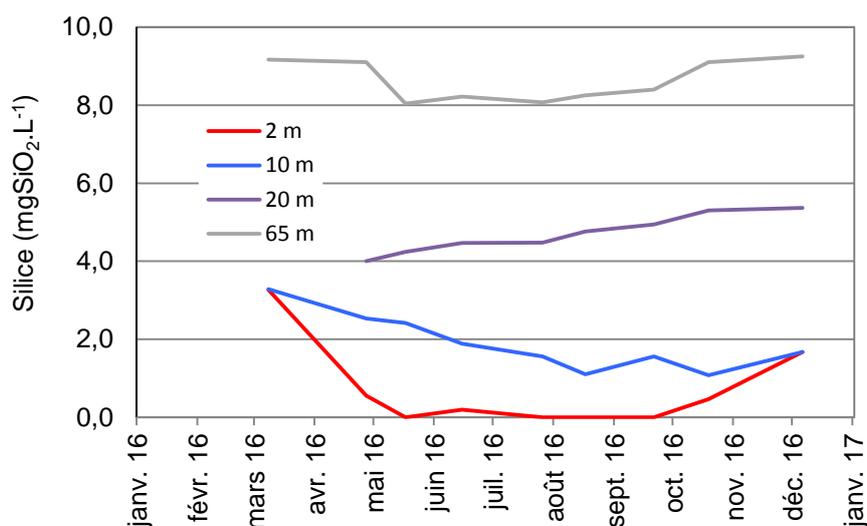


**Figure 25** : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO<sub>43-</sub>) en 2016 dans les eaux du fond du lac à 65 m, Point A, lac d'Aiguebelette.

#### 4.4.2.3. Silice

La silice est un nutriment essentiel pour les diatomées qui l'utilisent pour la construction de leurs frustules. Le brassage partiel hivernal de l'année 2016 n'a pas permis la remise à disposition du stock de silice réactive dans la colonne d'eau à partir de l'hypolimnion.

En 2016, la concentration en silice dans les eaux de surface est de 3,27 mg/L au moment du maximum du brassage hivernal (Figure 26). Ensuite, la concentration en silice commence à diminuer dans la couche euphotique avec le développement des diatomées qui vont dominer la biomasse phytoplanctonique au printemps, pour atteindre des valeurs non détectables analytiquement à 2 m le 17 mai 2016. Les concentrations en silice restent ensuite faibles jusqu'au mois d'octobre où la consommation décroissante et l'enfoncement de la thermocline s'accompagnent d'une remobilisation des concentrations de silice du métalimnion.



**Figure 26** : Concentration en silice en 2016 dans les couches superficielles (2, 10 et 20 m) et au fond, Aiguebelette, Point A.

#### 4.5. CHLORURE

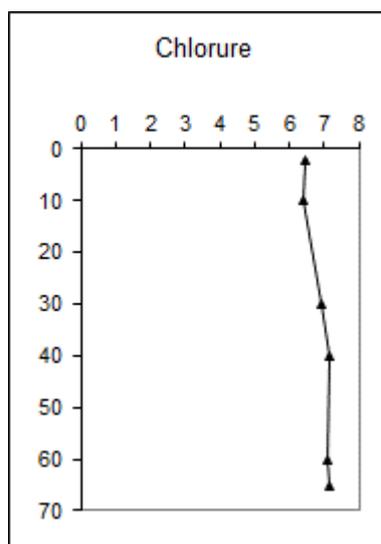


Figure 27 : Distribution verticale des concentrations en chlorure (mgCl.L<sup>-1</sup>) en fin d'hiver 2016.

Le suivi hivernal du chlorure est intégré au suivi du lac d'Aiguebelette bien que celui-ci ne soit pas directement impliqué dans le processus d'eutrophisation. La prise en compte de ce paramètre s'explique par la proximité des axes routiers et autoroutiers passant dans le bassin versant du lac d'Aiguebelette (utilisation des sels de déneigement) et des unités de stockage de chlorures. A la fin de la période hivernale les concentrations en chlorure présentent des concentrations sur l'ensemble de la colonne d'eau comprises entre 6,41 et 7,15 mg.L<sup>-1</sup> (Figure 27).

### 5. SUIVI LONG TERME PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

#### 5.1. NUTRIMENTS ET CHLORURE

Dans le principe, les concentrations moyennes annuelles hivernales 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.

##### 5.1.1. Nitrate

La concentration moyenne annuelle pondérée de nitrate calculée pour 2016 est de 0,42 mgN.L<sup>-1</sup>. Il s'agit de la valeur la plus basse depuis 2003 ; elle était de 0,52 mgN.L<sup>-1</sup> en 2015. Ce paramètre a connu une petite augmentation depuis la mise en place du suivi qui reste peu significative (Figure 28).

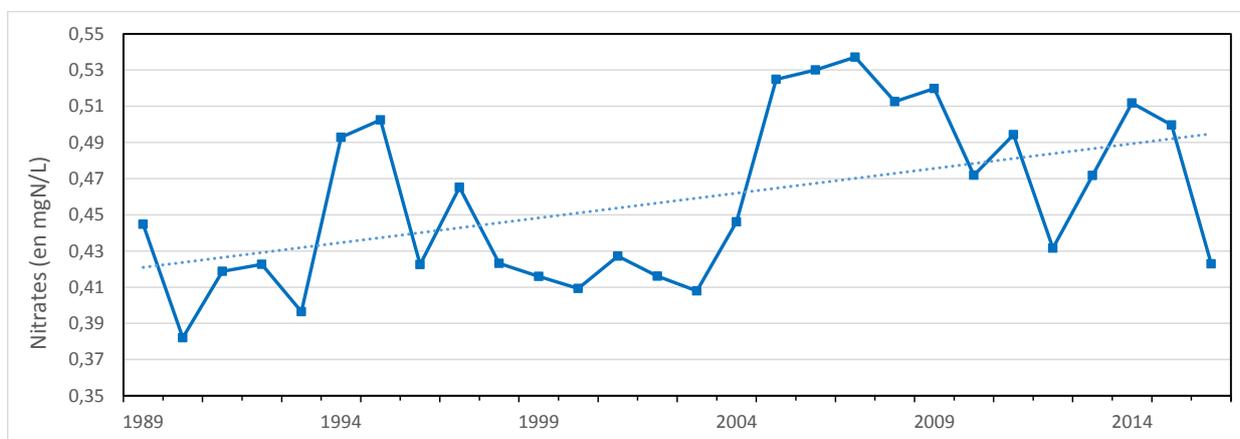
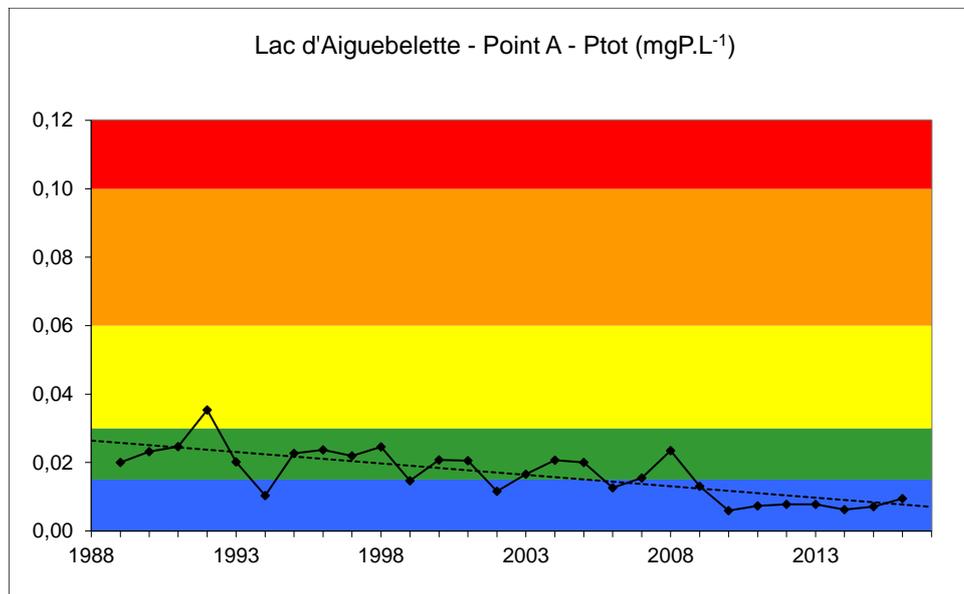


Figure 28 : Evolution des concentrations moyennes pondérées hivernales en nitrate (mgN.L<sup>-1</sup>) de 1989 à 2016.

