

## ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

### PHYSICO-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA AND METEOROLOGICAL DATAS

CAMPAGNE 2017

PAR

**Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE**

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (INRA-UMR/CARRETEL), BP 511, FR - 74203 THONON-LES-BAINS Cedex

#### **RÉSUMÉ**

*L'année 2017 peut être considérée comme relativement chaude. La température moyenne annuelle inter-stations est de 11.5 °C. Le mois de janvier est particulièrement froid avec -0.8°C de température en moyenne inter-stations.*

*L'année 2017 a une moyenne inter-stations des précipitations de 833.7mm, et présente un déficit de 17.4 % par rapport à la moyenne 1981-2010. L'année 2017 est classée au 32<sup>e</sup> rang (sur 38) de la chronologie pluviométrique 1980-2017.*

*En général, l'année 2017 est ensoleillée avec une moyenne annuelle inter-stations de 2089 heures, soit supérieure à la normale 1981-2010 qui est de 1854 heures. La somme d'insolation de février et juin est de 193 heures supérieures à sa moyenne inter-stations.*

*Malgré un mois de janvier particulièrement froid, les conditions climatiques en 2017 n'ont pas permis une homogénéisation complète de la colonne d'eau. La profondeur du brassage partiel hivernal est à 190m. Par conséquent, les couches profondes ne sont pas réoxygénées.*

*En 2017, l'activité phytoplanctonique printanière débute dès la fin du mois de mars, entraîne une baisse des nutriments conjointement à une augmentation de la matière organique. En juin, le phytoplancton est fortement diminué par le développement du zooplancton ce qui délimite une phase des eaux claires. Par la suite, un pic automnal correspondant à la reprise de l'activité phytoplanctonique apparaît à la fin de l'été 2017.*

*Les concentrations en oxygène dissous à 309m de l'année 2017 restent en dessous de 4mgO<sub>2</sub>/L du mois de janvier à novembre. L'effet du brassage complet de 2012 n'est plus bénéfique après 5 années.*

*Les concentrations moyennes annuelles en phosphore total et phosphore soluble réactif diminuent par rapport à l'année 2016 avec les valeurs annuelles moyennes respectives de 17.75 µgP.L-1 et 14.79 µgP.L-1*

## **ABSTRACT**

*The year 2017 can be considered a moderately warm year. The annual average inter-plant temperature in 2017 was 11.5 °C. January was a particularly cold month with an annual average inter-plant temperature of -0.8°C.*

*The year 2017 had an average inter-plant precipitation of 833.7mm and showed a rainfall deficit of 17.4% compared to normal for 1981-2010. The year 2017 was ranked in 32th place in the rainfall chronology between 1980 and 2017.*

*In general, the year 2017 has an annual average inter-plant sun exposure of 2089 hours, superior to normal for 1981-2010, which was 1854 hours. The total sun exposure from February to June showed a surplus of 193 hours compared to normal for 1981-2010.*

*In spite of a particularly cold January, the climatic conditions in 2017 did not permit a complete homogenization of the water column of Lake Geneva. The partial mixing has reached 190m depth. The incomplete homogenization does not permit re-oxygenation of the lower layer and redistribution of the nutrients throughout the water column.*

*In 2017, the spring phytoplankton activity began at the end of March, leading to a decrease in nutrients and an increase in particulate organic matter. In June, a reduction of algae by zooplankton development delineated a clear-water phase. Subsequently, the autumnal peak correspond to the recovery of photosynthesis at the end of summer 2017.*

*The dissolved oxygen concentration at 309 m remained under 4mgO<sub>2</sub>/L from January to November 2017. Re-oxygenation does not occur in deep water after the complete mixing in 2012.*

*The annual average concentration of total phosphorus and orthophosphate continue to decrease comparing to 2016 and are respectively 17.75 µgP/L and 14.79 µgP/L.*

## 1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman en 2017, plus précisément du Grand Lac à la station SHL2, et présente l'évolution de 17 paramètres (température, pH, conductivité, titre alcalimétrique complet, oxygène dissous, phosphore total, orthophosphate, phosphore total particulaire, azote total, azote ammoniacal, nitrate, azote organique particulaire, chlorure, carbone organique particulaire, silice, chlorophylle-*a* et transparence).

Le suivi de la physico-chimie des eaux du Grand Lac (éléments majeurs) est en place depuis 1957.

Le suivi du Petit Lac a lieu tous les 5 ans. Le dernier suivi a été réalisé en 2015, par conséquent le prochain est prévu en 2020.

L'ensemble des conditions météorologiques de l'année 2017 (température de l'air, pluviométrie, insolation, rayonnement global et vents) est intégrée à ce rapport et figure en annexe IV. Cette annexe prend en compte les données des quatre stations météorologiques de Genève-Cointrin, Changins, Pully et Thonon-INRA.

Le présent rapport utilise les données du suivi environnemental du Léman fournies par l'Observatoire SOERE OLA (Observatoire des Lacs Alpins) pour la période 1973-2017 (SOERE OLA-IS 2017).

## 2. METHODES

Les stations de mesure des paramètres physico-chimiques dans les eaux du Léman sont représentées sur la figure 1.

- SHL2, qui fait l'objet de ce rapport, est située au centre du Grand Lac entre Evian et Lausanne (coord. CH : 534.700/144.950) et correspond à la partie la plus profonde du lac (-309.7 m) ;
- GE3 située au centre du Petit Lac dans la fosse de Chevrens entre Coppet et Chevrens (coord. CH : 506.100/128.040) (-71 m).

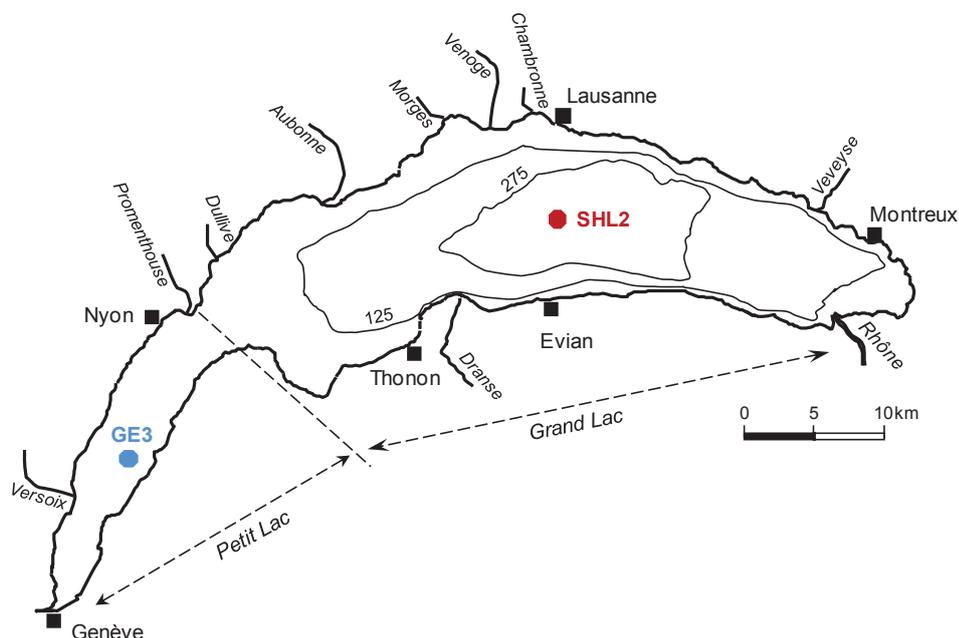


Figure 1 : Situation des points de prélèvement sur le Léman

Figure 1 : Location of the sampling stations in lake Geneva

La station SHL2 est admise comme représentative de l'évolution à long terme du Grand Lac au point de vue physico-chimique (BLANC et *al.*, 1993). Les stocks et concentrations moyennes pondérées sont calculés à partir des mesures obtenues sur les prélèvements à différentes profondeurs en ce point SHL2 (Annexes II et III).

Afin de déterminer l'évolution de la qualité des eaux du Grand Lac, les prélèvements sont effectués à 20 profondeurs au point SHL2 : 0 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 250 ; 275 ; 290 ; 300 ; 305 et 309 m.

La fréquence d'échantillonnage est adaptée au cycle biologique du lac : lorsque l'activité biologique et la composition chimique du lac changent, la fréquence du suivi est plus importante. Elle suit le plan suivant : mensuelle de décembre à février, mois pendant lesquels l'activité biologique est réduite ; bimensuelle de mars à novembre, lorsque l'activité est intense et que le lac subit de fortes et rapides fluctuations des conditions environnementales.

Il y a eu 19 campagnes de prélèvements en 2017, réparties selon les dates indiquées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Dates des campagnes de prélèvement, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table 1 : Dates of the sampling campaigns, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Campagne n°	Date
1	30.01.2017
2	15.02.2017
3	08.03.2017
4	20.03.2017
5	10.04.2017
6	02.05.2017
7	15.05.2017
8	01.06.2017
9	20.06.2017
10	04.07.2017
11	18.07.2017
12	09.08.2017
13	22.08.2017
14	04.09.2017
15	25.09.2017
16	09.10.2017
17	24.10.2017
18	21.11.2017
19	21.12.2017

Les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'UMR CARTEL INRA de Thonon-les-Bains (Unité Mixte de Recherche entre l'INRA et l'Université de Savoie ; Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques), qui procède également à diverses mesures « *in-situ* ». Lors de chaque prélèvement, une sonde de pression est couplée à la bouteille de prélèvement afin de déterminer la profondeur réelle de prélèvement. L'étude des relevés de la sonde indique un écart moyen d'un mètre par rapport à la profondeur théorique et une variabilité allant de 0 à 5 m. Ces écarts sont considérés comme acceptables pour la présente étude.

Les échantillons sont analysés par le laboratoire de chimie de l'UMR CARTEL INRA de Thonon-les-Bains. Les méthodes utilisées selon les normes de qualité de l'eau normalisées AFNOR et comparées par des analyses inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. Les derniers résultats obtenus en octobre 2015 par les différents laboratoires sont concordants (VARGAS, 2016). Les analyses sont validées par des cartes de contrôle de justesse et de fidélité. Les incertitudes élargies des méthodes sont indiquées dans l'annexe IV.

Lors de chaque campagne, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH et chlorophylle *a in vivo* sont réalisés à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable (BLANC et *al.*, 1993). Dans le même temps, une mesure de la transparence est effectuée en observant la profondeur de disparition d'un disque de Secchi normalisé (disque noir et blanc, 20 cm). De 1957 à mi-2009, cette mesure était effectuée uniquement avec le disque de Secchi 'INRA' non-normalisé (disque blanc d'un diamètre de 30 cm).

Une comparaison de la transparence entre les deux types de disque de Secchi a été réalisée de mi-2009 à 2015. L'analyse par régression linéaire des résultats présentée dans le précédent rapport d'activité (BARBIER et al., 2016) montre que les valeurs obtenues pour les deux types de disques sont significativement corrélées ( $R^2 = 0,93$  ;  $n > 100$ ). Depuis 2016, seul le disque de Secchi normalisé est employé.

### 3. METEOROLOGIE : INFLUENCE SUR LA STRATIFICATION ET LE MELANGE DES EAUX

En 2017, la température moyenne annuelle de l'air inter-stations est de 11.5 °C, soit supérieure à la normale de la période 1981-2010, dont la moyenne est de 10.8°C. L'année 2017 se distingue de la chronique avec un mois de janvier particulièrement froid : la moyenne inter-stations de janvier est de -0.8 °C alors que la moyenne inter-stations de janvier de 1981-2010 est de 2.1°C. Du mois de février au mois d'août, la moyenne inter-stations est supérieure à la normale tandis qu'elle est inférieure à la normale de la période 1981-2010 du mois de septembre au mois de décembre (Annexe V).

La température moyenne pondérée des couches d'eau superficielles (0-10m) montre un mois de janvier plus froid (6.4 °C) et des mois de juillet et août plus chauds (21.1 °C et 21.9 °C) en 2017 par rapport à l'année 2016 (Figure 2).

Malgré la basse température de l'air et de l'eau au mois de janvier, les conditions météorologiques de l'hiver 2017 n'ont pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. D'après les campagnes du suivi du Léman, un brassage partiel a eu lieu jusqu'à 190m de profondeur à la date du 08 mars 2017 (Figure 3a, Figure 4). Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 5.6 °C le 30 janvier 2017 soit 0.1°C et 0.2°C de plus qu'en 2016 et 2015. Ce brassage n'a pas été suffisant pour réoxygéner l'eau des couches profondes du lac. La concentration en oxygène dissous mesuré au fond du lac est de 2.99 mgO<sub>2</sub>/L lors du brassage (Figure 3a).

Au mois de mars en 2017, la température moyenne de l'air inter-stations est de 9 °C, soit 3.1°C de plus par rapport à l'année 2016. Les couches superficielles se réchauffent plus tôt au 20 mars 2017 et la stratification thermique se met en place ce qui entraîne la reprise de l'activité phytoplanctonique (Figure 3b, Figure4). D'après les analyses au laboratoire, la concentration maximale en chlorophylle-a pour l'année 2017 est de 15.98µgChla/L à 3.5m au 20 mars 2017, qui correspond à un pic d'oxygène dissous à 13.27 mgO<sub>2</sub>/L. Le maximal pic d'oxygène épilimnique est observé à 15.57 mgO<sub>2</sub>/L le 15 mai 2017. Néanmoins, ce pic d'oxygène dissous ne correspond pas à une concentration maximale en chlorophylle-a.

La température maximale en surface est observée le 18 juillet 2017 avec 24.5°C contre 22.2°C et 24.8°C au mois d'août en 2016 et en 2015 (Figure 3c). L'arrivée de l'automne engendre la destratification thermique de la masse d'eau (Figure 3d).

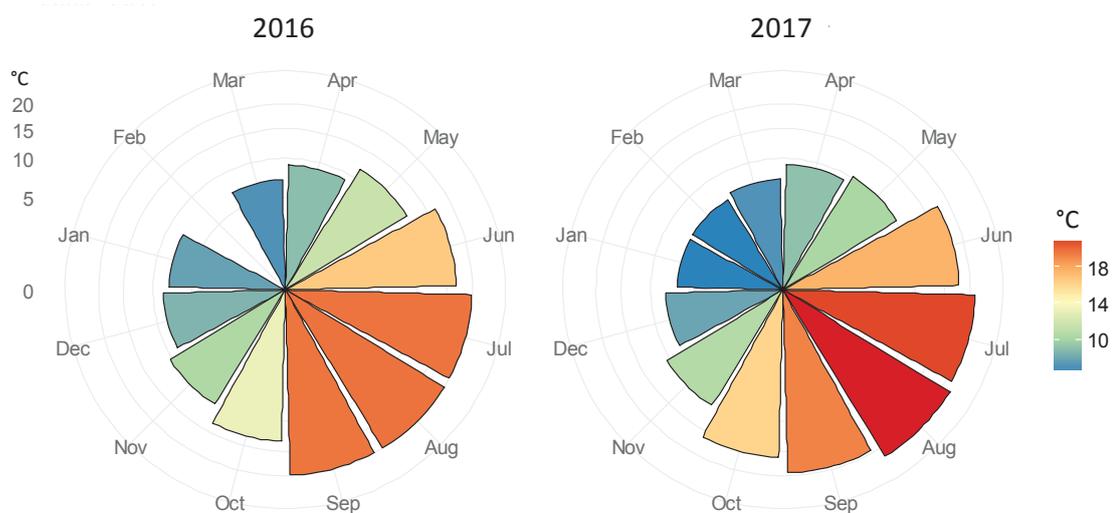


Figure 2 : Température moyenne mensuelle pondérée dans la couche superficielle (0-10 m) en 2016 et 2017, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 2 : Monthly weighted average temperature in water surface layer (0-10m) in 2016 and 2017, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

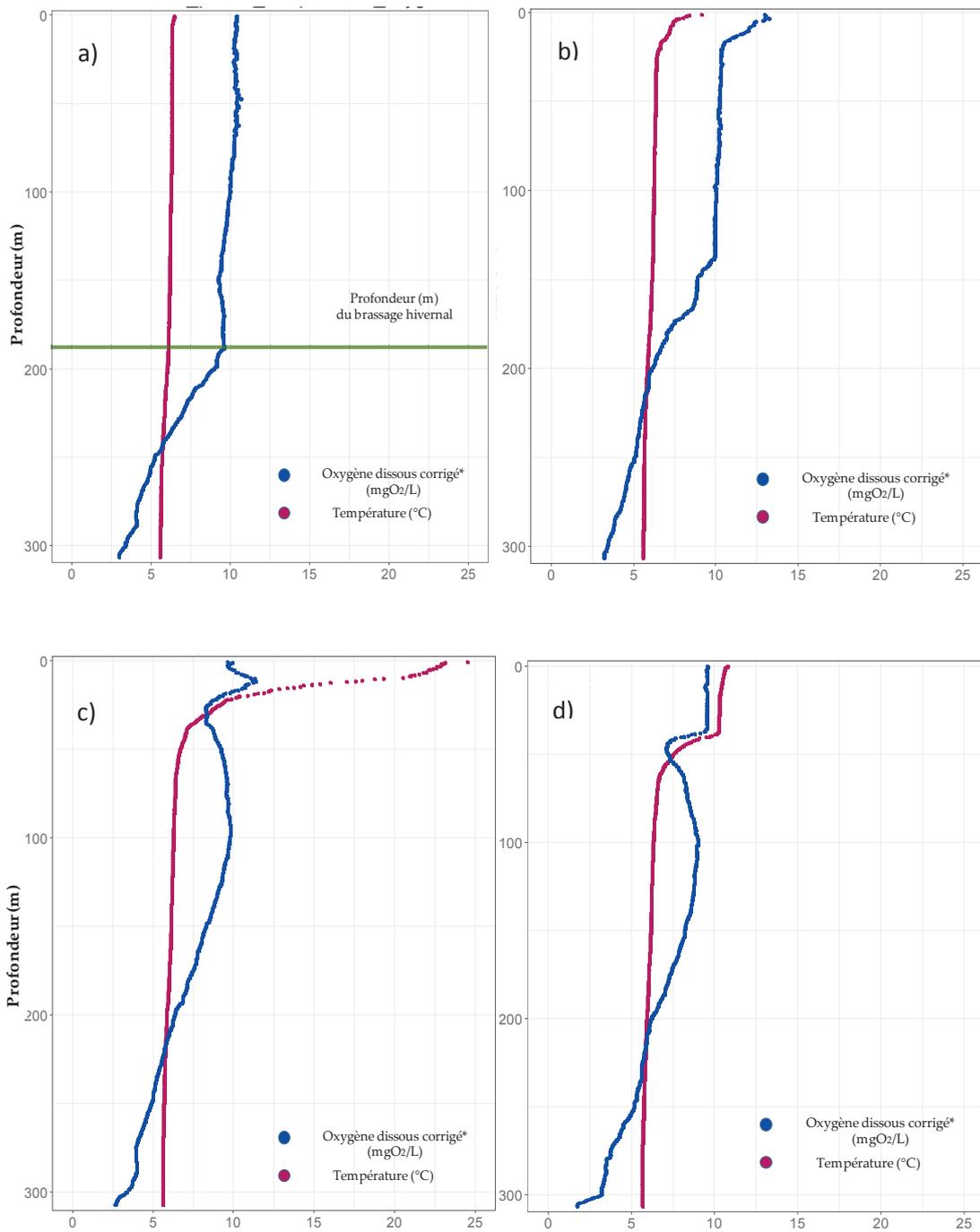


Figure 3 : Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman - Grand Lac (SHL2) :  
a) en hiver lors du brassage partiel maximal (08.03.2017),  
b) au printemps (20.03.2017),  
c) en été (18.07.2017),  
d) en automne (21.11.2017).

Figure 3 : Physico-chemical profile made using multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2) :  
a) in winter after maximal water mixing (08.03.2017),  
b) in spring (20.03.2017),  
c) in summer (18.07.2017),  
d) in autumn (21.11.2017).

\* Profil de sonde pour la concentration en oxygène dissous corrigée par une homothétie avec les mesures effectuées en laboratoire selon la méthode de Winkler sur des échantillons de profondeur définie

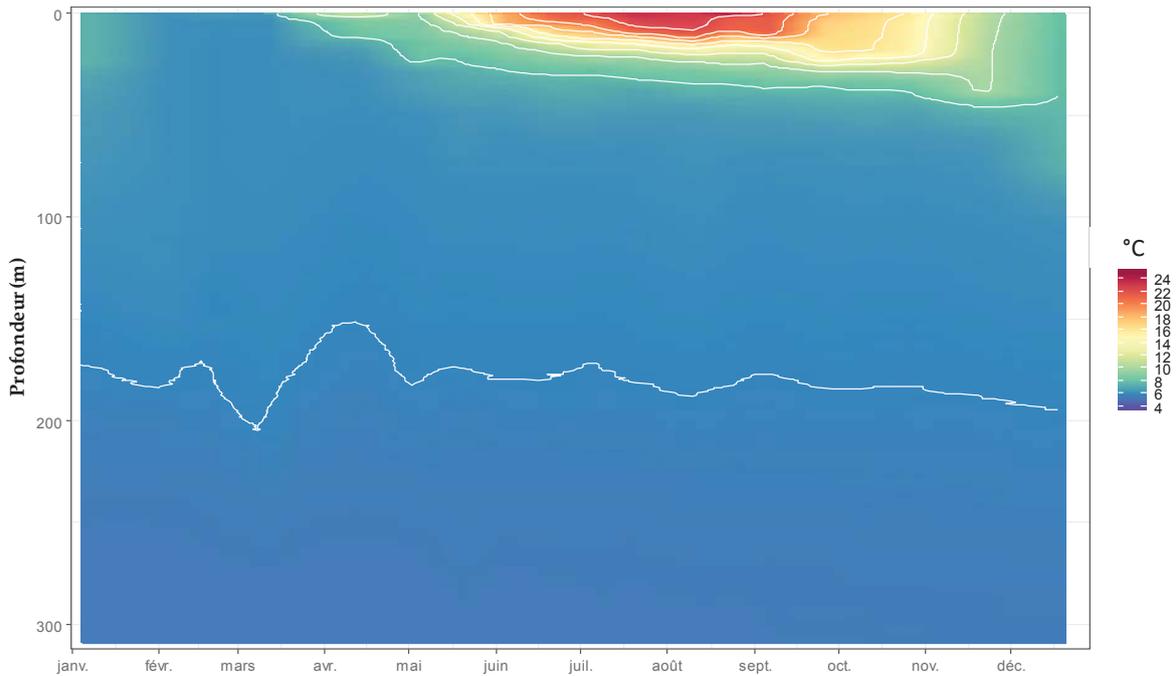


Figure 4 : Température des eaux du lac en 2017 (iso-contour en blanc), Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 4 : Water temperature in the lake in 2017 (iso-contour lines in white), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

La variation saisonnière et interannuelle de la température de différentes couches d'eau est présentée dans la figure 5. Les couches d'eau à 50m et 100m représentent une variabilité saisonnière et interannuelle plus marquées que les couches profondes de 200m et 309m. Le brassage complet de la colonne d'eau permet de refroidir les couches superficielles. A l'issue de chaque brassage complet, la température des couches d'eau diminue. Cet effet du mélange complet est net pour les trois années 1984-1986 et les deux années 2005-2006 où la colonne d'eau est complètement mélangée.

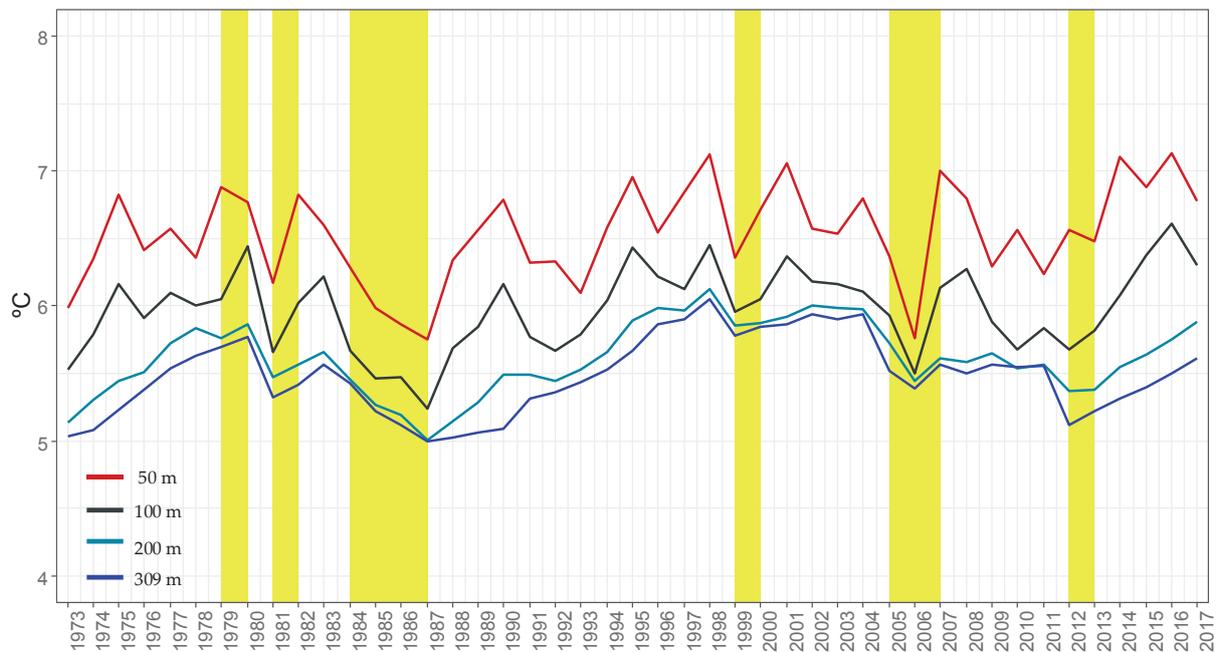


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1973 à 2017, Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 5 : Inter-annual changes in annual mean water temperature in the lake at depths of 50, 100, 200 and 309 meters from 1973 to 2017, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La température moyenne annuelle pondérée dans la couche superficielle (0-10m) montre une tendance de réchauffement de cette couche d'eau (figure 6). L'effet de refroidissement de la colonne d'eau est également observé pour les années : 1979, 1981, 1984-1986, 1999, 2005-2006 et 2012.

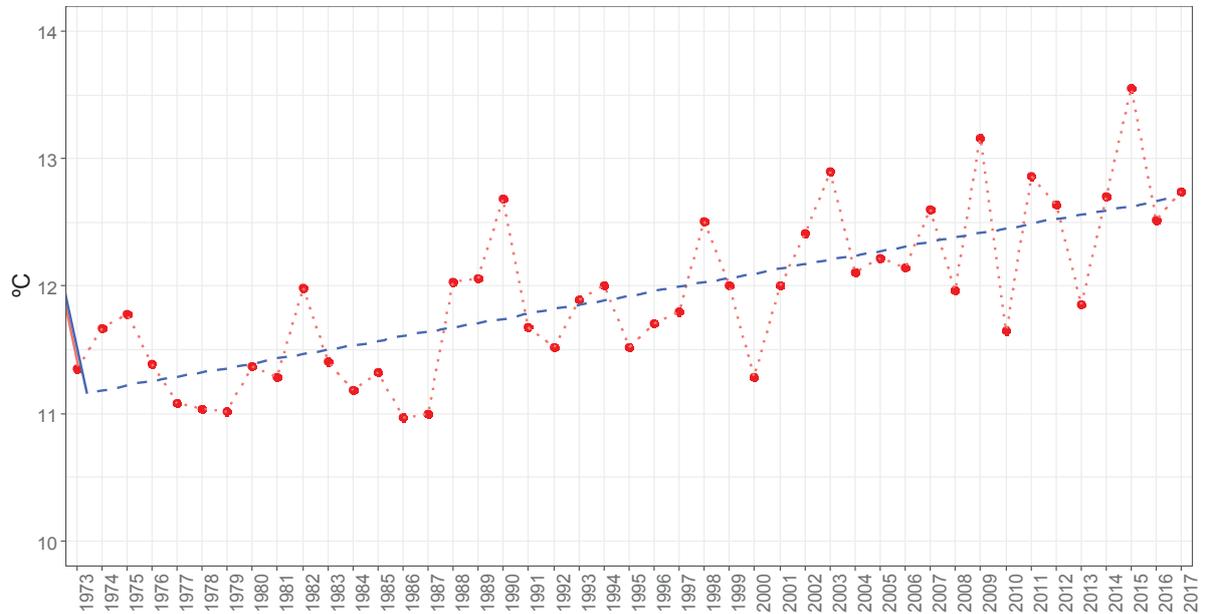


Figure 6 : Evolution de la température moyenne annuelle pondérée de l'eau de la couche superficielle (0-10m) de 1973 à 2017, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 6 : Inter-annual changes in the weighted annual average water temperature of the top layer (0-10m) from 1973 to 2017, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La température dans les couches superficielles (0-10m) pour les mois hivernaux (janvier, février, novembre et décembre) en 2017 est comprise dans la distribution de température de la période 1973-2016. Du printemps à l'automne, la température est supérieure à sa valeur de 75% percentile du 1973-2016.

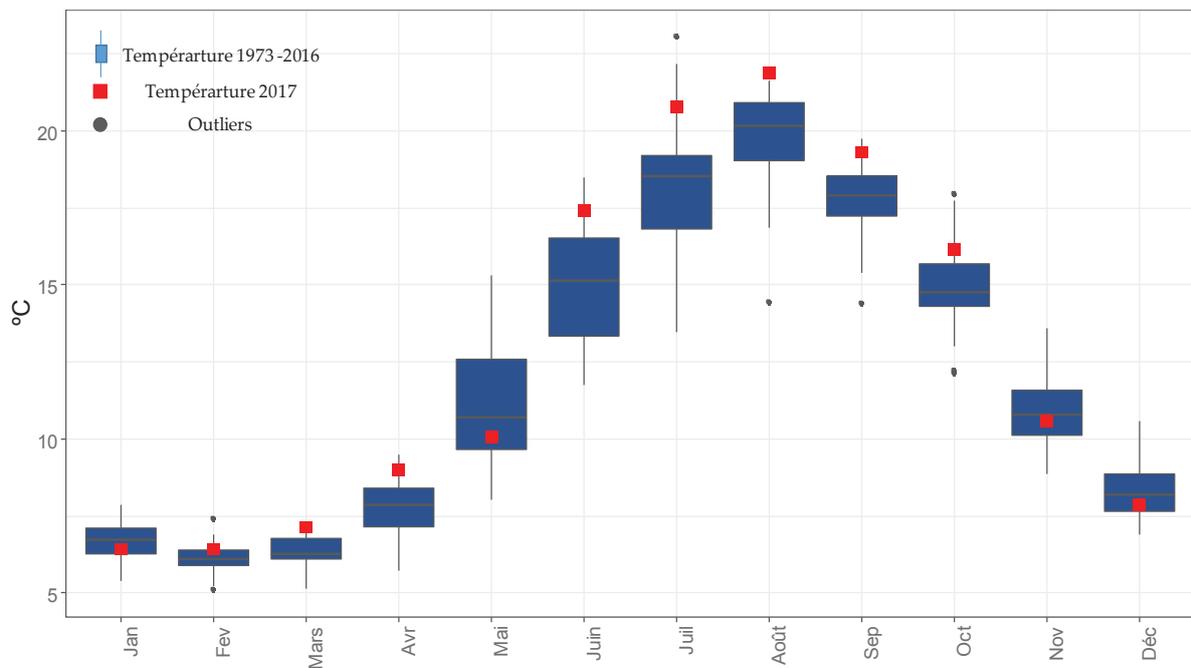


Figure 7 : Température moyenne mensuelle de l'eau de la couche superficielle (0-10m) du 1973-2016 (boxplot) et en 2017 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2)

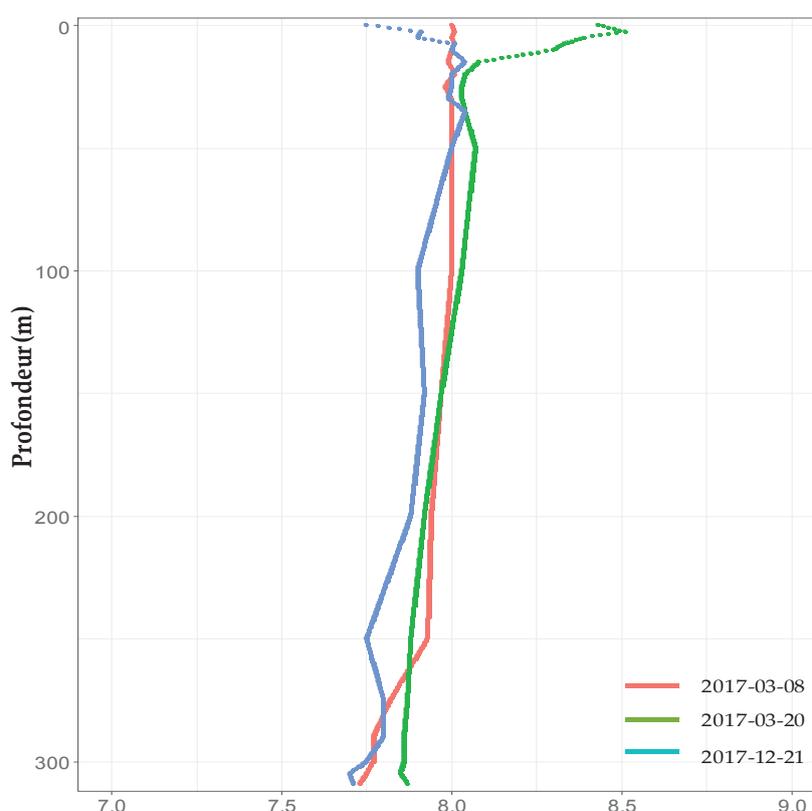
Figure 7 : Monthly average water temperature of the top layer (0-10m) from 1973 – 2016 (boxplot) and in 2017 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

## 4. CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIQUE DU LÉMAN

### 4.1 PH

Le pH dépend de la température, par conséquent, cette mesure est corrigée puis exprimée par convention à 25°C.

La figure 8 représente l'évolution saisonnière du pH dans la colonne d'eau du lac. A l'issue du brassage hivernal partiel jusqu'à 190 m, le pH de la colonne d'eau oscille entre 7.64 et 7.93 tel que l'on peut l'observer sur le profil du 08 mars 2017 en rouge sur la figure 8. La reprise de l'activité phytoplanctonique printanière provoque une augmentation du pH des couches superficielles dès la fin du mois de mars 2017. Cette hausse est provoquée par la consommation de CO<sub>2</sub> lors la photosynthèse. Le CO<sub>2</sub> étant consommé, l'équilibre acido-basique du milieu est modifié et le pH augmente. Lors du pic phytoplanctonique le 20 mars 2017, le pH moyen mesuré dans les couches d'eau superficielle entre 0-10m est de 8.39, soit 0.5 supérieur à la valeur du pH au mois de janvier 2017. Le pH moyen atteint une valeur maximale de 8.63 le 04 juillet 2017, plus tardivement qu'en 2016 où ce phénomène a été observé le 24 mai 2016.



\* Mesure du pH à 25°C effectuée en laboratoire à des profondeurs définies

Figure 8 : pH des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (—), à la reprise d'une activité photosynthétique significative et à l'issue de la déstratification de la colonne d'eau (—), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8 : pH in the lake as a function of depth after maximal water mixing (—), during recovery of significant photosynthetic activity (—) and after water column destratification (—), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 9 représente l'évolution du pH dans les couches d'eau superficielles (0 - 30 m) de 1973 à nos jours. On constate que la valeur de pH en 2017 est plus forte au mois de mars et plus faible aux mois de mai et août par rapport à l'historique des données de 1973 - 2016. Ceci correspond au fait que le pic de la concentration en chlorophylle-a lié à l'activité phytoplanctonique au mois de mars en 2017 est arrivé plus tôt que les années précédentes.

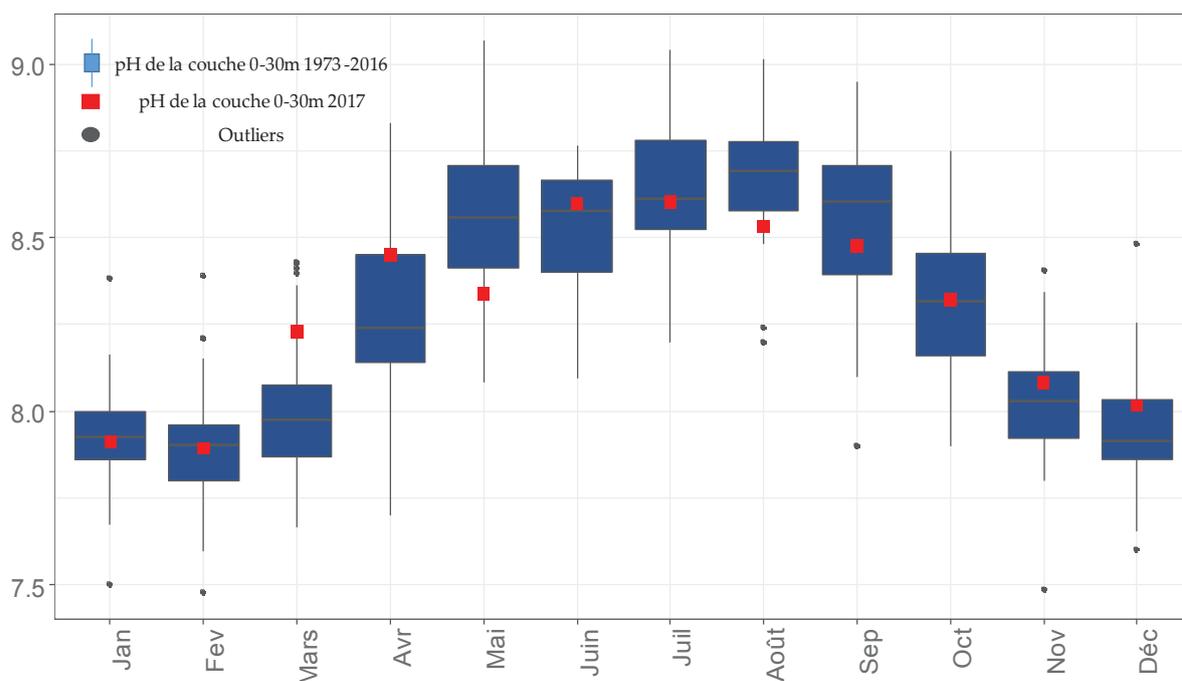


Figure 9 : Evolution du 90<sup>e</sup> percentile du pH mensuel à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 –30 m) de 1973 à 2016 (boxplot) et en 2017 (carré rouge), Léman - Grand Lac (SHL2)

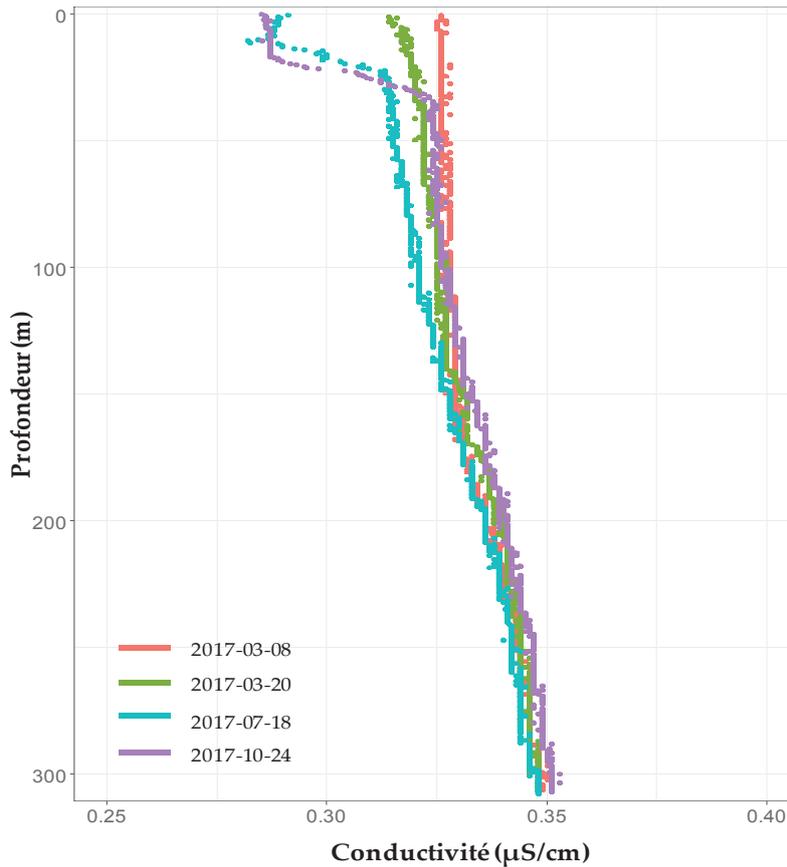
Figure 9 : Change in 90<sup>th</sup> percentile of monthly pH at 25°C in lake's water surface layer (0 - 30 m) from 1973 to 2016 (boxplot) and in 2017 (red square), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

## 4.2 CONDUCTIVITÉ

La conductivité permet de quantifier la somme des sels dissous présents dans l'eau. Cette mesure est aussi dépendante de la température, par conséquent, celle-ci est corrigée puis exprimée par convention à 25 °C.

La figure 10 représente l'évolution saisonnière de la conductivité dans la colonne d'eau du lac. Au moment du brassage hivernal, la conductivité n'est pas homogène dans la colonne d'eau et varie entre 325 et 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Par la suite, la conductivité commence à diminuer de manière significative à la fin du mois de mars dans l'épilimnion à partir de la reprise de l'activité phytoplanctonique. Cette diminution en conductivité est maximale durant les mois juillet et août. La photosynthèse induite par le développement du phytoplancton entraîne donc l'augmentation du pH qui modifie à son tour l'équilibre calco-carbonique et favorise la précipitation et la sédimentation de carbonate de calcium. Le calcium influençant significativement la conductivité, sa précipitation donne lieu à une diminution de cette dernière. On constate un décalage temporel entre l'augmentation du pH dans les couches d'eau superficielles qui débute dès le printemps et la diminution nette de la conductivité en été. La conductivité minimale dans l'épilimnion est observée le 22 août 2017 avec des valeurs proches aux alentours de 266  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de 0 à 10 m tel que cela est représenté en vert sur la figure 10.

De plus, on observe que la conductivité augmente dans l'hypolimnion au-delà de 50 m. Ce phénomène s'explique par la minéralisation de la matière organique par l'activité bactérienne qui induit une désoxygénation provoquant le relargage de plusieurs sels dissous.