### 5.1.2. Phosphore total

La concentration moyenne pour l'année 2016 s'élève à  $9,4 \mu\text{gP.L}^{-1}$ . L'historique des concentrations depuis 1989 révèle des variations interannuelles, dues à des mécanismes internes qui régulent le phosphore dans les eaux du lac, notamment ceux relatifs aux phénomènes d'élimination - sédimentation et de relargage par les sédiments mais aussi aux limites de détection, les valeurs relativement basses étant proches des seuils de quantification des méthodes analytiques.

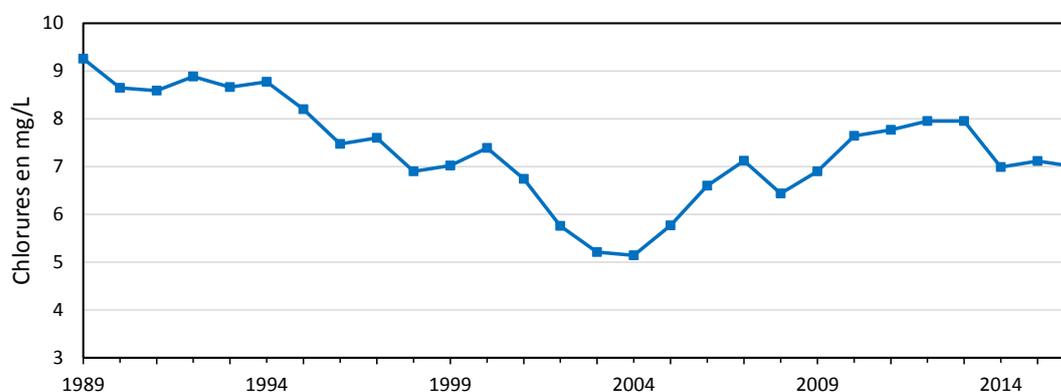


**Figure 29** : Evolution de la classe de qualité en fonction des concentrations moyennes hivernales en phosphore total ( $\text{mgP.L}^{-1}$ ) de 1988 à 2016.

Le suivi des concentrations en phosphore total laisse apparaître des valeurs inférieures à  $10 \mu\text{gP/L}$  depuis 2010. Il faut néanmoins rester prudent puisque la maîtrise des sources de phosphore est un élément fondamental dans le contrôle du niveau trophique du lac d'Aiguebelette. 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).

### 5.1.3. Chlorure

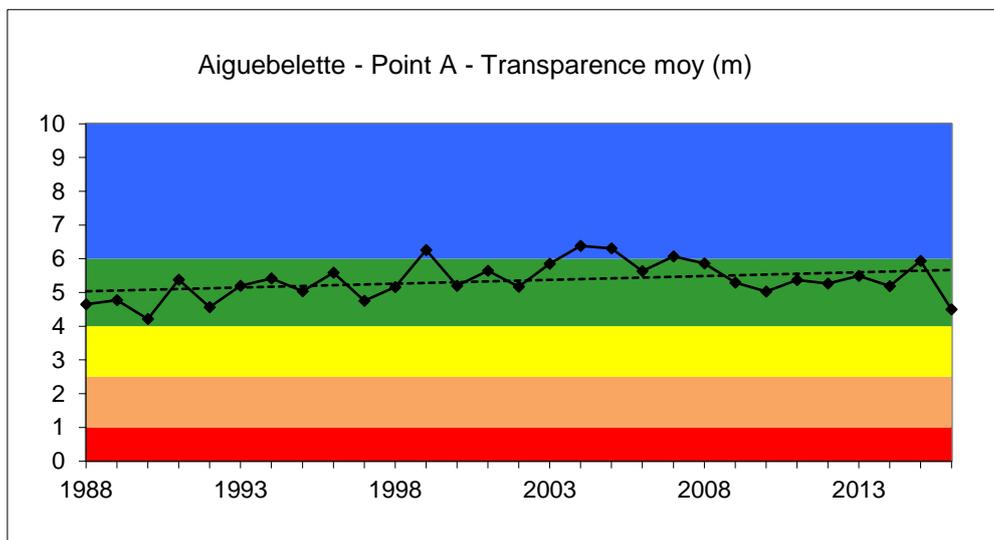
La moyenne hivernale pour l'année 2016 avec  $7,0 \text{ mgCl.L}^{-1}$  présente une valeur sensiblement similaire à celle de 2015. Les concentrations moyennes hivernales restent à des niveaux faibles, très inférieurs aux valeurs toxiques citées dans la littérature et sont globalement stables depuis le début du suivi (Figure 30).



**Figure 30** : Evolution des concentrations moyennes pondérées hivernales en chlorure ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) de 1988 à 2016.

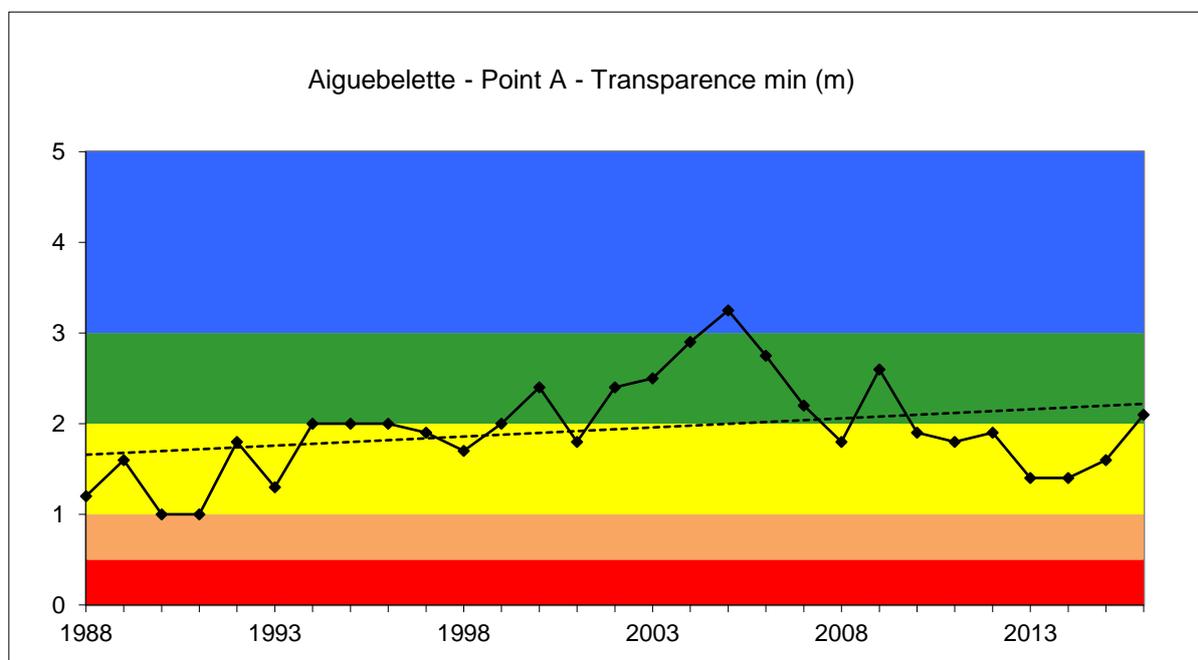
## 5.2. TRANSPARENCE

Avec 4,5 mètres, la transparence de 2016 reste cohérente avec les valeurs des années précédentes même si c'est une des valeurs la plus faible de la série. La faible valeur maximale atteinte impacte ce calcul, mais permet de rester dans la même valeur de la grille (vert).