\* Mesure de la conductivité à 25°C est effectuée en laboratoire à des profondeurs définies

Figure 10 : Conductivité des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (—), lors du démarrage significatif de la précipitation du carbonate de calcium (—), lors de sédimentation maximale du carbonate de calcium (—) et lors de l'enfoncement maximal de la thermocline (—), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10 : Conductivity in the lake as a function of depth after maximal water mixing (—), during the beginning of significant calcium carbonate precipitation (—), during maximal calcium carbonate sedimentation (—) and after thermocline deepening (—), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

#### 4.3 TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est la grandeur utilisée pour mesurer la teneur d'hydrogénocarbonate, de carbonates et d'hydroxydes. La variation du TAC dans la colonne d'eau peut être expliquée par la précipitation des ions carbonates avec le calcium dans les couches d'eau superficielles et le relargage des sels dissous dans l'hypolimnion.

Dans les couches d'eau superficielles, le titre alcalimétrique complet moyen pondéré varie entre 1.67 et 1.75 meq/L. Il atteint une valeur maximale dans la colonne d'eau à 1.75 meq/L le 10 avril 2017 pendant le printemps et diminue parallèlement à la baisse de la conductivité ce qui s'explique par la précipitation des ions carbonates avec le calcium. Le titre alcalimétrique complet minimum dans l'épilimnion est minimal en fin d'été avec environ 1.49 meq·L<sup>-1</sup>. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2016.

La figure 11 représente la moyenne pondérée du titre alcalimétrique des eaux superficielles (0 - 30 m) et des eaux du fond (250-309m) de 1981 à 2017. Dans les couches superficielles, la variabilité saisonnière du TAC est plus importante que dans les couches profondes. Il ne montre pas une modification temporelle à long terme. Dans les couches profondes, l'amplitude de la variation saisonnière du TAC est faible. Il reflète une tendance d'augmentation. Néanmoins, le brassage complet de la colonne d'eau réduit la concentration en TAC dans les couches profondes et réinitialise la tendance d'augmentation du TAC.

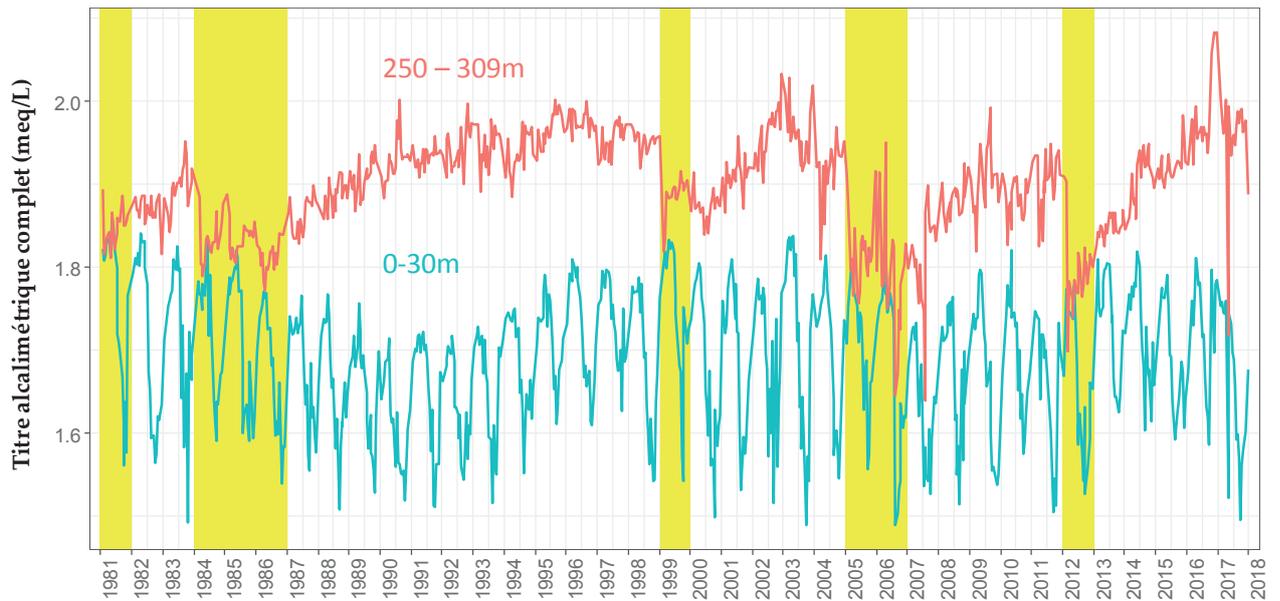


Figure 11 : Titre alcalimétrique complet moyen pondéré dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250-309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 11 : Weighted average total alkalinity in lake's water surface layer (0 - 30 m) and bottom layer (250-309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

## 5. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Un brassage hivernal des eaux d'un lac permet de remettre à disposition les nutriments dans la colonne d'eau à partir des couches inférieures plus concentrées et de réoxygéner les eaux du fond. L'hiver 2017 n'a pas permis un brassage complet, par conséquent les nutriments n'ont pas été redistribués de manière homogène tout le long de la colonne d'eau.

### 5.1 PHOSPHORE TOTAL ET ORTHOPHOSPHATE

La figure 12 représente la moyenne pondérée du phosphore réactif soluble ( $P-PO_4^{3-}$ ) des eaux superficielles (0 - 30 m) et des eaux profondes (250-309m) de 1981 à 2017.

Dans les couches superficielles, l'amplitude de la variabilité saisonnière du phosphore réactif soluble est plus importante avant les années 90. Cette amplitude diminue nettement au cours du temps et atteint une concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif de  $3.82 \mu\text{gP/L}$  dans les couches superficielles (0 - 30m) en 2017.

Dans les couches profondes, la concentration en phosphore réactif soluble montre une modification temporelle sur le long terme. La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif est de  $40.79 \mu\text{gP/L}$  dans les couches 250 - 309m en 2017. Le brassage complet de la colonne d'eau contribue à une réduction de la concentration en phosphore soluble réactif dans les couches profondes.

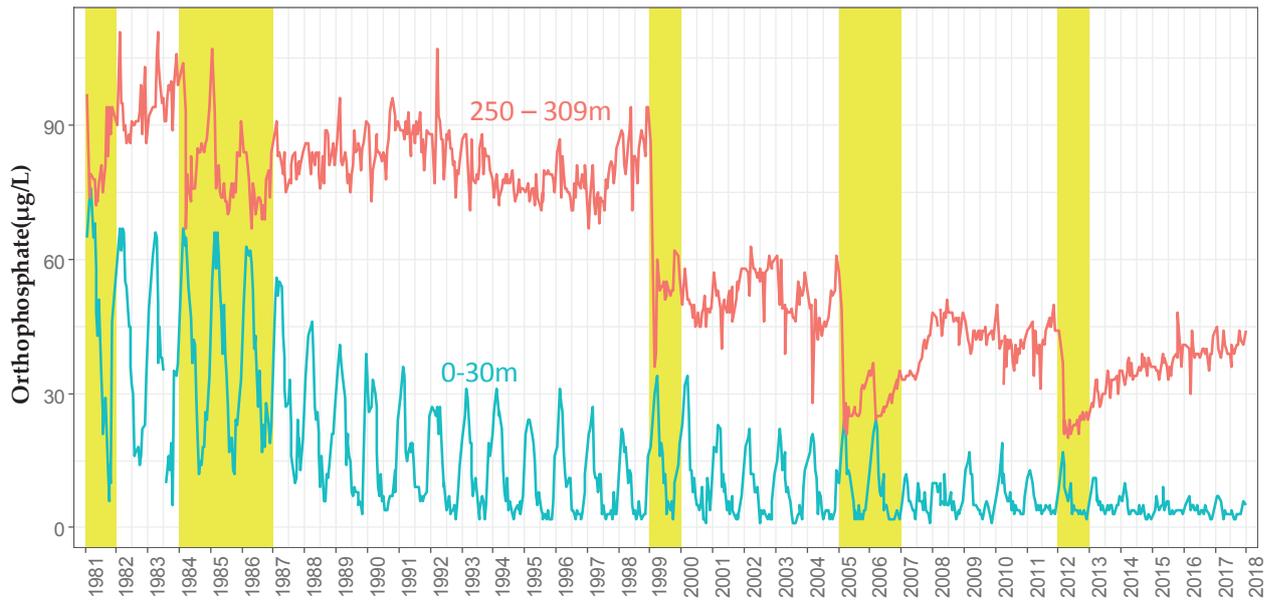
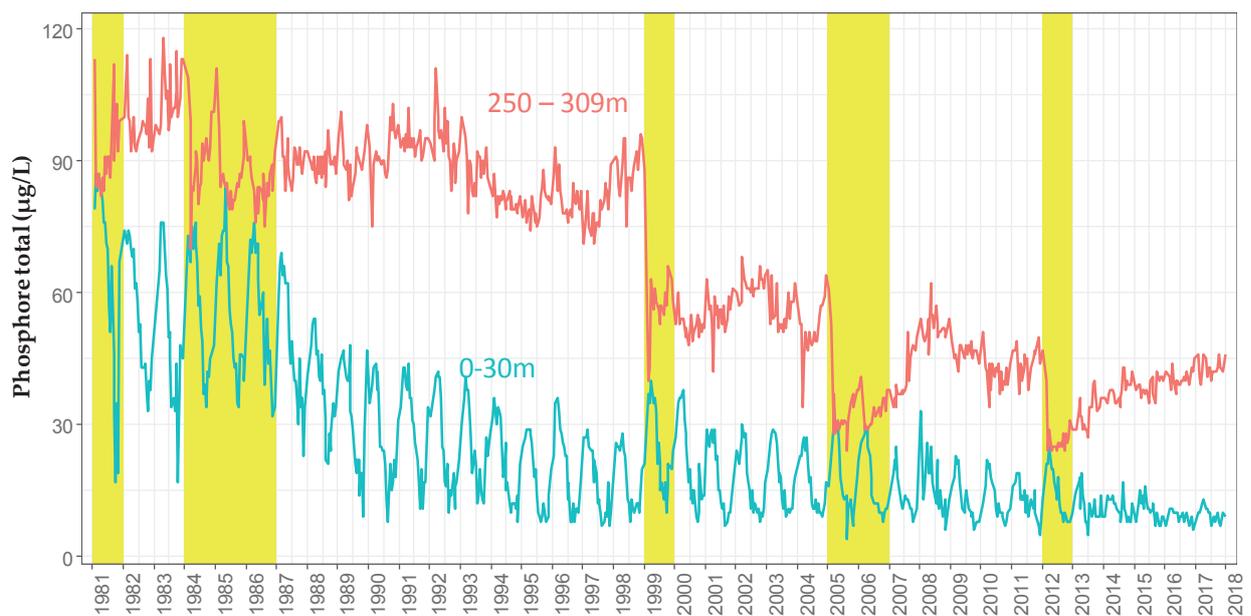


Figure 12 : Concentration moyenne pondérée en phosphore réactif soluble ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 12 : Concentration of soluble reactive phosphorus ( $P-PO_4^{3-}$ ) in lake's water surface layers (0 - 30 m) and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La figure 13 représente la moyenne pondérée du phosphore total (P-Ptot) des eaux superficielles (0 - 30 m) et des eaux profondes (250-309m) de 1981 à 2017.

La même observation que le phosphore soluble réactif est faite pour la concentration en phosphore total, à savoir la concentration en phosphore total diminue progressivement dans les couches superficielles et diminue nettement au fond après chaque brassage complet. La concentration annuelle moyenne pondérée en phosphore total en 2017 est de  $9.63 \mu\text{gP/L}$  dans les couches superficielles et de  $42.7 \mu\text{g/L}$  dans les couches profondes.



\*Les flèches indiquent les années où le brassage du Grand Lac fut complet ou presque complet

Figure 13 : Concentration moyenne pondérée en phosphore totale (P-Ptot) dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 13 : Concentration of totale phosphorus (P-Ptot) in lake's water surface layers (0 - 30 m) and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La figure 14 représente l'évolution depuis 1996 de la concentration moyenne pondérée en phosphore total et en phosphore soluble réactif dans la couche 0 - 30 m lors du brassage hivernal.

La concentration en phosphore soluble réactif, directement biodisponible, diminue progressivement au cours des années. Cependant, elle est de 5.96µgP/L, soit 1.96 µgP/L de plus par rapport à l'année 2016.

On constate une tendance globale à la baisse de la concentration en phosphore total sur cette chronique depuis 1996. Ce phénomène s'explique aisément par la diminution des apports au Léman liée à l'interdiction d'utiliser des phosphates dans les lessives en Suisse depuis 1986 puis en France à partir de 2007 ainsi qu'à l'augmentation des performances en matière de déphosphatation des STEP. La concentration en phosphore total reste stagnante à 10.89µgP/L.

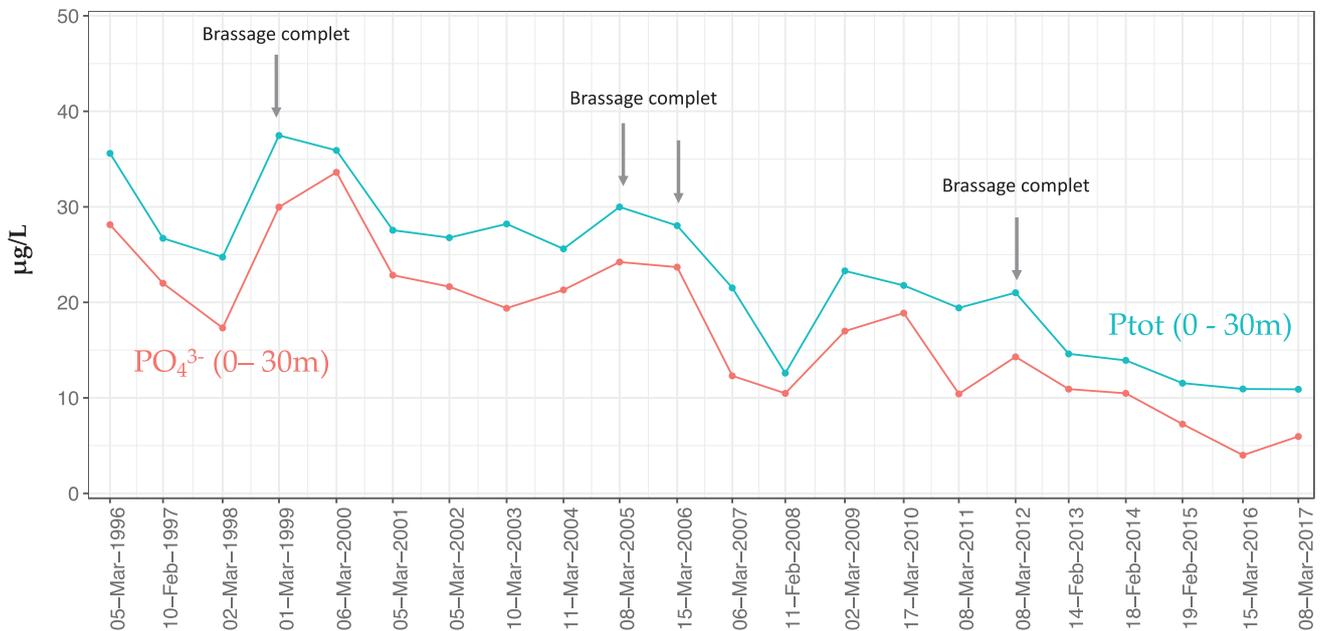


Figure 14 : Concentration moyenne pondérée en phosphore réactif soluble (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) et phosphore total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2017 à l'issue du brassage hivernal, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 14 : Weighted average concentration of soluble reactive phosphorus(P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) and total phosphorus in the lake's water surface layer of 0 - 30m from 1996 to 2016 after winter mixing, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

## 5.2 AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

La concentration moyenne en azote nitrique à l'issue du brassage partiel, le 08 mars 2017, est de 642  $\mu\text{gN/L}$  entre 0-20m, soit supérieur à l'année 2016 avec environ 561  $\mu\text{gN/L}$  (figure 15). Elle atteint un maximum le 30 janvier 2017 de 650  $\mu\text{gN/L}$ , soit supérieur à la valeur maximale en 2016 de 89 $\mu\text{gN/L}$ . Ceci peut s'expliquer en partie par la forte pluviométrie en octobre et novembre 2016 qui contribue à un apport important des ruissellements du bassin versant et des affluents vers le lac.

La concentration en azote nitrique des couches superficielles de 0 à 10 m diminue significativement dès la campagne suivant le brassage hivernal tel qu'on peut l'observer sur la figure 15. Par la suite, la consommation de l'azote nitrique continue et la concentration de cet élément atteint un minimum le 04 septembre 2017 avec 200  $\mu\text{gN/L}$  à la surface du lac. La consommation ralentit dès le mois de septembre et commence à s'accroître pour atteindre une concentration moyenne en azote nitrique entre 0m et 20m de 530 $\mu\text{gN/L}$  en décembre 2017.

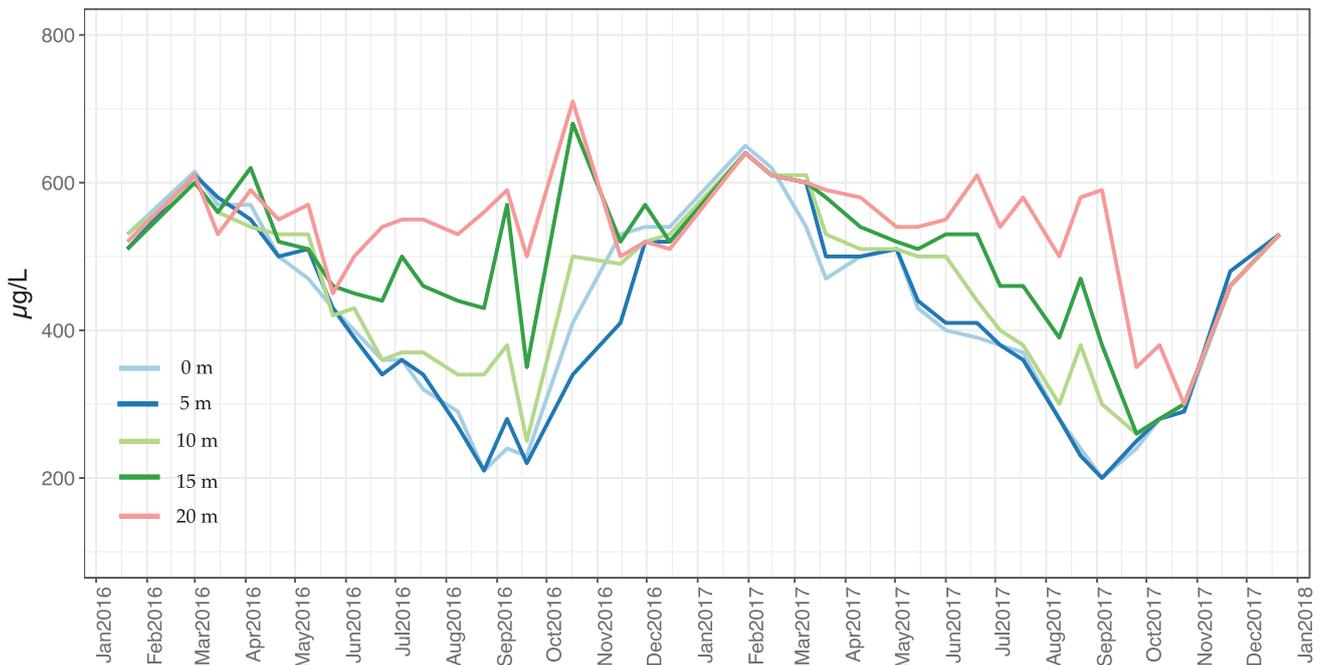


Figure 15 : Concentration en azote nitrique ( $\text{N-NO}_3$ ) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 15 : Concentration of nitrate ( $\text{N-NO}_3$ ) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 16 représente l'évolution de la concentration moyenne pondérée d'azote total et d'azote nitrique dans la couche 0 - 30 m lors du brassage hivernal de 1996 à 2017. On observe une relative stabilité de la teneur d'azote sur cette chronique. La concentration d'azote total et d'azote nitrique au 08 mars 2017 sont respectivement de 664 $\mu\text{gN/L}$  et de 601 $\mu\text{gN/L}$ , soit 56  $\mu\text{gN/L}$  et 45 $\mu\text{gN/L}$  supérieur à l'année 2016.

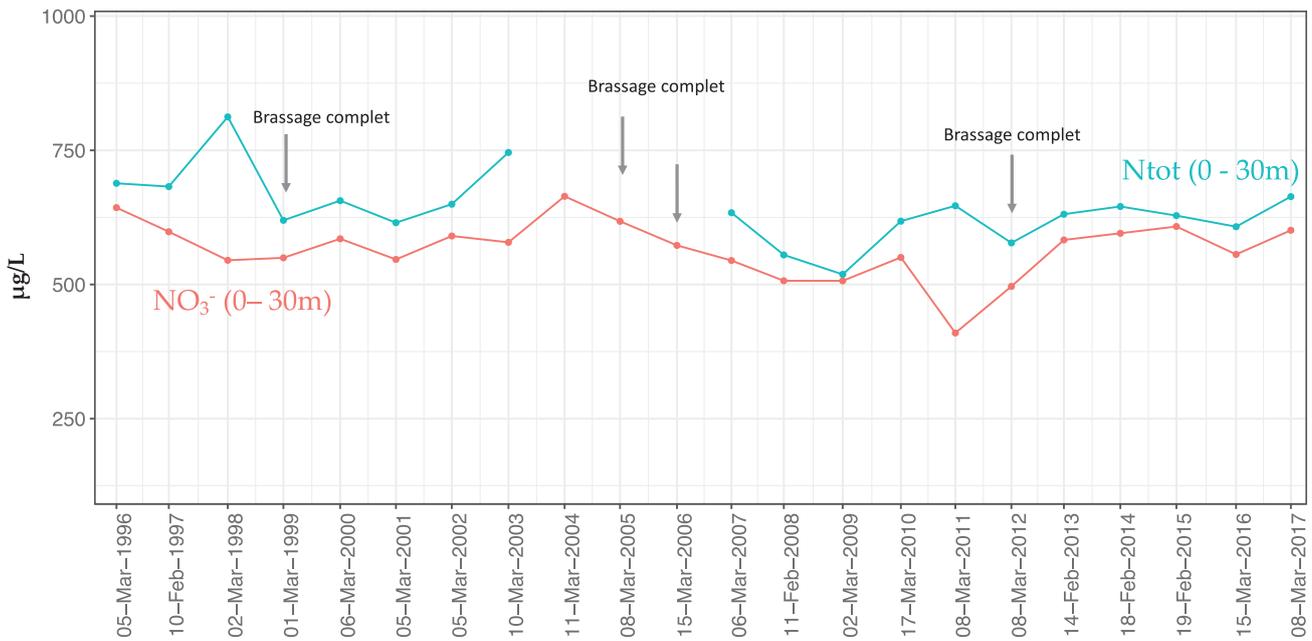


Figure 16 : Concentration moyenne pondérée en azote nitrique ( $\text{NO}_3^-$ ) et azote total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2017 à l'issue du brassage hivernal, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 16 : Weighted average concentration of nitrate( $\text{NO}_3^-$ ) and total nitrogen in the lake's water surface layer of 0 - 30m from 1996 to 2016 after winter mixing, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

L'activité zooplanctonique entraîne une augmentation significative de la concentration en azote ammoniacal du fait des excréments de ces organismes mais également des poissons et de la dégradation microbienne de la matière organique (ANNEVILLE & LAINE, 2018). Cette activité conduit à une concentration en azote ammoniacal du même ordre que celle de l'année dernière avec sur la période de mai à juin 2016 des valeurs qui atteignent  $41 \mu\text{gN.L}^{-1}$  à 15 m le 15 mai 2017. En 2016, la valeur maximale était de  $41 \mu\text{gN.L}^{-1}$  à 20 m le 6 juin 2016 (Figure 17). Ceci est à corrélérer avec une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (RIMET 2018)

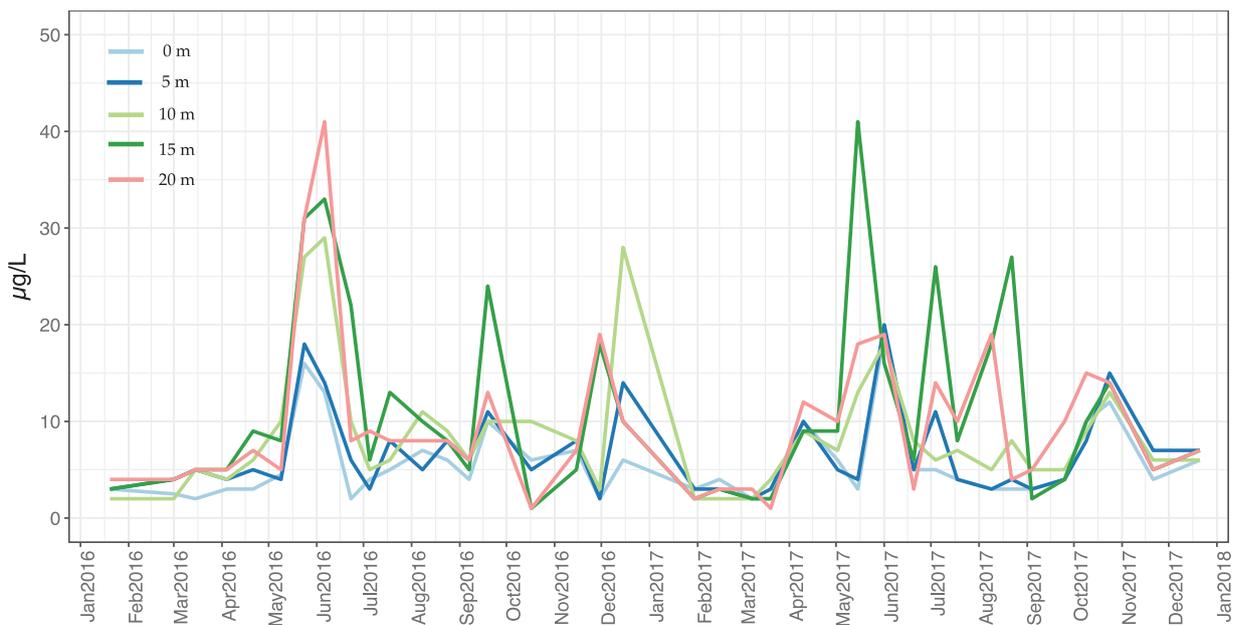


Figure 17 : Concentration en azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 17 : Concentration of ammoniacal nitrogen in lake's surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

### 5.3 SILICE

Pour les couches d'eau superficielles entre 0 et 30m, la plus forte concentration en silice est de 1.12 mgSiO<sub>2</sub>/L le 15 février 2017. La concentration moyenne annuelle en 2017 est de 0.65 mgSiO<sub>2</sub>/L, soit supérieur à l'année 2016 avec une concentration de 0.53 mgSiO<sub>2</sub>/L. La silice est consommée par l'activité phytoplanctonique des algues diatomées (RIMET, 2018). La concentration en silice diminue progressivement à l'issue du brassage partiel pour atteindre une valeur minimale pendant l'été qui est de 0.31 mgSiO<sub>2</sub>/L le 18 juillet 2017. La silice continue à rester faible jusqu'au mois de novembre 2017 où la consommation décroissante du phytoplancton et l'enfoncement de la thermocline qui s'accompagne d'une remobilisation des concentrations en silice du métalimnion, entraîne une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac (Figure 18).

Depuis les derniers brassages complets en 2005, 2006 et 2012, la silice dans les couches d'eau profondes n'est pas redistribuée dans l'ensemble de la colonne d'eau (Figure 18). La concentration en silice diminue nettement dans les couches profondes après chaque brassage complet.

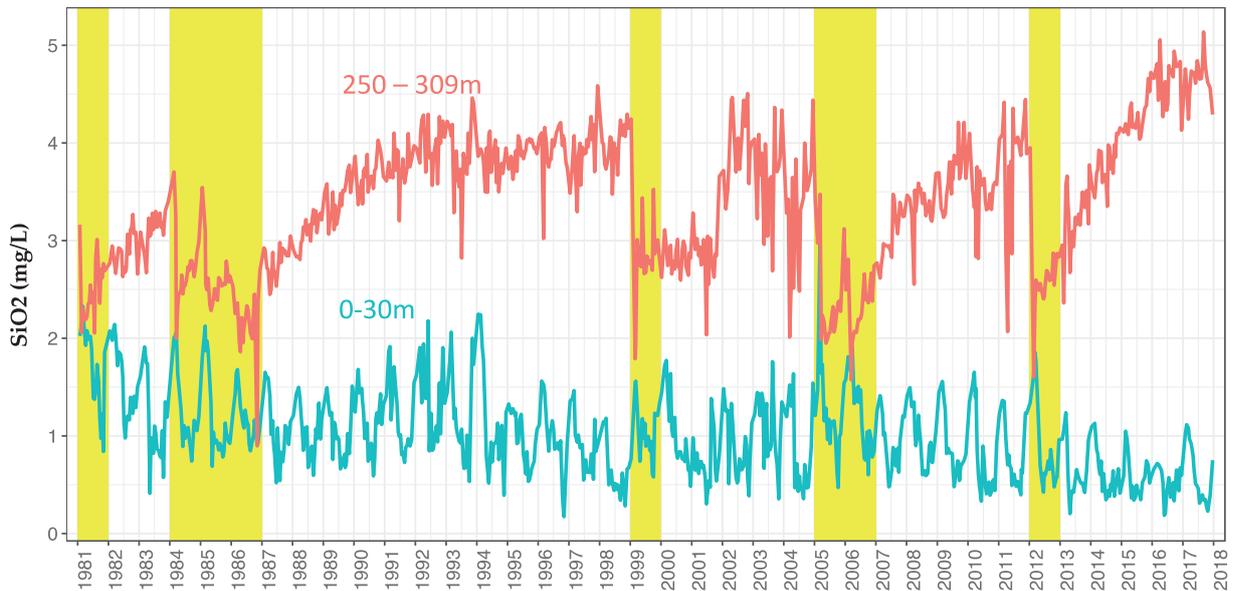


Figure 18 : Concentration moyenne pondérée en silice (SiO<sub>2</sub>) dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 18 : Concentration of silicic acid (SiO<sub>2</sub>) in lake's water surface layers (0 - 30 m) and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

### 5.4 OXYGÈNE DISSOUS

La figure 19 montre l'évolution des profils de concentration en oxygène dans la colonne d'eau du lac entre 0 et 30 m. Elle met en évidence la production d'oxygène par la photosynthèse dans les couches superficielles dès le mois de mars 2017. Cette activité phytoplanctonique printanière engendre une sursaturation en oxygène à la surface qui peut atteindre une valeur moyenne entre 0-30m de 11.8mgO<sub>2</sub>/L le 20 mars 2017. La concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles continue à augmenter pour atteindre la valeur moyenne maximale de 12.0 mgO<sub>2</sub>/L le 15 mai 2017. Après le 20 juin 2017, la concentration en oxygène dans la couche 0-30m diminue et varie entre 9.5 et 10.7 mgO<sub>2</sub>/L. A partir du mois de mai, les concentrations d'oxygène diminuent à cause d'une activité photosynthétique moins intense liée au fléchissement des diatomées (RIMET, 2018). Ce phénomène peut aussi s'expliquer par la diffusion d'oxygène vers les couches d'eau inférieures qui sont désoxygénées du fait de l'activité bactérienne qui y règne et du dégazage vers l'atmosphère lors de la sursaturation en oxygène dissous de l'épilimnion. La désoxygénation de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers les couches plus profondes est observée avec un minimum à 30 m au mois d'octobre égal à 6.32 mgO<sub>2</sub>/L contre 5.46mgO<sub>2</sub>/L en octobre 2016.

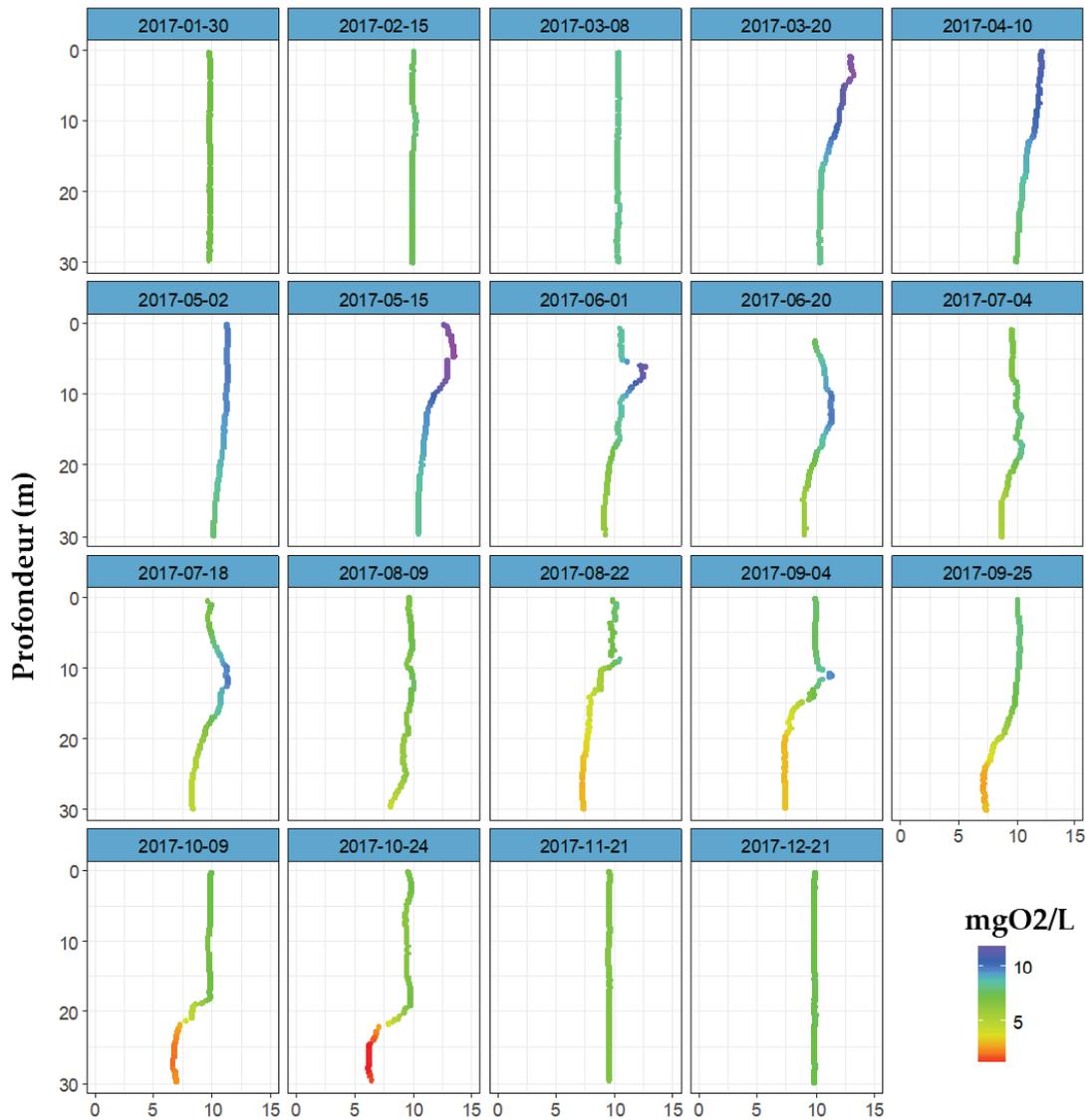


Figure 19 : Concentration en oxygène dissous entre 0 et 30m de la colonne d'eau du lac , Léman - Grand Lac (SHL2)  
Figure 19 : Concentration of dissolved oxygen between 0 and 30m of lake's water column, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

## 5.5 TRANSPARENCE

La dynamique de transparence pour l'année 2017 est représentée sur la figure 20. L'hiver 2017 entraîne une transparence importante jusqu'à 15.5 m le 15 février 2017, soit supérieur à l'année précédente avec 11.7 m le 15 mars 2016.

Par la suite, la reprise de l'activité photosynthétique, induit l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique principalement les Cryptophycées, et provoque une diminution progressive de la transparence jusqu'à une valeur de 4.2m le 20 mars 2017. Les Xanthophycées filamenteuses tolérant les faibles intensités lumineuses arrivent le 15 mai 2017 où la transparence de la colonne d'eau est de 4.7m. La transparence varie entre 4.2 et 8.1 m du 20 mars au 01 juin 2016 pendant la phase où le phytoplancton printanier est le plus abondant et essentiellement constitué de Diatomées, Chlorophycées, Chrysophycées et Xantophycées (RIMET, 2018).

On observe ensuite un pic de transparence (phase des eaux claires) à 9.5 m le 20 juin 2017 pendant la période où la biomasse algale a fortement diminué du fait de la raréfaction des nutriments et de l'accroissement de l'activité des organismes brouteurs qui engendrent un abattement drastique des formes consommables du phytoplancton (ANNEVILLE, RIMET & PERNEY, 2018).

La transparence diminuera de nouveau les semaines suivantes après l'apparition du deuxième pic de biomasse de l'année 2017 qui s'étend de mi-juillet à mi-septembre 2017, avec des valeurs du même ordre que celles obtenues lors de la phase printanière.

Enfin, sur la dernière partie de l'année, la transparence augmente progressivement et atteint 10.5 m le 21 décembre 2017.

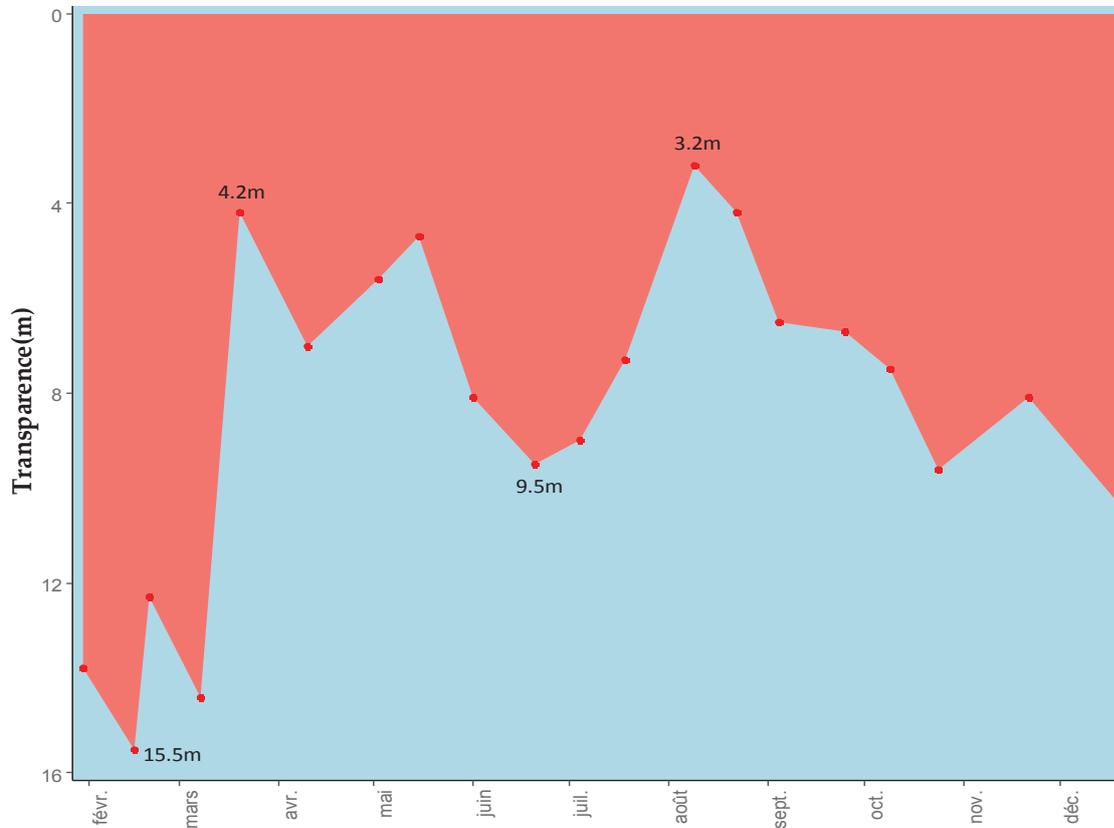


Figure 20 : Transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 20 : Transparency using a Secchi disk (black and white, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

La figure 21 permet d'observer l'évolution des dates de reprises printanières de l'activité phytoplanctonique et les dates de phase des eaux claires durant les 20 dernières années (1997 à 2017). Le reprise de l'activité phytoplanctonique printanière est précoce en 2017, dès la troisième semaine de mars, et la croissance printanière s'étend jusqu'à la troisième semaine du mois de juin 2017.

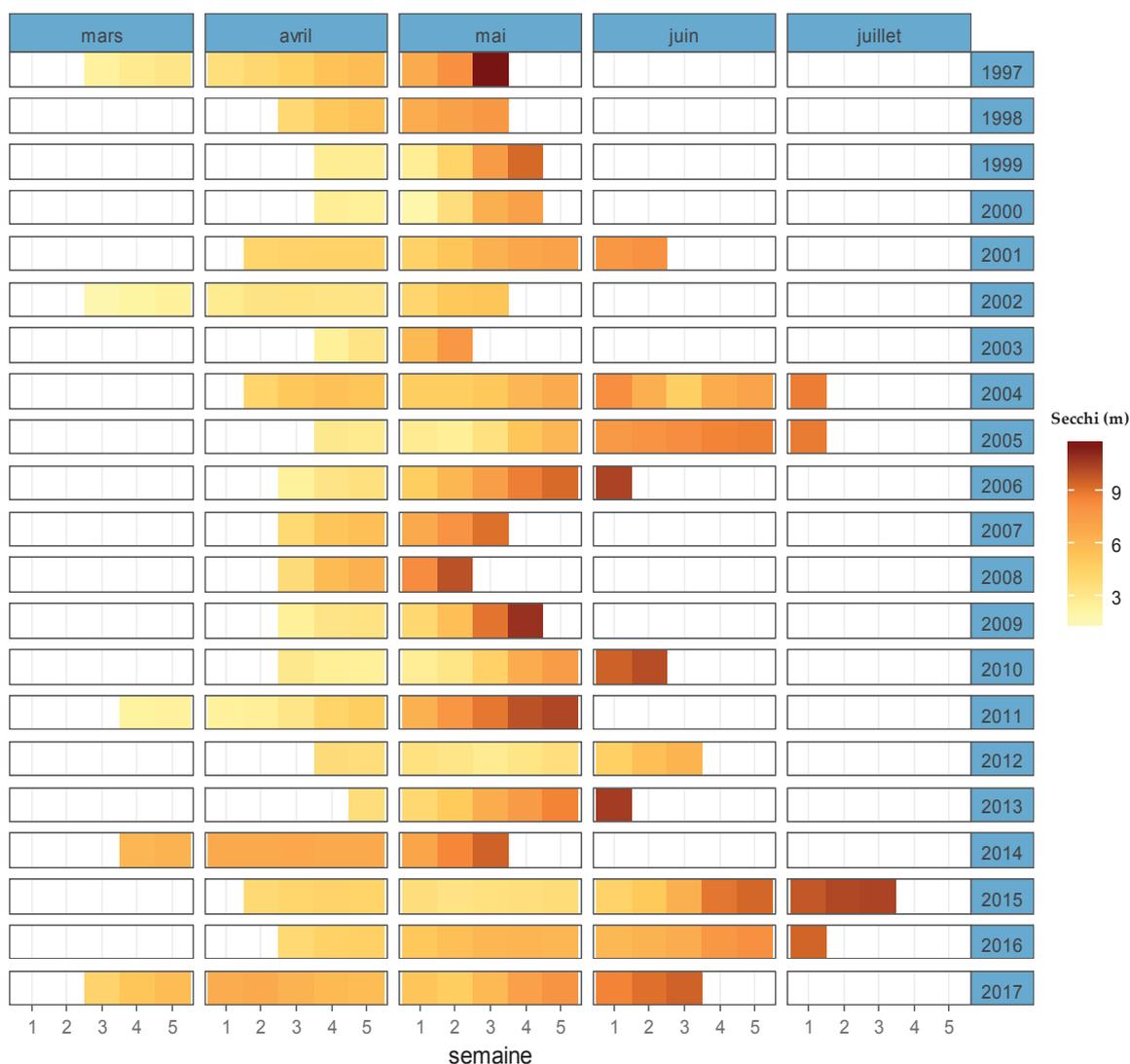


Figure 21 : Début de la reprise de l'activité phytoplanctonique à la période des phases des eaux claires de 1997 à 2017, Léman –Grand Lac (SHL2)

Figure 21 : Beginning of the recovery of phytoplankton activity to period of clear water phases from 1997 to 2017, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

## 5.6 MATIÈRE PARTICULAIRE

La matière particulaire dans les couches d'eau superficielles est un indicateur de l'abondance phytoplanctonique en suspension dans l'eau. Le carbone et l'azote organique ainsi que le phosphore total particulaire représentent plus précisément la fraction de nutriments assimilés par le phytoplancton. Par conséquent, les concentrations en carbone organique particulaire (COP) dans les couches superficielles évoluent inversement à la teneur en nutriments dissous dans l'eau et ceci dès le début de l'activité phytoplanctonique.