**Figure 31** : Evolution 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 2016.

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 avec 2,1 m mesurée le 21 septembre, elle se situe dans la classe verte.



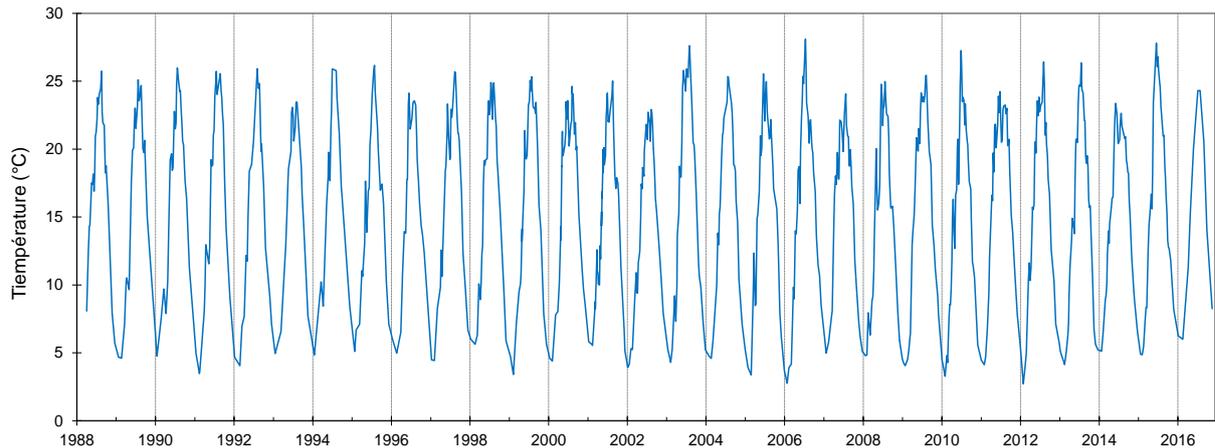
**Figure 32** : Evolution de la classe de qualité de l'eau en fonction de la transparence minimale annuelle (m) mesurée avec le disque de Secchi blanc de 20 cm au point A de 1988 à 2016.

Les deux paramètres indiquent bien la stabilité de l'écosystème, mais sont soumis à la variabilité due aux campagnes de mesures.

### 5.3. TEMPERATURE

#### 5.3.1. Epilimnion

L'évolution pluriannuelle des températures à deux mètres de profondeur montre des variations saisonnières régulières. Nous pouvons noter dans cette chronique que les températures maximales en été 2016 sont moins élevées que celles de 2015 où le mois de juillet avait été particulièrement chaud. Elles restent dans la moyenne de celles observées depuis 1988 (Figure 33).



**Figure 33** : Evolution des températures (°C) à 2 m de profondeur au point A de 1988 à 2016.

#### 5.3.2. Couches profondes

A 60 mètres, nous observons une succession de réchauffements et de refroidissements rythmée par les saisons. Les refroidissements sont plus ou moins importants selon la rigueur de l'hiver (intensité et durée) et ont une influence sur la réoxygénation des couches profondes. En effet, un hiver assez rigoureux (2008-2009) a permis un refroidissement de la zone profonde (Figure 34a), a ramené les températures à des valeurs identiques à celles rencontrées à la fin de l'hiver 2001-2002 (4,23°C) et s'est accompagné d'une réoxygénation de plus de 60 % de la saturation. Les conditions climatiques de l'hiver 2015-2016 ont conduit à un brassage partiel de la colonne d'eau jusqu'à une vingtaine de mètres seulement, ce qui n'a pas permis un refroidissement de la couche profonde (Figure 34b). En 2016, la température annuelle moyenne à 60 m de profondeur affiche la valeur la plus élevée de la chronique 1988-2015 avec 5,26 °C, dépassant ainsi les valeurs de 2014 (5,14 °C) et de 2015 (5,02 °C).

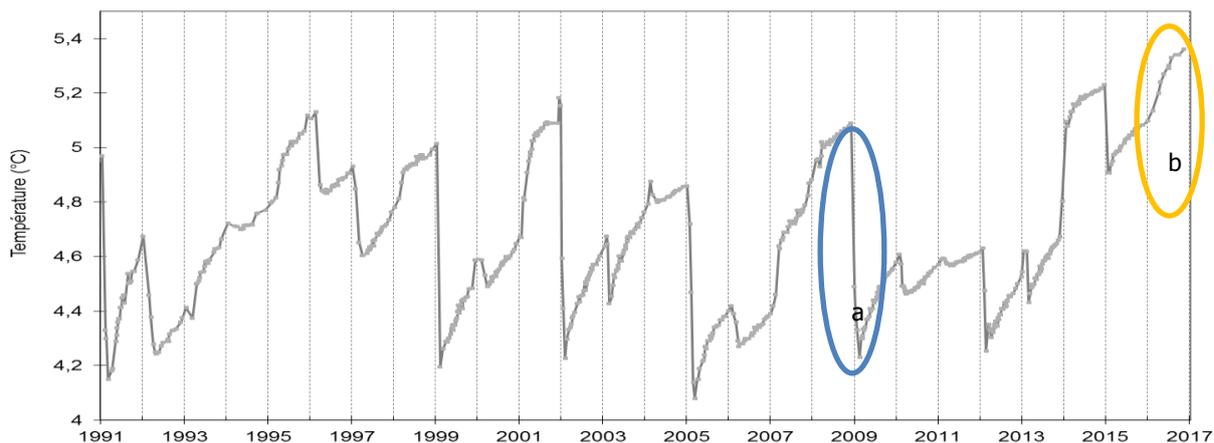


Figure 34 : Evolution des températures en °C à 60 m de profondeur au point A de 1991 à 2016.

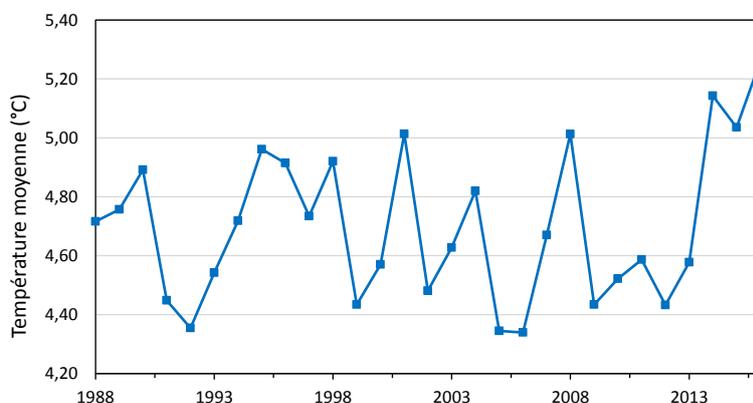


Figure 35 : Evolution des températures moyennes annuelles en °C à 60 m de profondeur au point A de 1988 à 2016.