Ainsi, le pic printanier de carbone organique particulaire s'étend de mi-avril à fin juin 2016 avec une valeur de 404  $\mu\text{gC/L}$  à 5m. Le deuxième pic plus marqué de carbone organique particulaire s'étend de mi-juillet à mi-septembre, et est signalé par un maximum le 8 août 2016, avec 537  $\mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$ . Pour l'année 2017, les trois pics de carbone organique particulaire observés correspondent à trois périodes où l'activité phytoplanctonique est active (RIMET 2018). Le premier pic printanier le 20 mars 2017 est observé avec une valeur de carbone organique particulaire de 394  $\mu\text{gC/L}$  à la surface et correspond à une baisse significative de la transparence à 4.2m (Figure 22). Le deuxième pic est observé le 15 mai 2017 avec une valeur de 432  $\mu\text{gC/L}$  et correspond à une biomasse de 6432  $\mu\text{g/L}$  (RIMET 2018). Le troisième pic dit « automnal » apparaît le 04 septembre 2017 avec une valeur de 508  $\mu\text{gC/L}$ , et correspond à l'apparition de nouvelles communautés d'algues qui remplacent les diatomées.

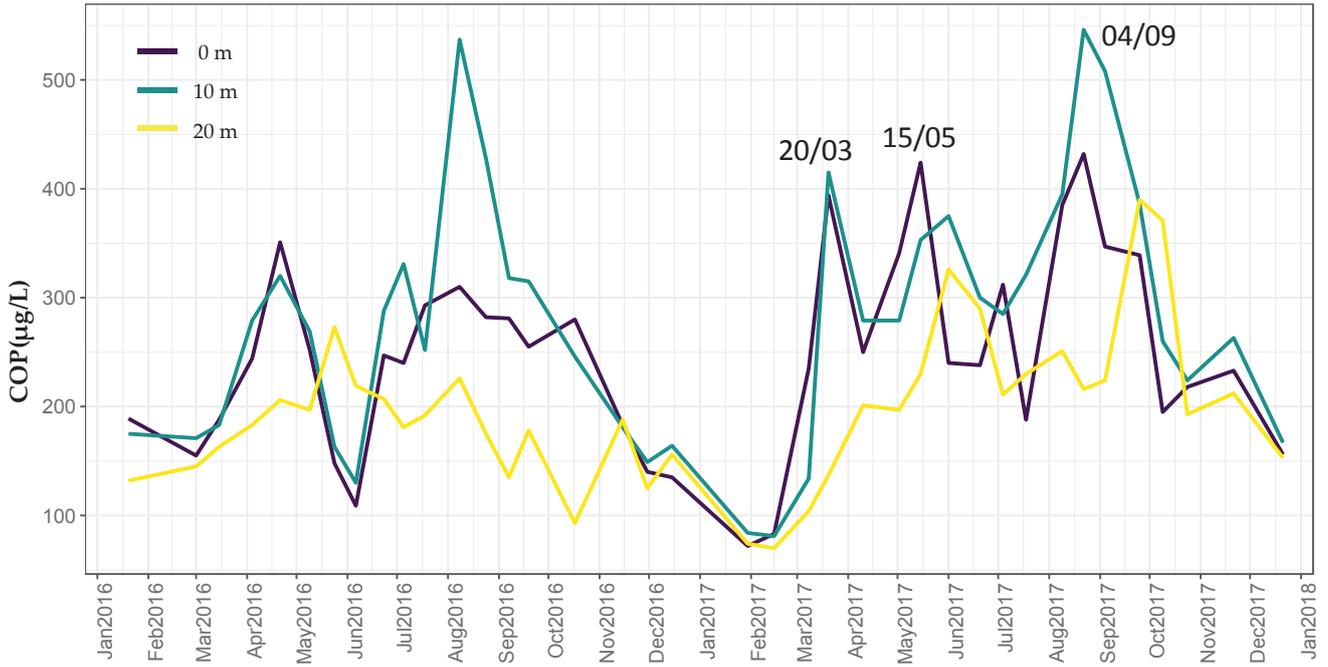


Figure 22 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches superficielles (0, 10 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 22 : Concentration of particulate organic carbon in lake's water surface layers (0, 10, and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Les figures 23 a, b et c mettent respectivement en évidence la dynamique annuelle de la matière particulaire : COP, azote organique particulaire (NOP) et le phosphore particulaire (Ppart). Le carbone organique particulaire reflète une diminution depuis 2010. La tendance de diminution au cours du temps est nette pour le NOP et Ppart.

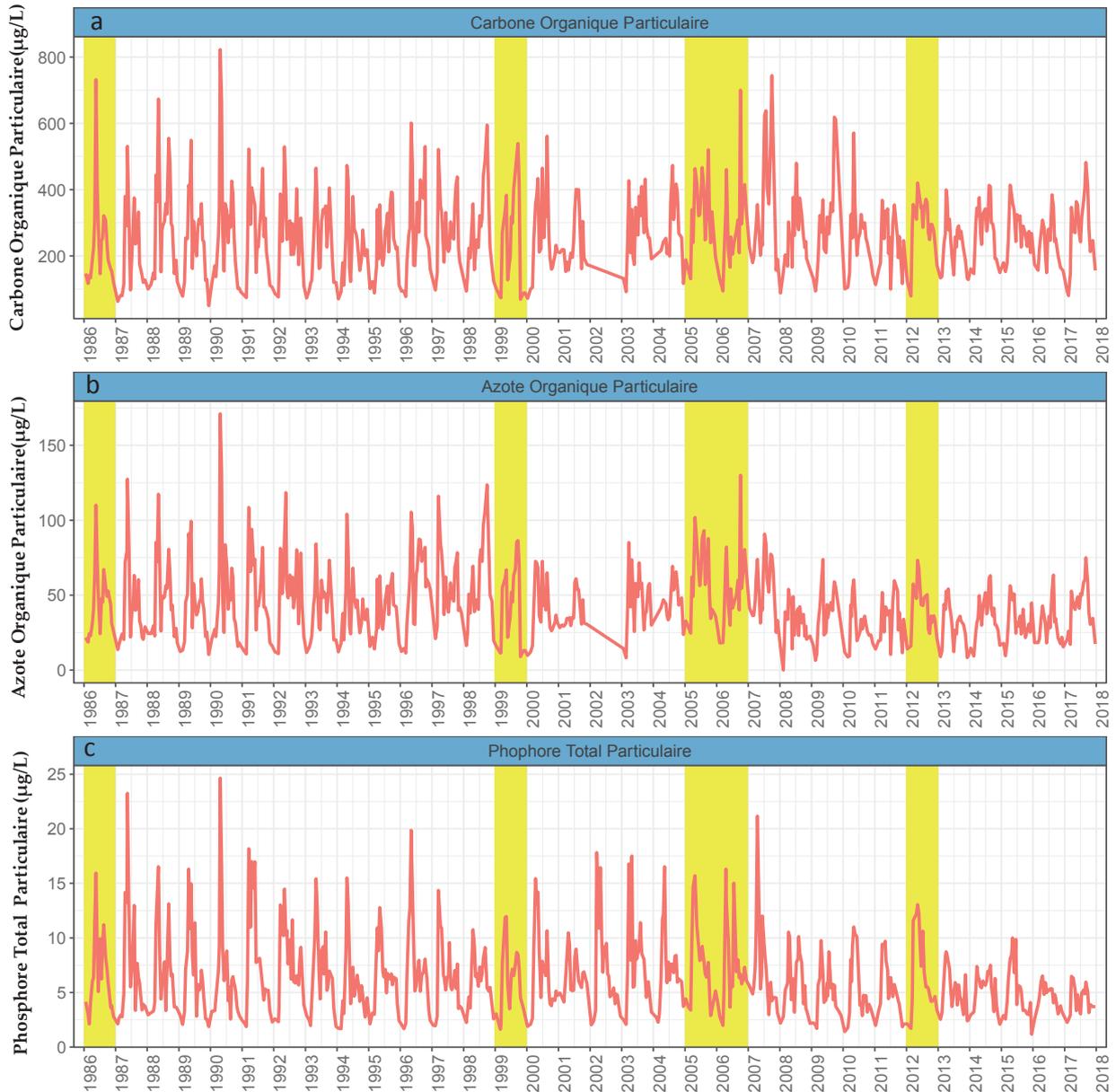


Figure 23 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2017, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- a) Carbone organique particulaire,
- b) Azote organique particulaire,
- c) Phosphore total particulaire

Figure 23 : Change in the concentration of particulate matter in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1986 to 2017, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

- a) Particulate organic carbon,
- b) Particulate organic nitrogen,
- c) Particulate total phosphorus

La carence en phosphore disponible pour les cellules algales est souvent observée pendant la période estivale. La figure 24 décrit le rapport N/P entre 1986 et 2017 qui traduit une carence en phosphore quand ce rapport est supérieur à 7, en se référant à la stœchiométrie de la réaction globale de la photosynthèse. L'année 2017 fait partie des années où la carence en phosphore est importante.

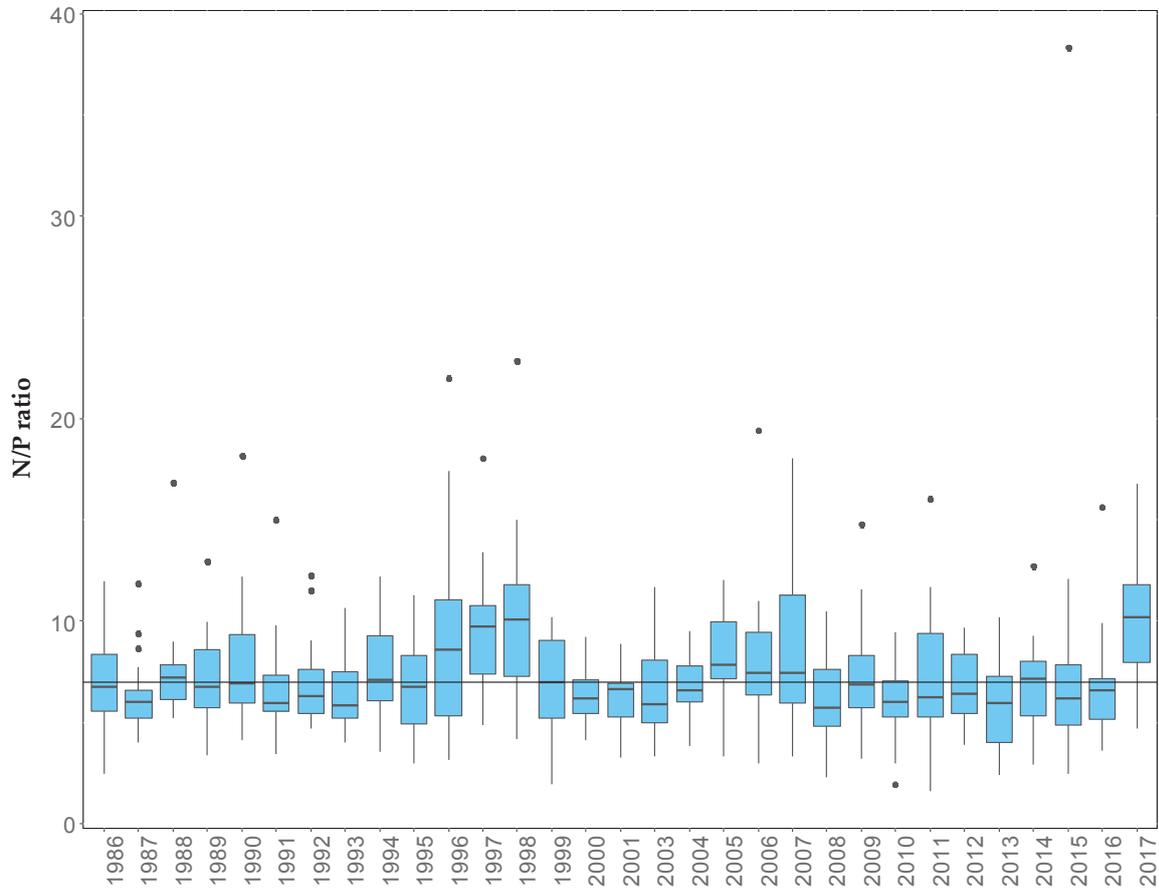


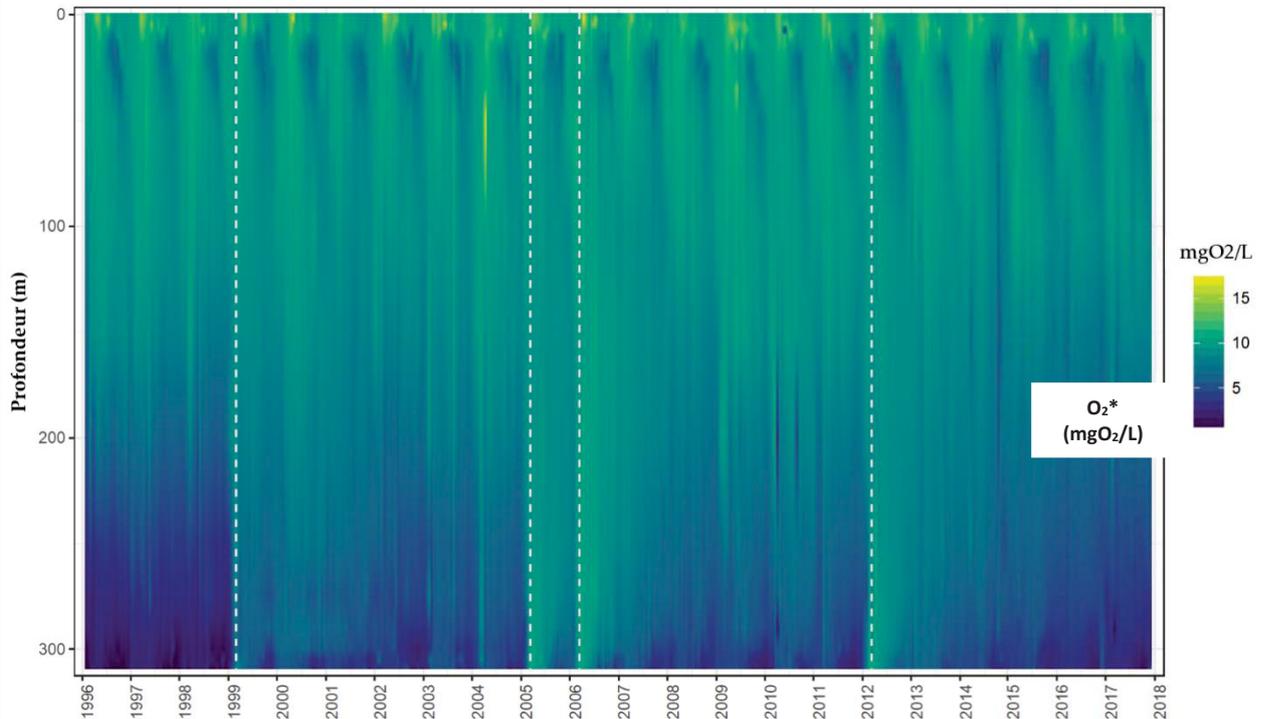
Figure 24 : Evolution du rapport NOP / Ppart dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 24 : Change in PON / Ppart ratio in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1986 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

## 6. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

Le brassage partiel hivernal 2017 n'a pas permis de redistribuer l'oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau. A l'issue du brassage partiel maximal, le 08 mars 2017, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à 3 mgO<sub>2</sub>/L, soit inférieur à 4 mgO<sub>2</sub>/L qui est la valeur minimum relative aux exigences sur la qualité des eaux en Suisse. Cette concentration reste inférieure au seuil de 4 mgO<sub>2</sub>/L de mars au novembre 2017.

La figure 25 présente la concentration en oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau. Le brassage complet correspond au trait en pointillé vertical. La redistribution d'oxygène dissous par le brassage complet permet de réoxygéner le fond et de diminuer l'état de carence en oxygène au fond.



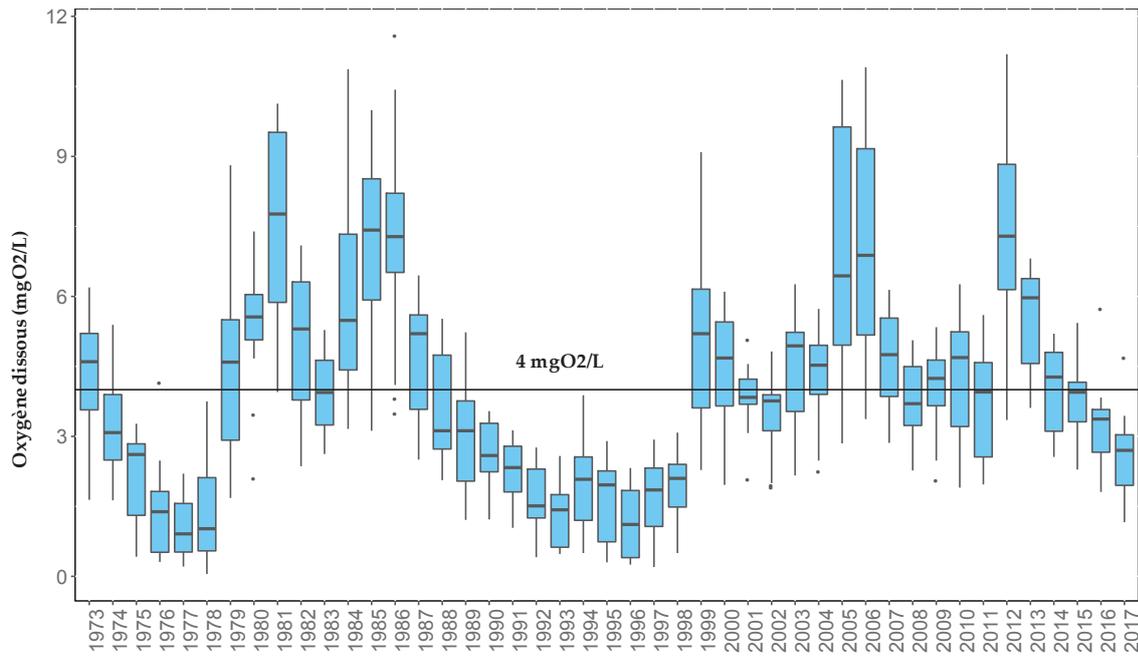
\* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 25 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau du lac de 1996 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 25 : Change in the concentration of dissolved oxygen in lake's water column from 1996 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

L'Annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 stipule que : "Pour les lacs, il faut également que la teneur en oxygène de l'eau ne soit, à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à 4 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> ; elle doit en outre suffire pour que les animaux moins sensibles, tels que les vers, puissent peupler le fond du lac durant toute l'année et en nombre aussi proche que possible de la densité naturelle. Les conditions naturelles particulières sont réservées".

La figure 26 présente la distribution de concentration en oxygène dissous à 309m. De nouveau, les brassages complets montrent un effet bénéfique en terme d'oxygène dissous pour le lac. Après le brassage complet en 2012, l'oxygène est de nouveau inférieur au seuil de 4mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> pour les deux années successives 2016 et 2017

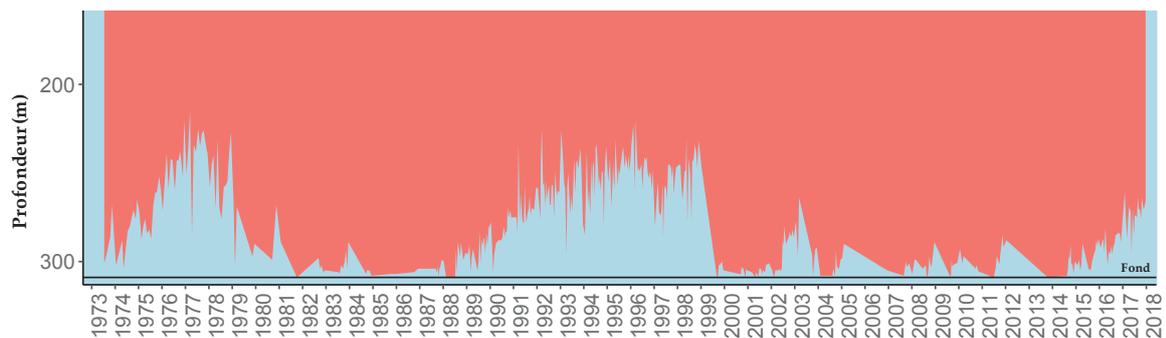


\* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 26 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 26 : Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 27 indique l'évolution de la couche d'eau de concentration inférieure à  $4.0 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  de 1957 à nos jours. Depuis 1999, il y a une nette augmentation de la teneur en oxygène dissous dans les couches profondes du Léman. On peut noter que pour l'année 2017, la couche d'eau « désoxygénée » ( $< 4.0 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ ), est plus importante qu'en 2015 et 2016.



\* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 27 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mg d'oxygène dissous par litre de 1973 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 27 : Change in threshold's depth at 4 mg of dissolved oxygen per liter from 1957 to 2016, lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La désoxygénation des couches profondes entraîne plusieurs phénomènes propres à ces conditions réductrices : la réduction de certains métaux comme le manganèse (RAMSEIER *et al.*, 2015) et le fer, la formation d'azote ammoniacal, le relargage de phosphore à partir des sédiments et des eaux interstitielles.

Ces phénomènes engendrent indirectement la remise en suspension des sédiments, visible avec l'augmentation de la turbidité, et libèrent ainsi la silice présente dans les eaux interstitielles et les sédiments. La figure 28 montre les corrélations de l'oxygène dissous et les différents paramètres : une corrélation négative ( $r = -0.75$ ) avec la silice et ( $r = -0.78$ ) avec phosphore réactif soluble.

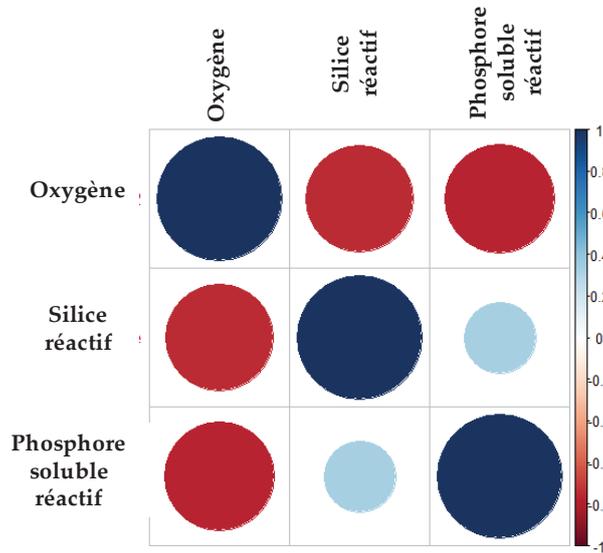


Figure 28 : Corrélation de l'oxygène dissous avec la silice réactif et le phosphore soluble réactif à 309m de 1996 à 2017

Figure 28 : Correlation of dissolved oxygen and reactive silica and soluble reactive phosphorus at 309m from 1996 to 2017

## 7. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

### 7.1 PHOSPHORE RÉACTIF SOLUBLE ET PHOSPHORE TOTAL

La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total est de 17.75 µgP/L en 2017 (Figure 29).

Le phosphore réactif soluble, c'est-à-dire l'orthophosphate, suit l'évolution du phosphore total entre 2016 et 2017. La concentration moyenne annuelle pondérée est de 14.79 µgP/L.

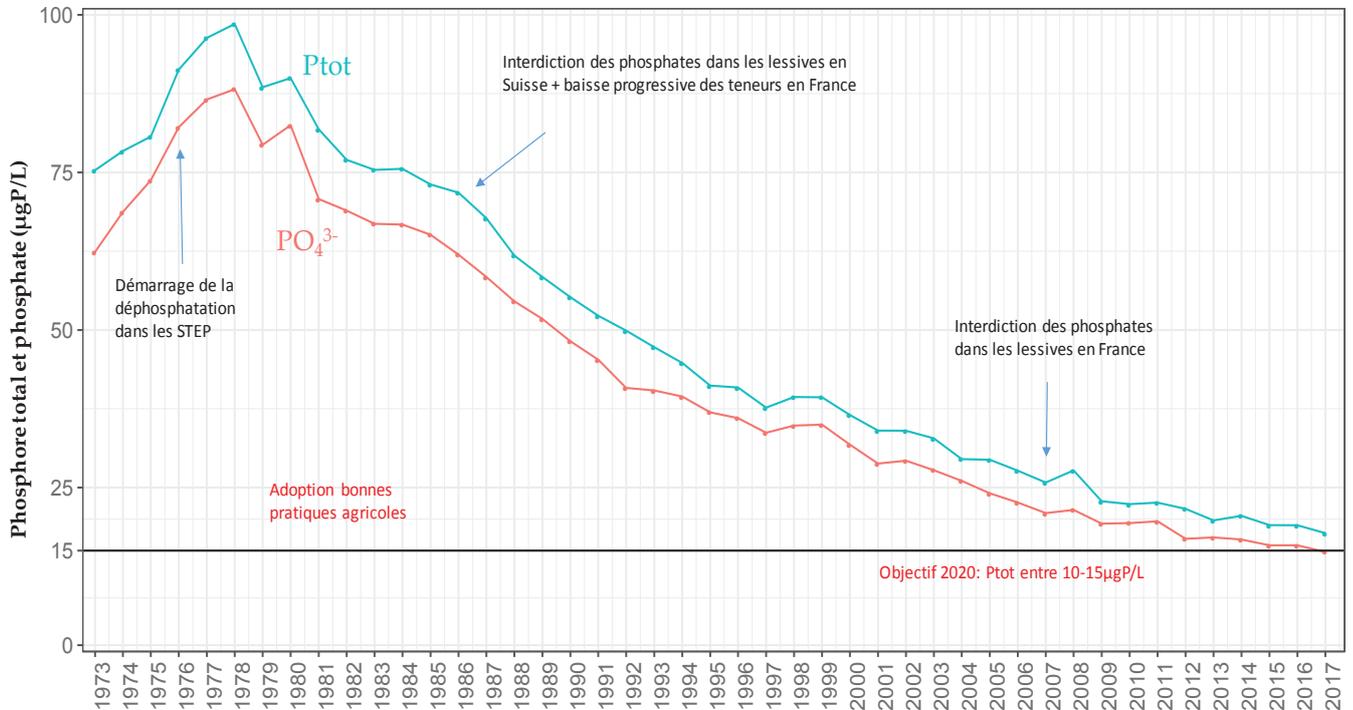


Figure 29 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée de phosphore réactif soluble et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 29 : Change in weighted mean annual total concentration and stock of soluble reactive phosphorus and total phosphorus in the entire mass of lake's water from 1973 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

## 7.2 AZOTE NITRIQUE ET AZOTE TOTAL

Les concentrations moyennes en azote total augmentent légèrement tandis que les concentrations moyennes en azote nitrique diminuent légèrement. En 2017, la concentration moyenne en azote total est de 667  $\mu\text{gN/L}$ . La concentration moyenne annuelle en azote nitrique, quant à elle, est égale à 568  $\mu\text{gN/L}$  (Figure 30). Cette teneur en nitrates d'environ  $0.57 \text{ mgN}\cdot\text{L}^{-1}$  dans les eaux du Léman, soit  $2.52 \text{ mgNO}_3^{-}\cdot\text{L}^{-1}$ , reste très inférieure et donc conforme à la norme d'eau de consommation en Suisse qui édicte une valeur de tolérance de  $40 \text{ mgNO}_3^{-}\cdot\text{L}^{-1}$  et en France, une limite de qualité qui est de  $50 \text{ mgNO}_3^{-}\cdot\text{L}^{-1}$ .

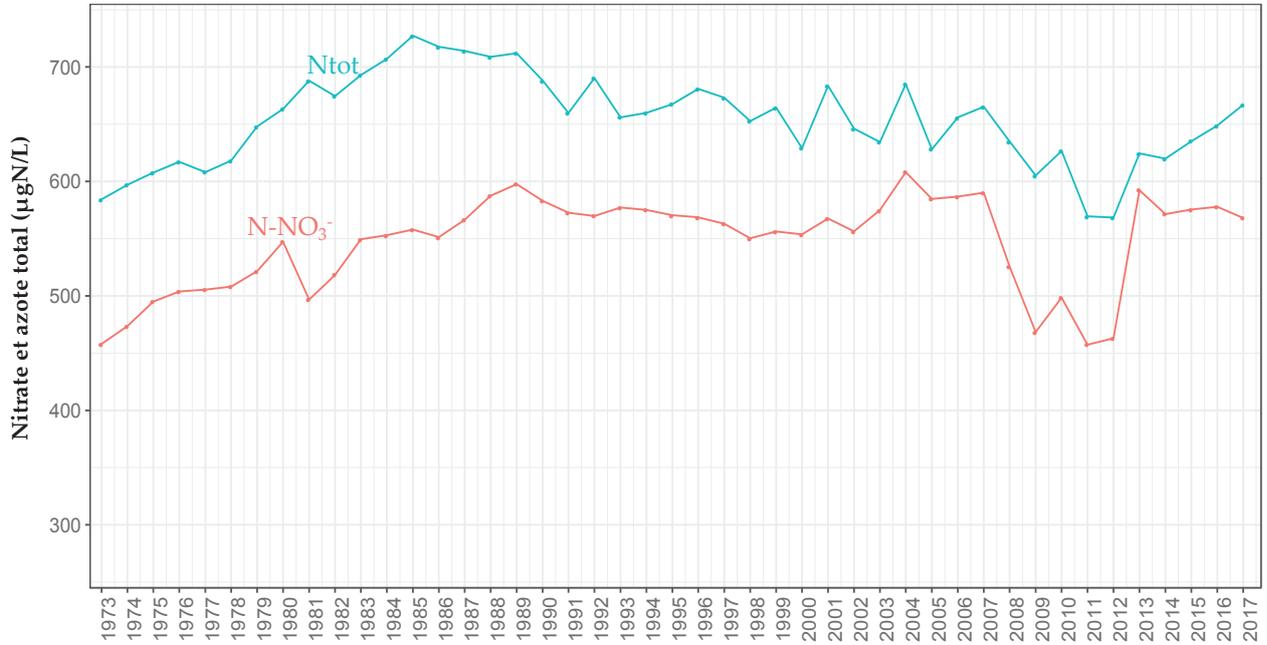


Figure 30 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2017, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 30 : Change in the weighted mean annual total concentration of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1973 to 2017, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

### 7.3 CHLORURE

La concentration des ions chlorures dans le Léman est en constante augmentation de 1973 à 2016 et en légère diminution en 2017 (Figure 31). En 2017, le stock de chlorure est égal à 886'772 tonnes soit une teneur moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.31 mgCl<sup>-</sup> /L contre 900'917 tonnes et 10.48 mg Cl<sup>-</sup>/L en 2016. Les apports via les affluents du Léman expliquent une majeure partie de ces teneurs (KLEIN, 2016) qui reflètent une utilisation croissante de produits chimiques à base de chlorure dans le secteur industriel (saline, métallurgie et industrie pharmaceutique ...) et l'usage de sel de déneigement dans le bassin versant du lac (GUMY et DE ALENCASTRO, 2001). L'initiation d'une baisse des concentrations en Cl<sup>-</sup> observée en 2017 reste à confirmer par le prochain suivi de 2018.

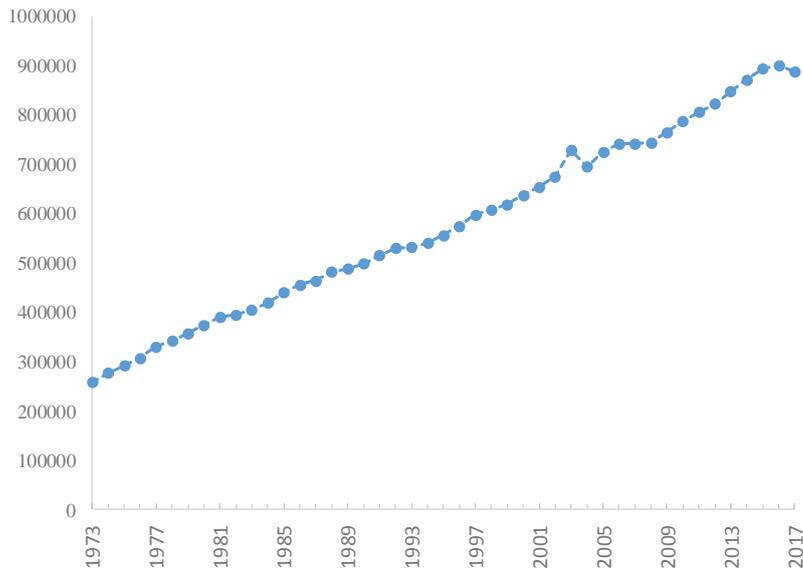


Figure 31 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2017, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 31 : Change in the weighted mean annual concentration and stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2017, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

## 8. CONCLUSIONS

L'année climatique 2017 sur les rives du Léman peut être considérée comme relativement chaude avec une température moyenne annuelle de 11.5 °C et un mois de janvier particulièrement froid -0.8°C de température en moyenne, normalement venteuse et bien ensoleillée, et avec une pluviométrie qui présente un déficit de 17.4 % par rapport à la moyenne 1981-2010 avec 833.7 mm de précipitations. L'été a été chaud, et les mois d'août et septembre furent secs.

Les faits marquants de l'évolution physico-chimique des eaux du Léman en 2017 sont les suivants :

- L'hiver 2017 a donné lieu à un brassage partiel de la colonne d'eau seulement jusqu'à environ 200 m, réduisant la réoxygénation des couches d'eau profondes du Léman et la distribution des nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau ;
- L'activité phytoplanctonique apparaît plus tôt (le 20 mars 2017) par rapport à l'année 2016 ;
- Les concentrations en oxygène dissous à 309m de l'année 2017 restent en dessous de 4mgO<sub>2</sub>/L du mois de janvier à novembre ;
- Les concentrations moyennes en phosphore total et phosphate diminuent par rapport à l'année 2016 avec les valeurs annuelles moyennes respectives de 17.75 µgP.L<sup>-1</sup> et 14.79 µgP.L<sup>-1</sup>

## BIBLIOGRAPHIE

- ANNEVILLE, O., LAINE, L. (2018) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2017, 113-120.
- BARBIER et al. 2016 : Evolution physico-chimique des eaux du Léman (éléments majeurs) et données météorologiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2016, 17-62.
- TRAN KHAC, V., QUETIN, P. et ANNEVILLE, O. (2018) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman (éléments majeurs) et données météorologiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2017, xx-xx.
- BLANC, P., PELLETIER, J.P. et MOILLE, J.P. (1993) : Variabilité spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques dans l'eau du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1992, 113-162 et 162b-162p.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- ANNEVILLE O., RIMET F., PERNEY, P. (2017) : Biomasse chlorophyllienne et production primaire dans le Léman, Comm. int. prot. Eaux Léman contre pollut. Campagne 2016, 93-100.
- RAMSEIER GENTILE, S., EDDER, P., KLEIN, A. et LODS-CROZET, B. (2015): Métaux et micropolluants organiques dans les eaux, les moules et les truites lacustres du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 84-97.
- RIMET, F. (2018) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2017, 86-97.
- SOERE OLA-IS, AnaEE-France, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL [10/02/2018], developed by Eco-Informatics ORE INRA Team
- VARGAS, S. (2016) Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 217-224.

## ANNEXES

### ANNEXE I

La concentration moyenne pondérée est calculée en prenant en compte le volume de la couche d'eau considérée :

$$C_{\text{moyenne pondérée}} = \frac{\sum C_i * V_i}{\sum V_i}$$

Avec :

C<sub>i</sub> : Concentration obtenue des mesures ou analyses du laboratoire à la profondeur d'échantillonnage

V<sub>i</sub> : Volume de la strate qui correspond à la profondeur d'échantillonnage

Les volumes des strates qui permettent de calculer les concentrations moyennes pondérées sont présentés ci-dessous.

Tableau 2 : Volume des strates des couches d'eau

Partie du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	1957 – mars 1976	0	1.2388
		5	1.8516
		10	1.2279
		20	1.8310
		30	2.4268
		40	3.5583
		50	6.7501
		100	14.2477
		150	16.5454
		200	20.0474
		250	13.3846
		300	2.5840

Parti du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	04.1976 - 1980	0	1.2388
		5	1.8516
		10	1.2279
		20	1.8310
		30	2.4268
		40	3.5583
		50	6.7501
		100	14.2477
		150	16.5454
		200	14.0402
		225	12.0143
		250	6.0745
275	2.6058		
309	1.2811		

Parti du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	1990-1981	0.0	0.6200
		2.5	1.2376
		5.0	1.2328
		7.5	1.2279
		10.0	1.8310
		15.0	2.4268
		20.0	3.5583
		30.0	6.7501
		50.0	14.2477
		100.0	23.5655
		200.0	19.0344
		250.0	6.0745
		275.0	1.6991
		280.0	0.4539
		285.0	0.4134
		290.0	0.3821
		295.0	0.3628
		300.0	0.3034
		305.0	0.2451
		309.0	0.0271

Parti du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	1992-1991	0.0	0.6200
		2.5	1.2376
		5.0	1.2328
		7.5	1.2279
		10.0	1.8310
		15.0	2.4268
		20.0	3.5583
		30.0	6.7501
		50.0	14.2477
		100.0	16.5454
		150.0	14.0402
		200.0	12.0143
		250.0	6.0745
		275.0	1.6991
		280.0	0.4539
		285.0	0.4134
		290.0	0.3821
		295.0	0.3628
		300.0	0.3034
		305.0	0.2451
		309.0	0.0271

Parti du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	2001-1993	0	0.6200
		2.5	1.2376
		5	1.2328
		7.5	1.2279
		10	1.8310
		15	2.4268
		20	3.5583
		30	6.7501
		50	14.2477
		100	16.5454
		150	14.0402
		200	12.0143
		250	6.0745
		275	2.1530
		290	0.9769
		300	0.4848
		305	0.2451
		309	0.0271

Parti du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	dès 2002	0	0.6200
		2.5	1.2376
		5	1.2328
		7.5	1.2279
		10	1.8310
		15	2.4268
		20	2.3722
		25	2.3111
		30	2.2500
		35	4.3928
		50	13.2300
		100	16.5454
		150	14.0402
		200	12.0143
		250	6.0745
		275	2.1530
		290	0.9769
		300	0.4848
		305	0.2451
		309	0.0271

**ANNEXE II**

Tableau 3 : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2). Calcul à partir des données extraites de la SOERE SI-OLA selon les coefficients de pondérations dans l'annexe I

Tableau 3 : Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). Calculation based on database extracted fro, SOERE OLA-IS according to ponderation coefficient in Annexe I