## 5.4. OXYGENE

### 5.4.1. Epilimnion

L'évolution pluriannuelle des valeurs de saturation en oxygène dissous à deux mètres de profondeur montre des variations saisonnières régulières sur la chronique 1988-2016 (Figure 36). Nous pouvons noter que le profil des variations pour l'année 2016 est similaire à ceux des années précédentes, avec des valeurs estivales plus élevée qu'en 2015 avec 124,4 % le 26 juillet 2016 et 116,1 % le 20 juillet 2015. Elles restent dans la moyenne de celles observées depuis 1988.

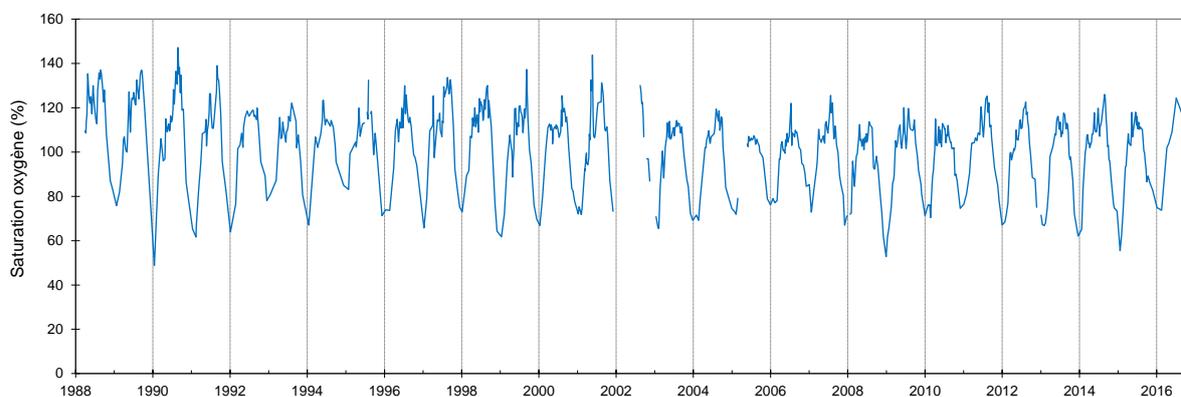


Figure 36 : Evolution des saturations en oxygène dissous (%) à 2 m de profondeur au point A de 1988 à 2015.

### 5.4.2. Couches profondes

Le suivi des saturations en oxygène dissous à 60 m permet d'apprécier la variabilité interannuelle ainsi que la relation entre l'intensité des concentrations hivernales et les teneurs mesurées en fin de stratification. Contrairement à 2015, les valeurs de saturation à 60 m au cours de l'année sont très faibles, caractéristiques des années où la réoxygénation hivernale fut mauvaise, comme en 1998, 2001, 2007 et 2011. Les valeurs maximales de saturation en oxygène dissous sont les plus faibles de la chronique depuis 1991 (Figure 37).

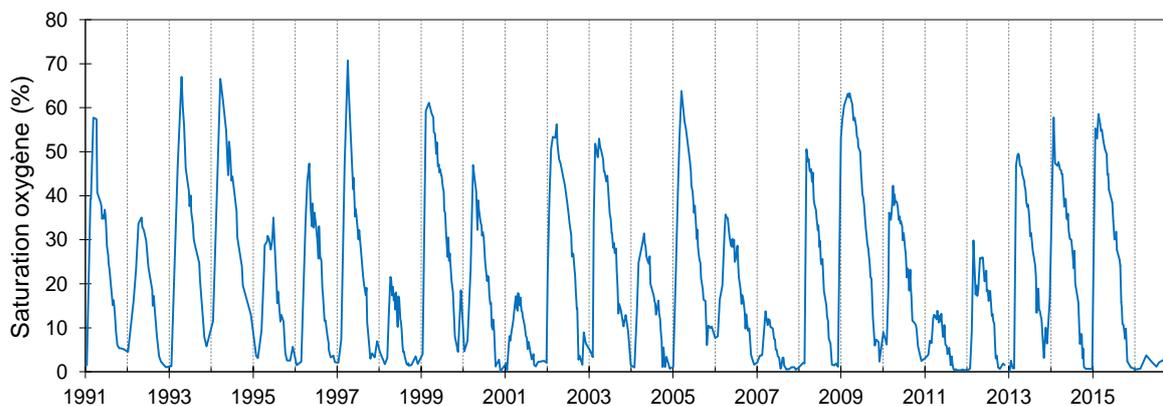


Figure 37 : Evolution de la saturation en oxygène dissous en % à 60 m de profondeur au point A de 1991 à 2016.

## 6. LE PHYTOPLANCTON

Le compartiment phytoplanctonique du lac d'Aiguebelette a fait l'objet d'un suivi durant l'année 2016 à la station « Point A ». 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 2016

#### 6.1.1. Evolution des classes d'algues

La figure 38 présente la dynamique saisonnière des principales classes d'algues *sensu* Bourrelly (Bourrelly 1972; Bourrelly 1981; Bourrelly 1985) pour l'année 2016.

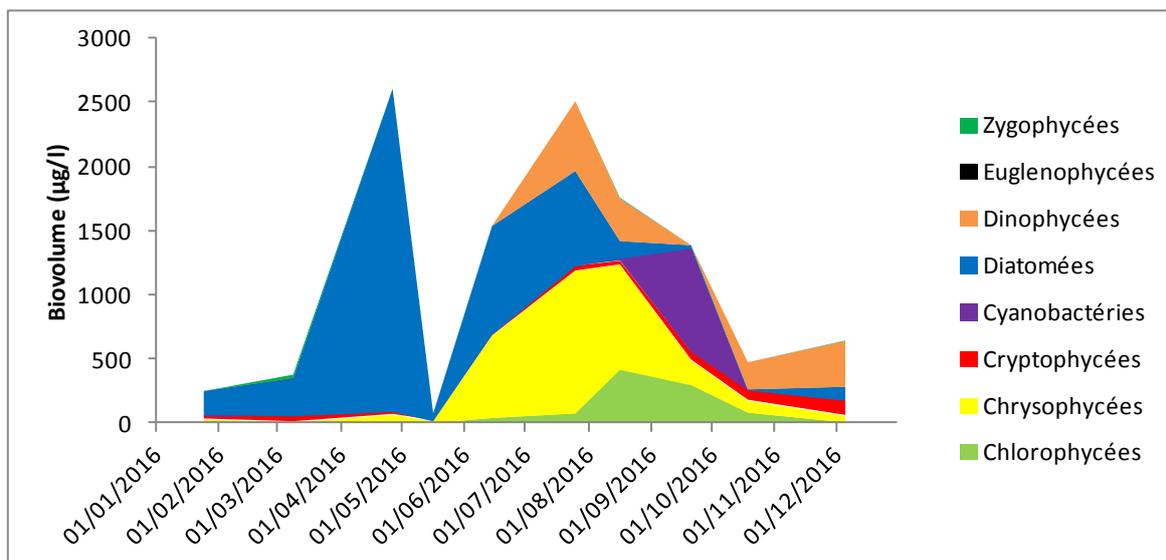


Figure 38 : Variations saisonnières de la biomasse du phytoplancton par classes algales en 2016.

Pour l'année 2016, 5 phases peuvent-être décrites:

- Une phase hivernale (du 25/1 au 9/3), présentant une biomasse faible et largement dominée par les diatomées.
- Une période printanière (27/4) pendant cette période la biomasse augmente très fortement et atteint sa biomasse annuelle maximale.
- Une phase des eaux claires (17/5), la biomasse est minimale à cette période. Cette chute de la biomasse algale est due à la consommation du phytoplancton par le zooplancton qui va jusqu'à épuiser sa ressource.
- Une phase estivale (15/6 au 17/8), après la phase des eaux claires, la composition algale change. Les Dinophycées et les Chrysophycées apparaissent et vont progressivement dominer la biomasse algale.
- Une phase de fin d'été et début d'automne (21/9 - 19/10). Des Cyanobactéries et Des Chlorophycées filamenteuses apparaissent.
- Une phase hivernale (6/12), la biomasse diminue fortement et les Dinophycées domine la biomasse algale.

### 6.1.2. Evolution des espèces dominantes

La figure 39 présente la dynamique des taxons dominant la biomasse du phytoplancton pour l'année 2016 (les 10 taxons présentant la biomasse annuelle la plus élevée ont été sélectionnés).

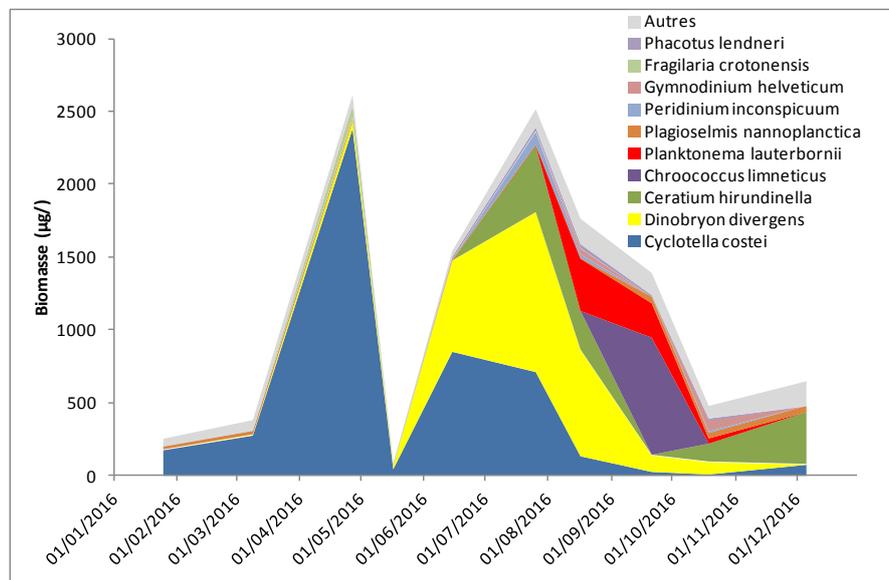


Figure 39 : Variations saisonnières de la biomasse des principaux taxons du phytoplancton en 2016.

Les 10 taxons présentés sur la figure 42 constituent plus de 95% de la biomasse annuelle totale. Les successions d'espèces sont décrites ci-dessous :

- Pendant la phase hivernale, les biomasses sont faibles. Elles sont dominées principalement par une diatomée centrique (*Cyclotella costei*) caractéristique des grands lacs en cours de ré-oligotrophisation (Rimet *et al.* 2009). Elle est adaptée aux eaux brassées et froides typiquement rencontrées en début d'année. Cette espèce voit sa biomasse augmenter fortement pendant la période printanière. Elle est généralement une nourriture de choix pour le zooplancton, qui va la brouter jusqu'à la faire quasiment disparaître pendant la phase des eaux claires (17/5).
- Après la phase des eaux claires, la proportion de biomasse représentée par *Cyclotella costei* diminue progressivement pendant la période estivale au profit d'une Chrysophycée, *Dinobryon divergens*. Cette espèce de Chrysophycée est mixotrophe, c'est à dire capable de photosynthétiser et d'utiliser les nutriments dissous dans l'eau, mais également d'utiliser la matière organique comme source d'énergie lorsque les nutriments viennent à manquer. Elles sont considérées comme électives des milieux oligotrophes (Padisak *et al.* 2009). Pendant cette période, plusieurs espèces de Dinophycées présentent une biomasse assez importante (*Ceratium hirundinella*,

*Peridinium inconspicuum*, *Gymnodinium helveticum*). Ces taxons sont considérés comme indicateurs d'épilimnion bien stratifiés de la période estivale (Reynolds et al. 2002).

- La période de fin d'été et début d'automne voit l'apparition d'autres taxons. En particulier, *Planktonema lauterbornii*, Chlorophycée filamenteuse, qui appartient au même groupe fonctionnel que *Mougeotia gracillima* (Reynolds et al. 2002), espèce commune dans le Léman. *Planktonema lauterbornii* apparaît toujours à la même période dans le lac d'Aiguebelette. Sa niche écologique se situe dans la zone du métalimnion. Ces espèces sont adaptées aux eaux relativement bien stratifiées et se développent dans des profondeurs de 10-15 mètres. A ces profondeurs, on se trouve à l'interface de couches riches en nutriments (en zone plus profonde) ; la luminosité y est faible mais suffisante pour ces espèces d'algues filamenteuses (Tapolczai et al. 2015). Ces taxons vont donc pouvoir se développer lorsque les eaux du lac d'Aiguebelette présentent cette conjugaison de facteurs : des eaux stratifiées et un métalimnion riche en nutriments.
- En fin d'année, le compartiment phytoplanctonique est dominé par des Dinophycées (*Ceratium hirundinella*), tout comme en 2014 et 2015, mais leurs biomasses restent faibles. Ces taxons sont généralement considérés comme indicateurs d'épilimnions estivaux, riches en nutriments (Reynolds et al. 2002).

### 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, une longueur supérieure à 20  $\mu\text{m}$  et/ou un biovolume supérieur à 10 000  $\mu\text{m}^3$ . La figure 40 présente la dynamique de ces deux catégories pour l'année 2015.

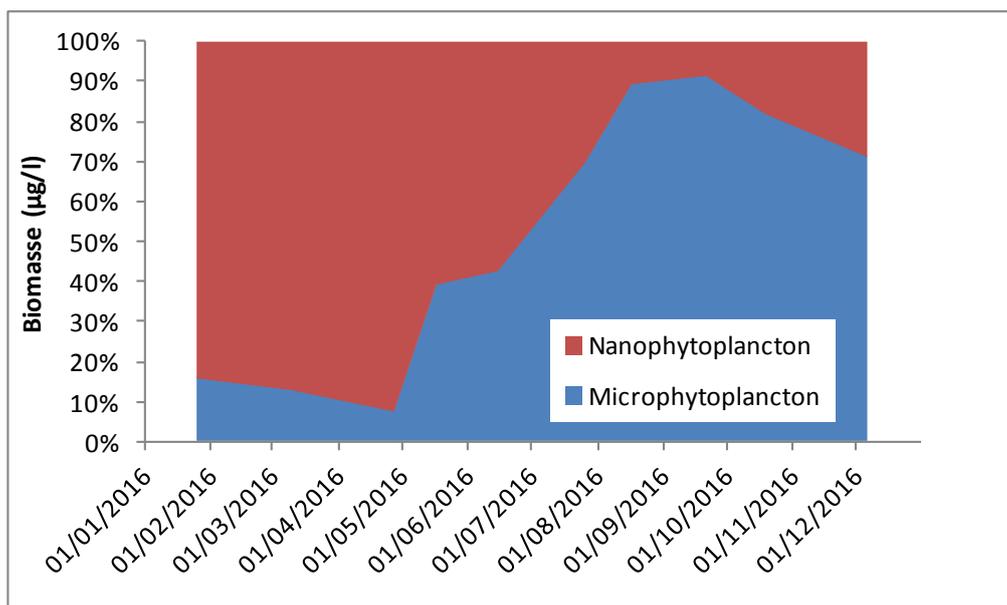


Figure 40 : Variations saisonnières de la biomasse par classes de taille en 2016.