Année	Oxygène	Ptot	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ntot	Σ Nmin	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	COP	NOP	Ppart	Transparence	Transparence
	mg·L <sup>-1</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	mgCl·L <sup>-1</sup>	µgC·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	12 mois	mai-septembre
												mètre	mètre
1973	8.78	75.36	62.39	584.40	466.94	7.39	458.60	3.01					
1974	8.14	78.39	68.72	597.00	484.80	10.64	473.96	3.22				8.46	5.98
1975	7.96	82.51	73.76	607.69	503.41	7.88	495.07	3.40				7.30	3.78
1976	7.22	91.33	82.17	617.11	513.46	8.80	504.64	3.58				8.18	4.00
1977	7.05	96.35	86.57	608.13	513.05	6.59	505.57	3.85				7.95	5.18
1978	7.55	98.56	88.20	618.18	515.47	21.17	508.11	3.97				7.27	5.64
1979	8.48	88.52	79.38	648.04	528.35	5.87	521.57	4.16				10.42	5.86
1980	8.30	89.96	82.50	663.31	554.25	6.14	547.20	4.35				8.88	6.04
1981	9.37	81.85	70.80	687.95	506.76	9.01	496.75	4.53				8.10	5.82
1982	9.27	76.99	68.96	674.52	528.10	8.64	518.31	4.60				7.28	5.53
1983	9.16	75.42	66.86	692.93	561.01	10.25	549.51	4.70				7.86	6.35
1984	9.52	75.56	66.73	707.01	565.35	11.33	553.01	4.88				7.35	5.58
1985	9.53	73.09	65.11	727.24	572.04	13.54	557.96	5.12			3.19	8.28	4.94
1986	9.83	71.80	61.96	717.64	558.88	6.77	551.31	5.30	110.4	18.97	3.06	7.50	4.32
1987	9.62	67.75	58.42	714.05	573.85	6.58	566.48	5.40	71.9	13.91	2.93	8.01	4.71
1988	9.33	61.82	54.55	708.89	593.73	5.37	587.52	5.60	115.3	17.17	2.62	7.18	5.19
1989	8.64	58.41	51.76	711.99	604.15	5.76	597.65	5.67	93.2	14.23	2.11	10.02	6.21
1990	8.34	55.21	48.21	688.11	589.61	5.65	583.02	5.80	100.9	16.07	2.45	7.94	6.07
1991	8.49	52.27	45.29	659.85	579.60	5.94	572.72	6.00	91.5	15.08	2.55	7.84	5.86
1992	8.42	49.89	40.81	690.27	576.37	5.44	569.73	6.16	91.2	17.67	2.81	6.77	5.20
1993	8.29	47.27	40.40	655.96	581.32	3.27	577.19	6.18	88.1	13.32	2.32	8.23	5.42
1994	8.33	44.76	39.44	659.88	580.01	4.05	575.04	6.29	83.6	14.04	2.17	7.10	5.87
1995	8.22	41.18	36.94	667.46	575.08	3.48	570.44	6.47	88.2	12.75	2.21	7.67	5.89
1996	8.27	40.88	36.02	680.93	574.17	4.46	568.64	6.68	107.4	22.32	2.31	7.17	4.56
1997	8.41	37.68	33.69	673.22	568.32	4.20	563.06	6.96	107.4	23.12	2.19	8.17	6.73
1998	8.25	39.35	34.84	652.72	556.54	8.52	550.35	7.06	103.1	23.05	2.22	6.98	5.65
1999	8.72	39.30	34.98	664.45	560.48	3.86	556.21	7.20	93.0	13.24	2.28	8.10	5.72
2000	9.09	36.51	31.81	629.10	557.97	4.46	553.71	7.42	109.8	14.74	2.47	7.58	5.35
2001	8.51	34.03	28.82	683.60	570.39	4.31	567.65	7.61	95.6	13.07	2.34	6.29	5.06
2002	8.45	34.02	29.27	646.16	559.20	3.97	556.52	7.85	94.4 <sup>b</sup>	13.4 <sup>b</sup>	2.02	6.78	4.28
2003	8.60	32.80	27.76	634.39	578.68	3.71	575.07	8.47	93.2	13.77	2.32	6.71	4.86
2004	9.16	29.51	26.06	685.02	611.55	3.03	608.07	8.08	98.5	15.70	2.58	6.82	5.95
2005	9.28	29.41	24.08	628.08	588.75	3.79	584.73	8.44	128.5	22.03	2.96	6.14	5.36
2006	9.80	27.68	22.63	655.90	590.33	2.80	586.72	8.61	109.3	19.04	2.43	7.12	6.83
2007	9.00	25.78	20.94	665.25	593.89	3.76	590.15	8.63	114.7	17.57	2.42	6.40	5.33
2008	8.84	27.72	21.47	634.96	530.55	3.73	525.71	8.65	103.5	11.66	2.14	8.04	6.20
2009	9.30	22.82	19.38	605.24	472.54	4.39	468.35	8.90	114.3	11.34	1.78	7.26	5.94
2010	9.18	22.37	19.36	626.72	503.40	3.71	498.35	9.15	110.0	8.74	2.05	6.83	5.52
2011	8.96	22.62	19.66	569.53	462.87	4.66	457.37	9.37	86.6	9.72	2.05	6.84	6.42
2012	9.25	21.63	16.87	568.42	470.84	5.70	462.95	9.56	99.7	10.13	2.62	6.47	4.24
2013	9.20	19.79	17.09	624.52	597.08	3.83	592.33	9.86	92.5	9.40	2.22	7.71	7.00
2014	8.55	20.52	16.75	619.85	576.48	3.79	571.51	10.14	95.9	10.65	2.02	7.57	5.83
2015	8.53	19.03	15.84	635.13	581.96	4.89	575.48	10.38	100.9	8.78	2.09	8.56	6.94
2016	8.07	19.02	15.82	648.79	732.01	4.66	725.91	10.48	91.5	8.36	1.91	7.40	6.05
2017	8.21	17.75	14.79	667.02	573.17	3.55	568.11	10.31	96.6	12.05	1.99	8.63	6.48

b : valeurs interpolées

**ANNEXE III**

Tableau 4 : Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Tableau 4 : Annual total content in metric tons from 1957 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Année	Oxygène	Ptot	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ntot	Nmin	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	COP	Ppart	Npart
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
1973	754752	6481	5365	50258	40157	635	39440	258645			
1974	699850	6741	5910	51342	41693	915	40760	276825			
1975	684518	7096	6344	52262	43293	678	42576	292158			
1976	620945	7854	7067	53072	44157	757	43399	307846			
1977	606011	8286	7445	52300	44122	567	43479	330756			
1978	649332	8476	7585	53164	44331	1820	43697	341584			
1979	729640	7613	6826	55731	45438	505	44855	357827			
1980	713880	7737	7095	57044	47666	528	47060	374291			
1981	805457	7039	6089	59163	43581	775	42721	389682			
1982	797560	6621	5931	58009	45417	743	44574	395186			
1983	787909	6486	5750	59592	48247	881	47258	404467			
1984	818624	6498	5739	60803	48620	974	47559	419641			
1985	819979	6286	5600	62542	49195	1164	47985	440308			
1986	845574	6175	5329	61717	48064	582	47413	455880	9495	263	1632
1987	827109	5827	5024	61408	49351	565	48718	463978	6187	252	1197
1988	802149	5316	4691	60965	51061	461	50527	481840	9912	225	1477
1989	743387	5023	4452	61232	51957	495	51398	487935	8016	181	1224
1990	717603	4748	4146	59177	50706	486	50140	498688	8676	211	1382
1991	730179	4495	3895	56747	49846	511	49254	515859	7869	219	1296
1992	724135	4291	3510	59363	49568	467	48997	530155	7839	242	1520
1993	712729	4065	3474	56413	49993	282	49638	531618	7575	199	1146
1994	716736	3849	3392	56750	49881	349	49453	540857	7192	187	1207
1995	706729	3541	3177	57402	49457	300	49058	556198	7585	190	1097
1996	711214	3515	3098	58560	49379	383	48903	574455	9238	199	1920
1997	723582	3240	2897	57897	48875	362	48423	598270	9240	188	1988
1998	709186	3384	2996	56134	47862	732	47330	607035	8867	191	1983
1999	750310	3380	3009	57143	48201	332	47834	619195	7998	196	1139
2000	781665	3140	2736	54103	47985	384	47619	637923	9447	213	1268
2001	732118	2927	2478	58789	49054	371	48818	654269	8219	201	1124
2002	726872	2926	2517	55570	48091	341	47861	675317	8119 <sup>b</sup>	173	1154 <sup>b</sup>
2003	739242	2821	2387	54558	49766	319	49456	728063	8019	199	1184
2004	787556	2538	2241	58912	52594	261	52294	695142	8469	222	1350
2005	798444	2529	2071	54015	50633	326	50287	725507	11054	254	1894
2006	842395	2381	1946	56408	50769	241	50458	740676	9402	209	1637
2007	773780	2217	1801	57211	51074	323	50753	741952	9861	208	1511
2008	760175	2384	1847	54607	45627	321	45211	743509	8897	184	1003
2009	799905	1962	1667	52050	40639	377	40278	765090	9832	153	976
2010	789390	1924	1665	53898	43293	319	42858	787041	9462	176	751
2011	770351	1945	1690	48980	39807	401	39334	805638	7450	177	835
2012	795700	1860	1451	48884	40492	491	39814	822136	8575	225	872
2013	790938	1702	1469	53708	51349	329	50941	847951	7952	191	808
2014	735592	1765	1440	53307	49578	326	49150	871926	8248	174	916
2015	733428	1637	1363	54621	50049	421	49491	893011	8675	180	755
2016	694048	1636	1361	55796	62953	400	62429	900917	7865	165	719
2017	706053	1527	1272	57364	49293	306	48857	886772	8312	171	1036

b : valeurs interpolées

**ANNEXE IV**

Tableau 5 : Incertitudes élargies des principales analyses physico-chimiques  
Tableau 5 : Expanded uncertainties of main physico-chemical analysis

Paramètre	Unité	Incertitude élargie *
		U (%)
pH		0.4
TAC	meq·L <sup>-1</sup>	1.8
$\chi$	S·cm <sup>-1</sup>	1.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	5.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	11.2
Ntot	µgN·L <sup>-1</sup>	10.9
NOP	µgN·L <sup>-1</sup>	6.0
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	6.2
Ptot	µgP·L <sup>-1</sup>	8.4
Ppart	µgP·L <sup>-1</sup>	8.0
COP	µgC·L <sup>-1</sup>	3.0
Cl <sup>-</sup>	mgCl <sup>-</sup> ·L <sup>-1</sup>	4.4
SiO <sub>2</sub>	mgSiO <sub>2</sub> ·L <sup>-1</sup>	3.9

\* Incertitudes calculées avec la validation des méthodes pour des valeurs proches de celles observées sur les échantillons de SHL2 avec un facteur d'élargissement de 2

ANNEXE SUITE

## MÉTÉOROLOGIE

### WEATHER

#### 1. INTRODUCTION

Le réseau de mesure est constitué des stations climatiques de l'Institut suisse de Météorologie de Genève-Cointrin, Changins, Pully et du laboratoire de l'INRA de Thonon-les-Bains. Les paramètres climatiques examinés sont : la température de l'air, la pluviométrie, le rayonnement global, le vent et la Rose des vents à Changins (calculée par Météo Suisse). Depuis 2003, les unités du rayonnement global et de la vitesse du vent ont été conservées afin de faciliter les comparaisons avec les rapports des campagnes précédentes. 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 inter-stations sur la période 1981 - 2010.

#### 2. TEMPÉRATURE DE L'AIR

En 2017 le mois de janvier fut particulièrement froid (presque 3°C de moins que la normale 1981-2010), par contre de février à août les températures mensuelles furent supérieures aux normales. (tableau 1.1, figure 1.1).

Tableau 1.1 : Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2017 (°C).

Table 1.1 : Mean monthly air temperature for each station in 2017 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	-1.2	-1.3	-0.7	0.05	2.1
Février	4.8	5.3	5.7	5.7	2.8
Mars	8.7	9.0	9.1	9.1	6.4
Avril	10.5	10.4	10.7	10.5	9.8
Mai	15.0	14.8	15.1	15.1	14.2
Juin	20.9	20.4	20.7	21.1	17.7
Juillet	21.4	20.7	21.0	21.4	20.2
Août	21.2	20.8	21.1	21.3	19.7
Septembre	14.1	14.0	14.7	15.1	15.7
Octobre	11.8	12.0	12.6	12.8	11.4
Novembre	5.7	5.5	6.1	6.1	6.0
Décembre	2.1	2.0	2.7	3.3	3.1
<b>Moyenne annuelle</b>	11.3	11.1	11.6	11.8	10.8

En 2017, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.5 °C. Avec cette température, l'année 2017 (comme 2002) se classe au 7<sup>e</sup> rang (la plus chaude étant 1994 avec 11.9 °C et la plus fraîche 1980 avec 9.2 °C) de la période 1980 - 2017. (tableau 1.2, figure 1.2).

Tableau 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air de l'inter-stations (°C).

Table 1.2 : Mean annual air temperature at the inter-stations (°C).

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1980	9.2	1999	11.0
1981	9.9	2000	11.6
1982	10.6	2001	11.0
1983	10.4	2002	11.5
1984	9.7	2003	11.7
1985	9.4	2004	11.0
1986	10.0	2005	10.6
1987	10.1	2006	11.3
1988	10.9	2007	11.4
1989	11.0	2008	10.9
1990	11.2	2009	11.3
1991	10.4	2010	10.3
1992	10.9	2011	11.8
1993	10.4	2012	11.1
1994	11.9	2013	10.3
1995	10.9	2014	11.7
1996	10.2	2015	11.7
1997	11.1	2016	11.2
1998	11.0	2017	11.5

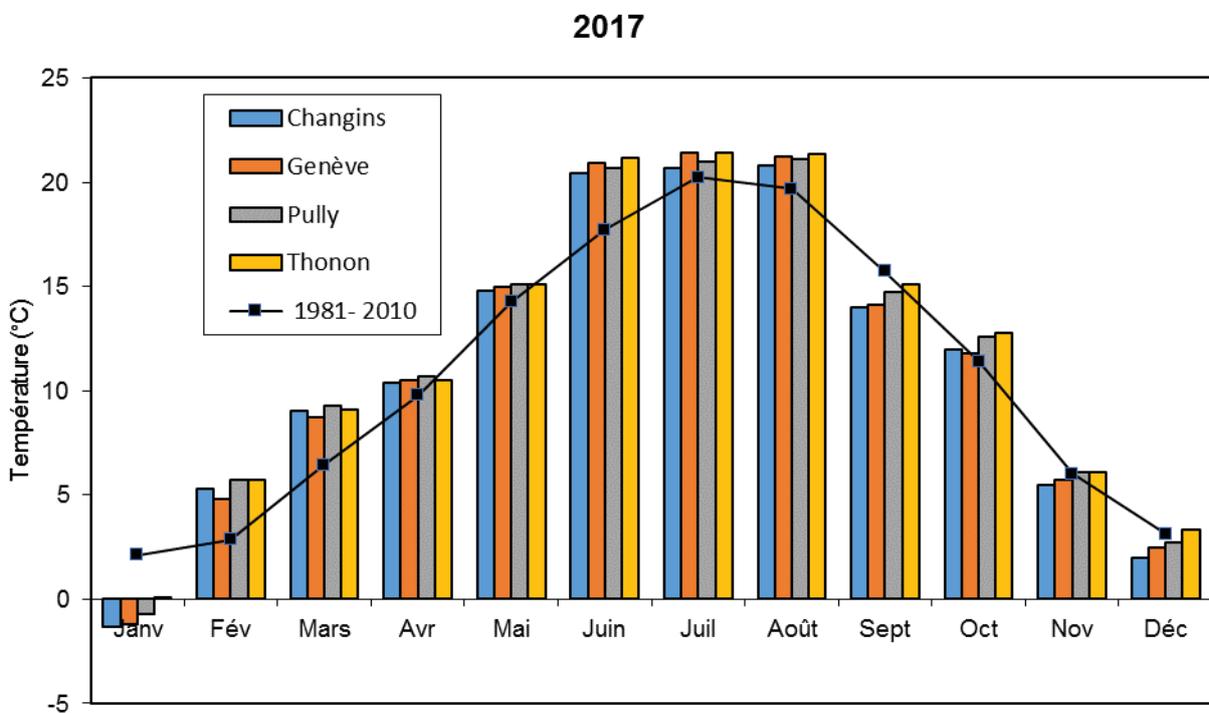


Figure 1.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2017 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1.1 : Mean monthly air temperature at each station in 2017 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

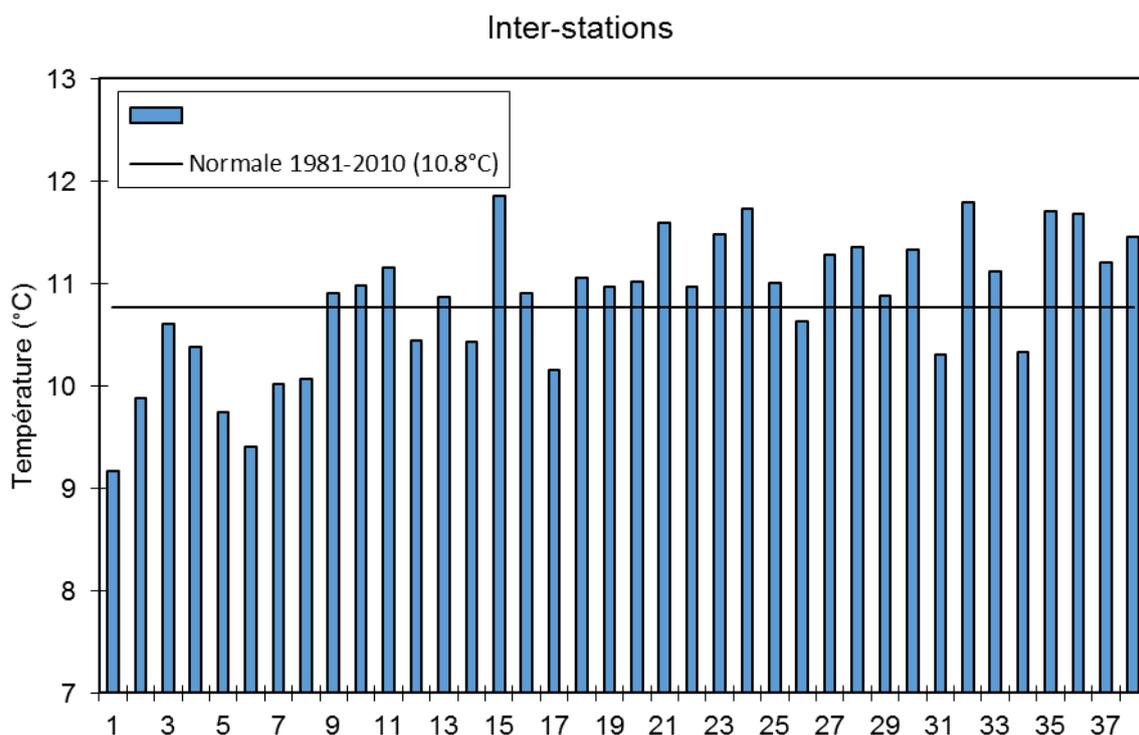


Figure 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

Figure 1.2 : Mean annual air temperature for the inter-stations (°C).

### 3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2017 sur le bassin lémanique est de 833.7mm, soit 175 mm inférieur à la normale inter-stations (1'008.9 mm) relevée sur les 4 stations entre 1981 et 2010. Ce qui donne pour l'année 2017 un déficit de 17.4 % par rapport à la normale. Pully est la station la plus arrosée avec 1'039.5 mm, Genève avec 693 mm a les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

A part les mois de décembre et, dans une moindre mesure, mai (mois pour lequel des orages sur Pully tirent la moyenne vers le haut) l'année fut sèche (particulièrement en janvier, septembre et Octobre).

Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2017.

Table 2.1 : Monthly rainfall (mm) at each station in 2017.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
<b>Janvier</b>	25.4	28.4	37.3	31.5	72.9
Février	51.6	53.5	76.2	67.5	60.8
Mars	56.7	85.7	82.8	57.0	68.5
Avril	40.0	42.9	49.9	43.0	73.5
Mai	80.9	103.1	147.5	90.5	92.8
Juin	77.3	79.1	95.0	91.0	94.3
Juillet	40.4	54.6	84.6	56.0	83.8
Août	62.1	63.1	86.1	93.5	86.6
Septembre	43.8	40.7	50.8	53.5	99.0
Octobre	18.0	20.4	47.8	23.5	102.5
Novembre	62.8	69.2	102.8	64	83.0
Décembre	133.0	152.1	178.7	138.5	88.9
<b>Total Annuel</b>	<b>693</b>	<b>792.8</b>	<b>1039.5</b>	<b>809.5</b>	<b>1'008.9</b>

En inter-stations, l'année 2017 se classe au 32<sup>e</sup> rang (sur 38) de la chronologie pluviométrique 1980 - 2017 (le 1<sup>er</sup> étant 2001 avec 1'298 mm, le dernier étant 1989 avec 661 mm) (tableau 2.2, figure 2.2).

Tableau 2.2 : Pluviométrie annuelle de l'inter-stations (mm).

Table 2.2 : Annual rainfall at the inter-stations (mm).