Pendant la phase hivernale et printanière de début d'année, c'est le nanophytoplancton qui domine, principalement à cause de *Cyclotella costei*. Ces taxons de petite taille sont facilement broutés par le zooplancton. Après la phase des eaux claires, la tendance s'inverse nettement, ce sont des taxons de plus grande taille qui vont dominer. Leur taille permet, entre autres, de mieux résister au broutage par le zooplancton.

## 6.2. Evolution interannuelle

### 6.2.1. Evolution des classes d'algues

La figure 41 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.

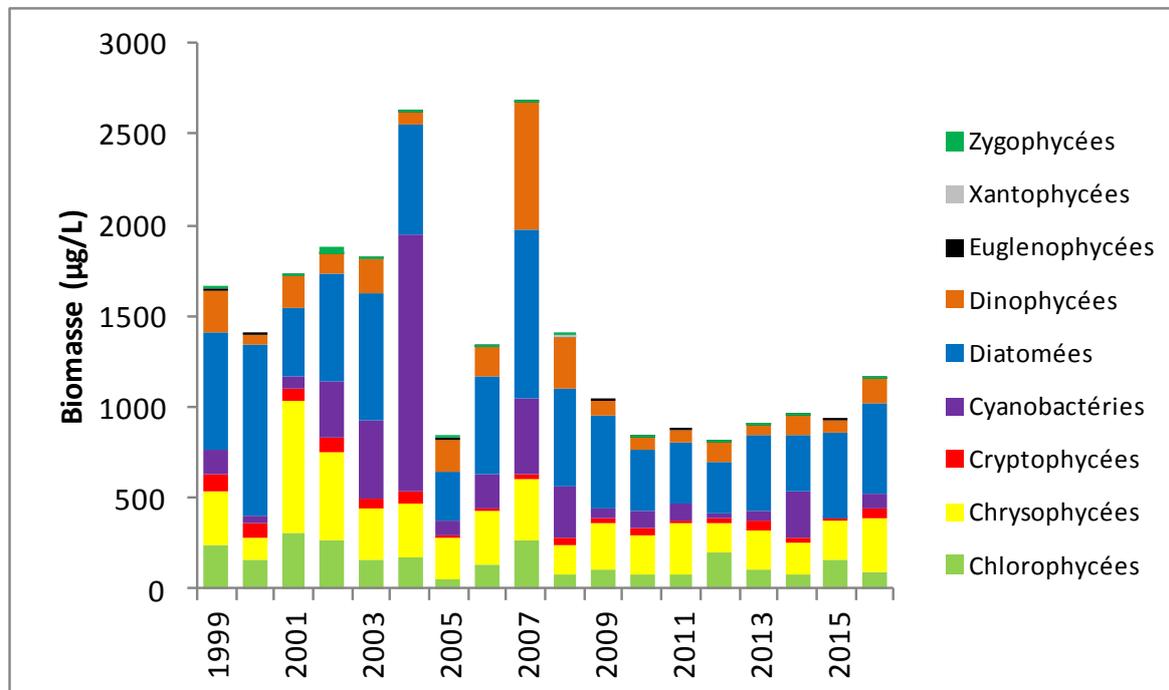


Figure 41 : Evolution interannuelle des principales classes algales (moyenne annuelle des moyennes mensuelles des biomasses).

L'année 2016 permet de confirmer les observations depuis 2008 : la biomasse algale est globalement plus faible que dans les années 1999-2004. Ces biomasses sont proches de celles observées sur le Grand Lac d'Annecy (biomasses comprises entre 500 et 1000 µg/L) qui est un lac oligotrophe. Les biomasses du lac d'Aiguebelette sont inférieures à celles du Léman qui est encore un lac méso à faiblement eutrophe (cf. rapport CIPEL campagne 2016). Les classes algales dominantes sont les mêmes que les années précédentes (2008-2015) : Diatomées et Chrysophycées. Elles sont indicatrices de milieux oligotrophes.

### 6.2.2. Evolution de la diversité

Un indice de diversité annuelle a été calculé sur la chronique 1999-2016. 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 les années 1999 à 2015. Cet indice moyen est reporté à la figure 42 pour chaque année.

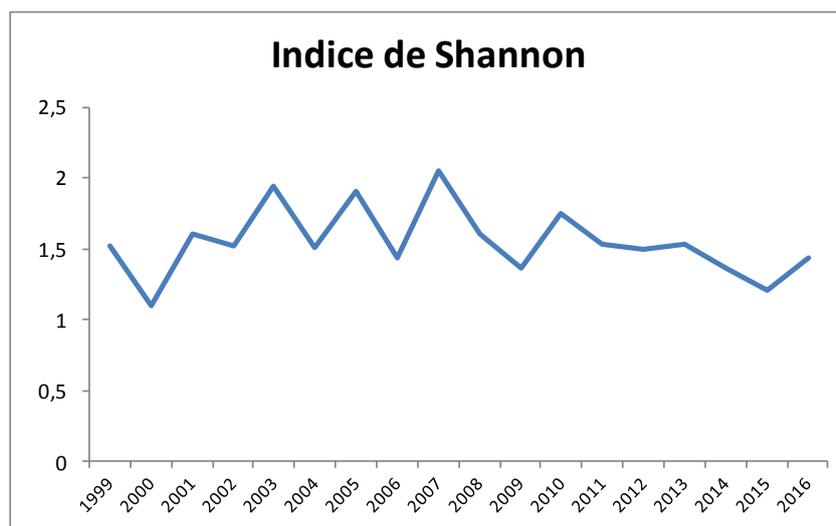
Détail du calcul de l'indice de diversité de Shannon :

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

H : indice de Shannon

N<sub>i</sub> : biomasse de l'espèce algale i

N : somme de la biomasse des espèces algales



**Figure 42** : Evolution interannuelle de l'indice de diversité de Shannon.

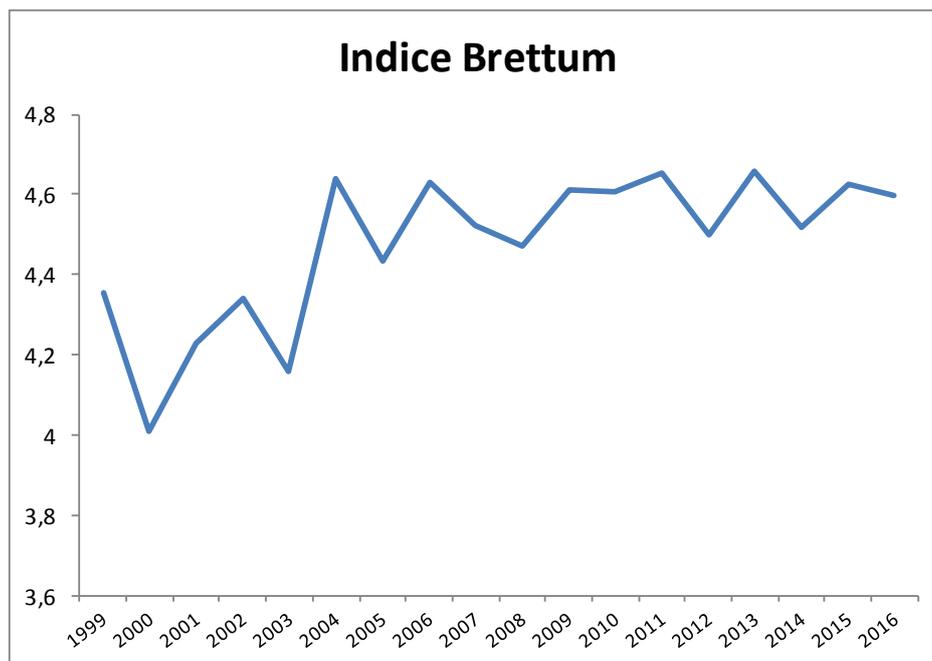
L'indice de diversité de lac d'Aiguebelette est stable, oscillant entre 1.2 et 1,5 depuis 2011. La diversité du Lac d'Aiguebelette est plus faible que celles du Léman (environ 2) mais comparable à celles d'Annecy et du Bourget.

### 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. Une étude menée à l'INRA (Anneville & Kaiblinger 2009; Kaiblinger *et al.* 2009; Kaiblinger 2008) a montré que c'est l'indice de Brettum (modifié par (Kaiblinger *et al.* 2009)) qui était 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 <sup>-1</sup>	ultra-oligotrophe
5	5–8 µg.L <sup>-1</sup>	oligotrophe
4	8–15 µg.L <sup>-1</sup>	oligo-mesotrophe
3	15–30 µg.L <sup>-1</sup>	méso/faiblement eutrophe
2	30–60 µg.L <sup>-1</sup>	eutrophe
1	>60 µg.L <sup>-1</sup>	hypertrophe

Pour chaque prélèvement, un indice est calculé, puis une moyenne mensuelle est calculée. Enfin un indice annuel est calculé sur les moyennes mensuelles. La figure 43 présente l'évolution de ces indices annuels de Brettum.



**Figure 43** : Evolution de l'indice de Brettum

Lorsque l'on considère la chronique dans sa globalité, on observe une nette évolution de l'indice, indicateur d'une nette amélioration du niveau trophique du lac. L'indice de Brettum oscille depuis 2009 autour de 4.5 et classe le lac d'Aiguebelette en méso-oligotrophe, ce qui est proche de ce qui est observé dans le lac d'Annecy. Le Léman et le Bourget présentent actuellement des valeurs d'indices plus faibles (autour de 3-3,5) ce qui classe ces lacs en méso-faiblement eutrophe.

#### 6.2.4. La chlorophylle a

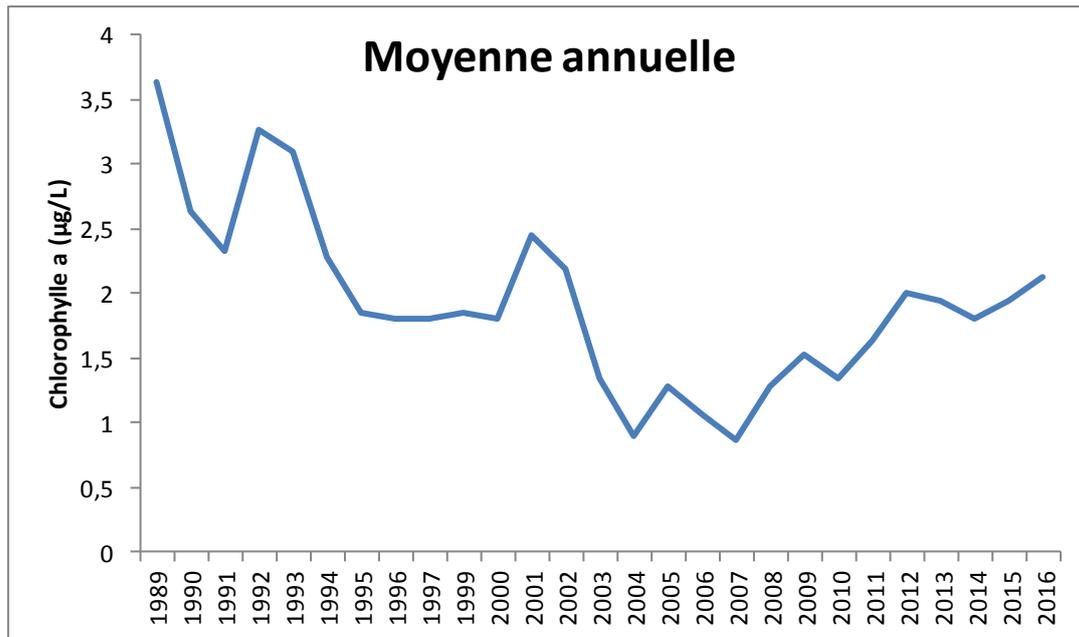
La 'chlorophylle a' (ChloA) renseigne sur la quantité de biomasse phytoplanctonique. C'est un paramètre proche de la biomasse phytoplanctonique. Les prélèvements qui ont permis les mesures de Chlorophylle (méthode Scor-Unesco, mesure effectuée à partir des absorbances mesurées aux longueurs d'ondes suivantes 410, 750, 665 ; 645 et 630 nm, NF T90-117 AFNOR 1999) ont été réalisés différemment au cours de la chronique 1989-2016 :

- entre le 23/01/1989 et 4/10/2005 : prélèvements intégrés entre la surface et 2.5 x le Secchi
- entre le 20/10/2005 et 28/02/2012 : prélèvements intégrés entre 0 et 20 m
- entre le 13/03/2012 et le 6/02/2016 : prélèvements intégrés entre 0 et 18 m.

De plus, le nombre de prélèvement par an a également évolué entre 1989 et 2016 :

- 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 : 9 prélèvements.

Ces différences de protocole, dues à différents facteurs, rendent la comparaison des moyennes annuelles délicates (cf. Figure 44). On note cependant une diminution de la concentration de la Chlo A 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 2016 n'est pas corroborée par les mesures de biomasses (comptages microscopiques).

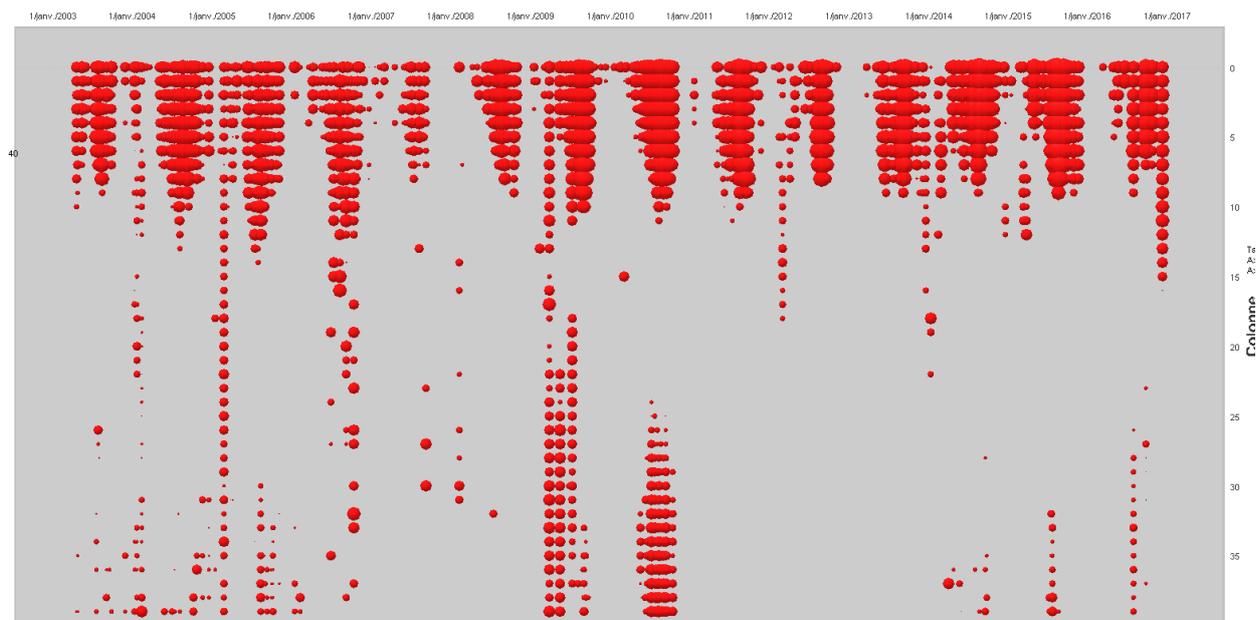


**Figure 44:** Evolution de la Chlorophylle a dans le lac d'Aiguebelette. La moyenne annuelle, pondérée par le nombre d'échantillons par mois est calculée à partir des moyennes mensuelles

#### 6.2.5. Etude des profils obtenus via la sonde fluorimétrique BBE

Les figures 45 à 48 présentent l'évolution de la concentration en ChloA pour les différentes classes algales entre 2003 et 2017 entre 0 et 40 m de profondeur. On observe bien pour chacune des classes algales des schémas cycliques correspondant à ceux présentés dans l'évolution de la biomasse des classes algales phytoplanctoniques. L'information supplémentaire apportée par ces profils est la répartition en profondeur de ces différentes classes algales :

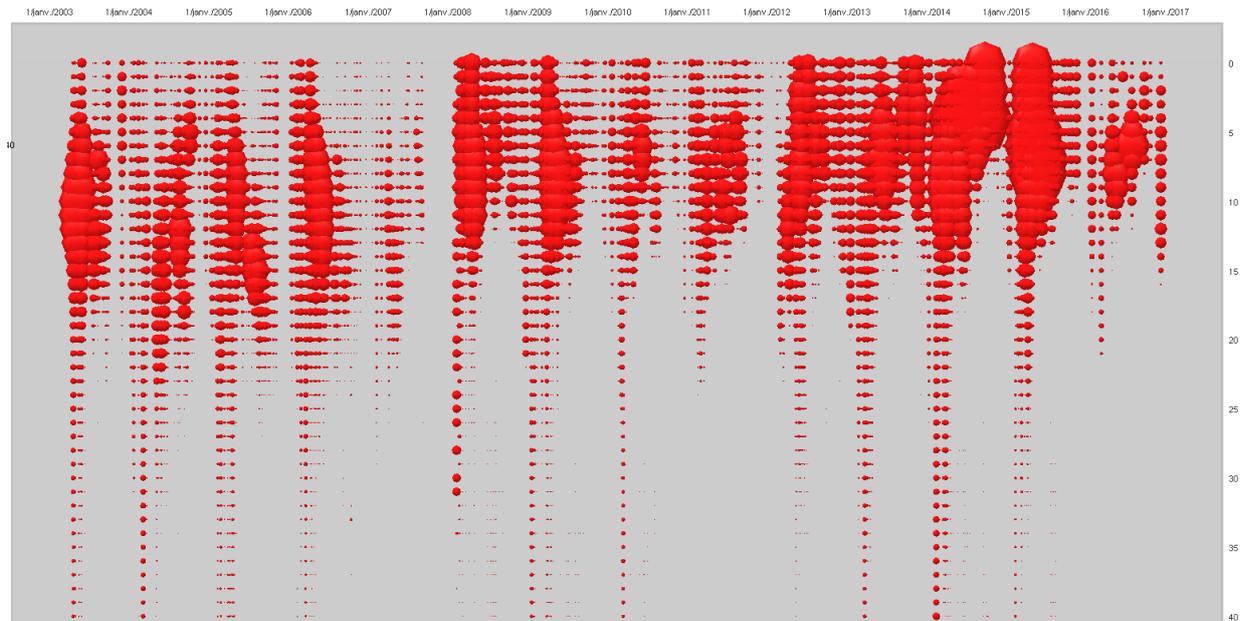
- Les Diatomées se développent dans des eaux allant de 0 à 15 m de profondeur, principalement au printemps. Leurs biomasses sont élevées dans le lac d'Aiguebelette.
- Les Chlorophycées sont surtout présentes en surface (entre 0-10 m), mais également plus en profondeur et se développent plutôt en été.
- Les Cyanobactéries sont surtout présentes dans les couches d'eau profondes, c'est à dire au delà de 20 m. Elles sont surtout présentes en fin d'été.
- Enfin, les Cryptophycées se développent entre 5 et 15 m de profondeur à différentes saisons selon les années.



**Figure 45:** Evolution de la concentration en Chlorophylle a représentée par les Chlorophycées entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.



**Figure 46:** Evolution de la concentration en Chlorophylle a représentée par les Cyanobactéries entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.



**Figure 47 :** Evolution de la concentration en Chlorophylla représentée par les Diatomées entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.



**Figure 48 :** Evolution de la concentration en Chlorophylla représentée par les Cryptophycées entre 0 et 40 m entre 2003 et 2016.

## 7. Conclusion

Le suivi 2016 de la qualité des eaux du lac d'Aiguebelette montrent que les résultats concernant les principaux paramètres biologiques et physico-chimiques sont dans la continuité des suivis réalisés auparavant : le lac d'Aiguebelette a un niveau de Phosphore total stable depuis les années 2010 et son statut le classe parmi les lacs méso-oligotrophes. L'hiver 2015-2016 a été particulièrement chaud mais le reste de l'année se situe dans la moyenne des années précédentes. La composition et la biomasse du compartiment phytoplanctonique montrent que le statut du lac peut être considéré comme en voie de réoligotrophisation. Depuis 2009, la biomasse algale décroît et l'indice de qualité Brettum augmente : le lac est qualifié de méso-oligotrophe. L'année 2016 se caractérise par une faible importance du brassage hivernal et donc une

absence de ré- oxygénation des couches profondes de la colonne d'eau. Les concentrations en oxygène dissous à 60 m sont inférieures à  $1 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  pendant toute l'année. La transparence moyenne de 4,5 m en 2016 reste cohérente avec les valeurs des années précédentes, même si c'est une des valeurs la plus faible de la série, mais permet de rester dans la même valeur de la classe de qualité "bonne". La concentration moyenne annuelle pondérée de nitrate est la valeur la plus basse depuis 2003. Pour le Phosphore totale, la concentration moyenne pour l'année 2016 s'élève à  $7,0 \text{ } \mu\text{gP} \cdot \text{L}^{-1}$  : les concentrations en phosphore total ont des valeurs inférieures à  $10 \text{ } \mu\text{gP/L}$  depuis 2010, donc le lac peut être classé comme de type oligotrophe. Avec une valeur de moyenne hivernale de  $7,0 \text{ mgCl} \cdot \text{L}^{-1}$ , les concentrations moyennes hivernales de Chlorure restent à des niveaux stables et faibles. L'ensemble des paramètres suivis indique bien une stabilité des principaux paramètres biologiques et chimiques de l'écosystème ; le lac est en voie de réoligotrophisation, en étant soumis aux variabilités inter-annuelles.

**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, TEREQ, 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;DEC0470, 1-45. 2008. INRA Thonon.
- 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., REMEC-REKAR S., URBANIC G., 2007.** Intercalibration Exercise, Technical Report + Annexes, Alpine GIG (Lakes). 2007. Vienna - Ispra.