Années	Pluviométrie total annuel	Années	Pluviométrie total annuel
1980	1'067.1	1999	1'266.0
1981	1'082.8	2000	1'028.2
1982	1'037.5	2001	1'298.7
1983	1'022.3	2002	1'169.5
1984	911.8	2003	760.6
1985	957.1	2004	980.0
1986	964.2	2005	775.1
1987	1'044.8	2006	1'069.2
1988	1'078.0	2007	1'135.7
1989	660.7	2008	1'047.8
1990	1'093.9	2009	849.9
1991	860.3	2010	815.5
1992	1'057.8	2011	750.1
1993	1'060.5	2012	1'092.3
1994	1'124.1	2013	1'219.0
1995	1'194.7	2014	1'068.1
1996	972.8	2015	808.7
1997	1'022.9	2016	1'115.0
1998	924.6	2017	833.7

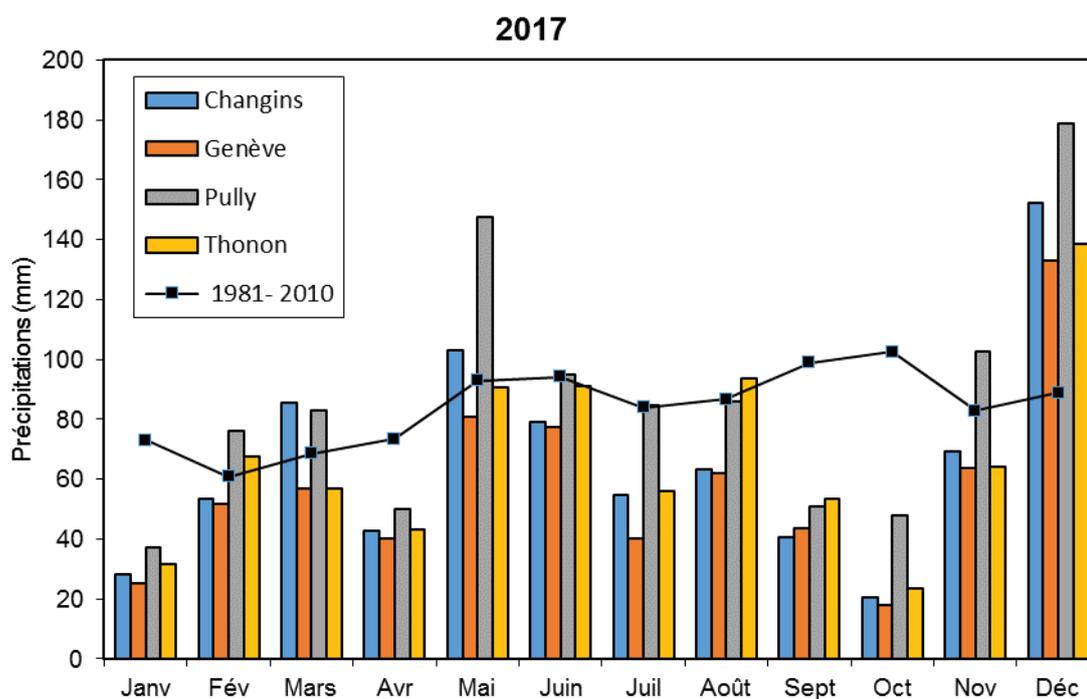


Figure 2.1 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2017 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 2.1 : Monthly rainfall at each station in 2017 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

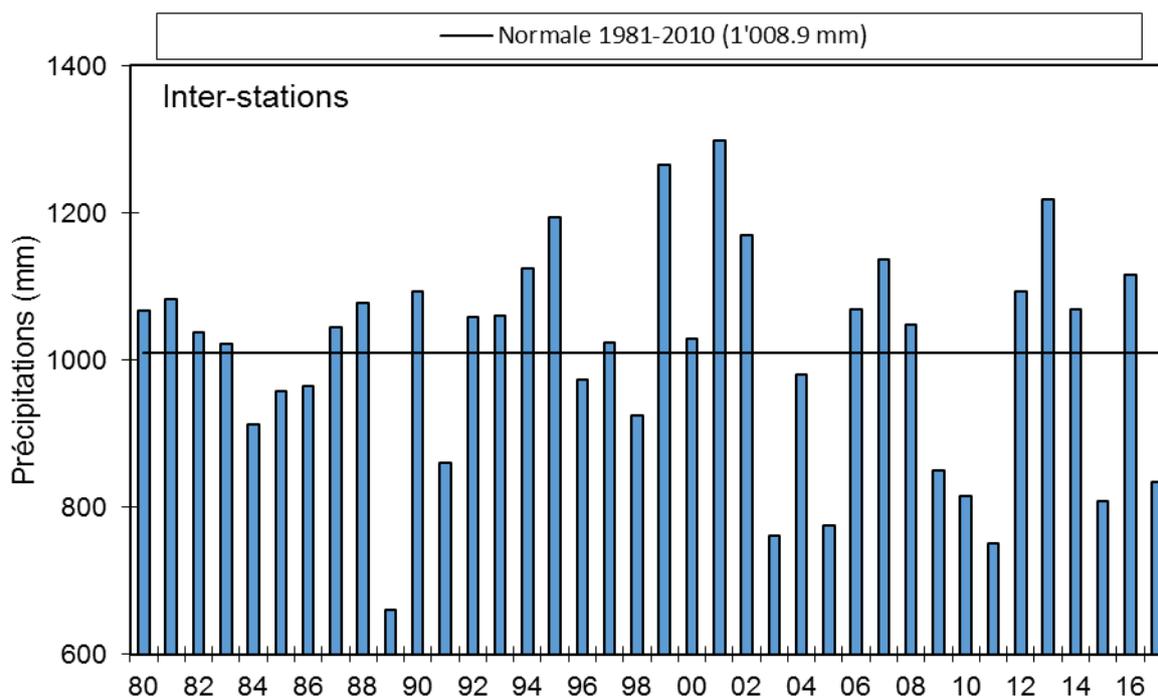


Figure 2.2 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

Figure 2.2 : Annual rainfall at the inter-stations (mm).

#### 4. INSOLATION

L'insolation des mois d'avril et octobre fut particulièrement élevée (+ 74 heures par rapport à la moyenne 1981-2010). Cela aboutit à une somme de l'insolation mensuelle de février à juin de 193 heures supérieure à sa moyenne inter stations. (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Insolation mensuelle à chaque station en 2017 (h).

Table 3.1 : Monthly insolation at each station in 2017 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	41	61	62	28	62.4
Février	105	116	116	100	90.7
Mars	171	188	171	167	156.4
Avril	261	267	255	244	182.1
Mai	242	238	237	251	208.1
Juin	280	281	276	304	236.7
Juillet	246	237	231	267	258.6
Août	254	256	236	239	236.8
Septembre	178	174	148	183	183.6
Octobre	200	204	195	178	120.0
Novembre	75	90	79	55	69.2
Décembre	39	52	54	29	49.8
Total annuel	2'090	2'163	2'060	2'045	1'854.4

L'année 2017 avec une moyenne inter-stations de 2'089.5 heures est une année ensoleillée. Elle se classe 5<sup>e</sup> sur la période 1980 - 2017 (la 1<sup>e</sup> étant 2003 avec 2'290 h, la dernière étant 1987 avec 1'442 h). C'est la 8<sup>e</sup> fois depuis 2000 que l'insolation totale annuelle dépasse les 2'000 heures (tableau 3.2, figure 3.3).

Tableau 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations (h).

Table 3.2 : Annual insolation at the inter-stations (h).

Années	Insolation total annuel	Années	Insolation total annuel
1980	1'672.3	1999	1'770.1
1981	1'557.5	2000	1'998.9
1982	1'730.8	2001	1'837.6
1983	1'635.7	2002	1'828.6
1984	1'713.3	2003	2'290.5
1985	1'829.2	2004	2'000.1
1986	1'611.0	2005	2'138.4
1987	1'442.5	2006	1'992.4
1988	1'652.7	2007	2'096.7
1989	1'864.4	2008	1'961.9
1990	1'973.2	2009	2'028.4
1991	1'870.0	2010	1'817.3
1992	1'676.1	2011	2'203.0
1993	1'669.2	2012	2'008.4
1994	1'707.5	2013	1'813.2
1995	1'896.5	2014	1'902.8
1996	1'769.3	2015	2'028.6
1997	1'948.4	2016	1'847.7
1998	1'981.7	<b>2017</b>	2'089.5

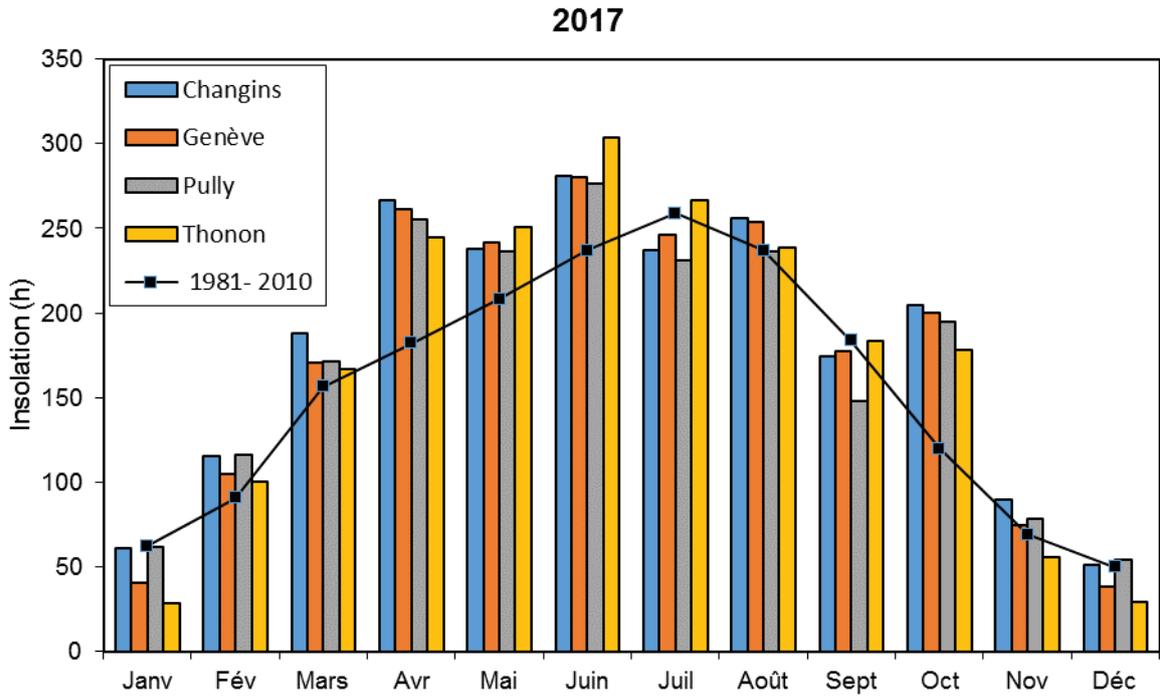


Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2017 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3.1 : Monthly insolation at each station in 2017 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

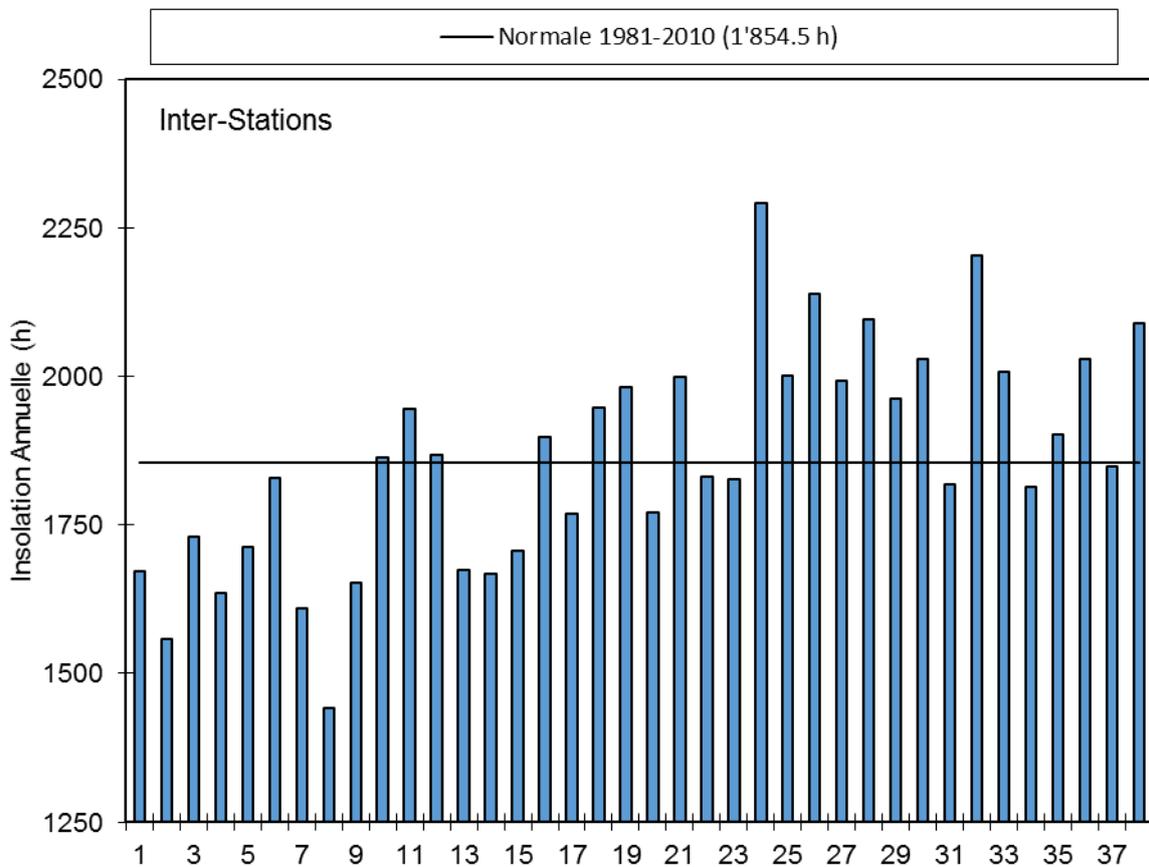


Figure 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations.

Figure 3.2 : Annual insolation at the inter-stations.

## 5. RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations pour l'année 2017 est de  $13.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  (tableau 4.1, figure 4.1).

Tableau 4.1 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2017 (moyenne journalière en  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

Table 4.1: Global monthly solar irradiation at each station in 2017 (mean daily irradiation in  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	3.5	4.4	4.1	2.5	3.6
Février	7.5	7.8	7.6	6.7	6.5
Mars	13.1	13.1	12.3	11.6	11.2
Avril	20.6	20.1	19.3	18.2	15.6
Mai	21.5	20.8	20.8	20.4	18.8
Juin	25.0	24.7	23.9	24.5	21.3
Juillet	22.8	21.7	21.5	21.5	21.3
Août	20.1	19.8	18.7	18.3	18.2
Septembre	14.7	14.2	13.1	13.4	13.4
Octobre	11.3	11.0	10.5	10.1	7.9
Novembre	4.8	5.1	4.8	4.2	4.3
Décembre	2.9	3.3	3.2	2.2	2.9
Moyenne Annuelle	14.0	13.8	13.3	12.8	12.04

Pour l'inter-stations en 2017, le rayonnement global annuel obtenu est de  $4'923 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , ce qui classe l'année, seconde sur la période 1980 - 2017 (tableau 4.2, figure 4.2).

Tableau 4.2 : Rayonnement global annuel en inter-stations (MJ·m<sup>-2</sup>).

Table 4.2 : Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ·m<sup>-2</sup>).

Années	Rayonnement global total annuel	Années	Rayonnement global total annuel
1980	4'153	1999	4'188
1981	4'263	2000	4'488
1982	4'391	2001	4'310
1983	4'239	2002	4'337
1984	4'274	2003	4'894
1985	4'485	2004	4'858
1986	4'178	2005	4'712
1987	3'956	2006	4'593
1988	4'139	2007	4'671
1989	4'325	2008	4'486
1990	4'401	2009	4'837
1991	4'415	2010	4'575
1992	4'219	2011	5'000
1993	4'126	2012	4'747
1994	4'100	2013	4'547
1995	4'339	2014	4'653
1996	4'310	2015	4'869
1997	4'405	2016	4'584
1998	4'378	2017	4'923

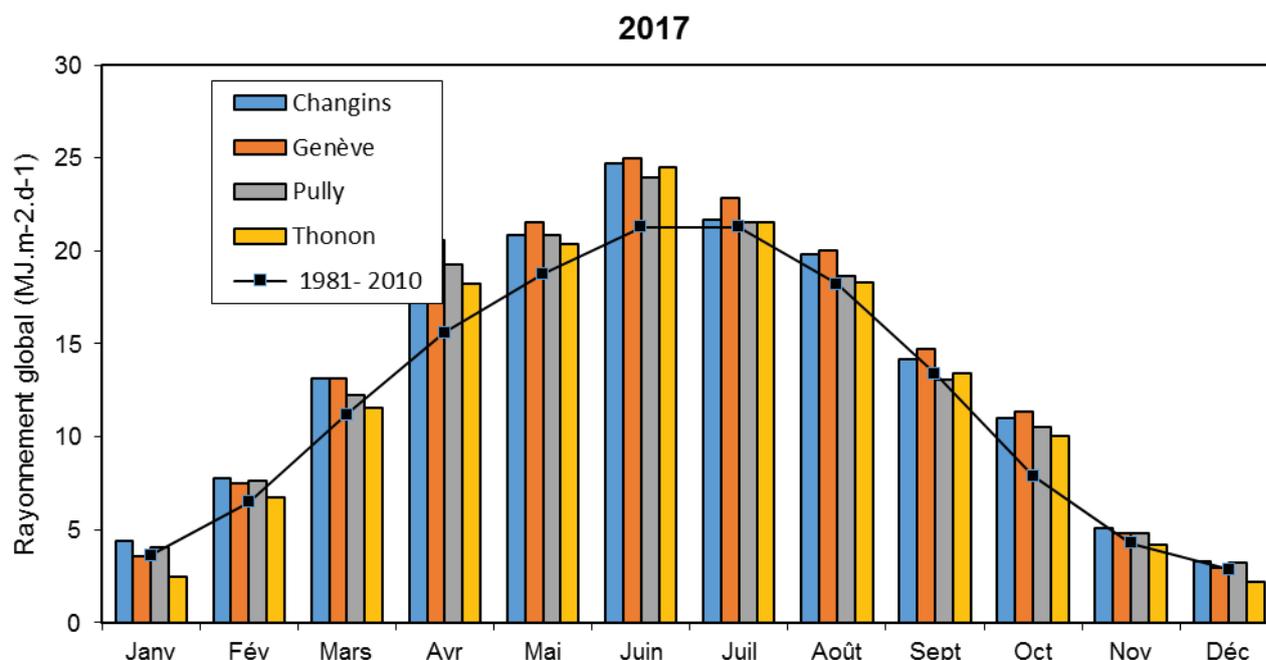


Figure 4.1 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2017 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 4.1 : Mean monthly global solar irradiation at each station in 2017 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

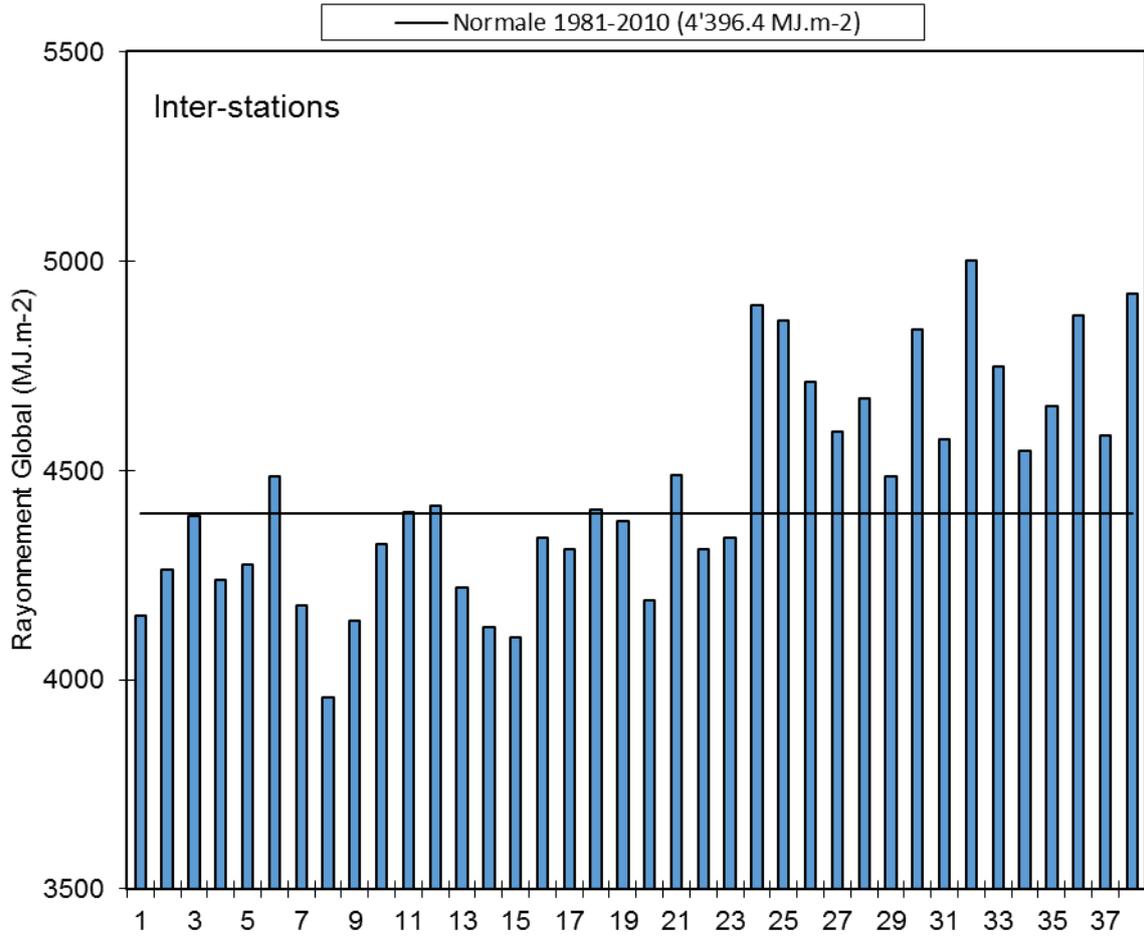


Figure 4.2 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m<sup>-2</sup>).

Figure 4.2 : Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ.m<sup>-2</sup>).

## 6. VENT

### 6.1 VITESSE DU VENT

En 2017 à Changins, station de référence, les mois de janvier, novembre, décembre et Avril furent venteux, et le reste de l'année les vitesses de vent furent inférieures à la moyenne de la période 1981-2010. (tableau 5.1, figure 5.1 et tableau 5.2).

Tableau 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2014 (m·s<sup>-1</sup>)

Table 5.1 : Mean monthly wind speeds in 2014 (m·s<sup>-1</sup>).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1981-2010
Janvier	2.5	2.5	1.7	1.3	2.4
Février	3.3	3.3	1.9	1.9	2.8
Mars	3.0	3.3	1.9	1.8	3.3
Avril	2.5	2.5	1.7	1.3	3.3
Mai	2.5	2.5	1.7	1.2	2.8
Juin	2.2	1.9	1.4	1.0	2.8
Juillet	2.2	2.2	1.7	1.1	2.7
Août	1.9	2.2	1.7	1.1	2.6
Septembre	1.9	1.9	1.4	1.0	2.6
Octobre	2.2	2.2	1.7	1.4	2.4
Novembre	2.5	2.2	1.7	1.6	2.5
Décembre	1.4	1.4	1.1	0.9	2.6
Moyenne annuelle	<b>2.4</b>	<b>2.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.3</b>	<b>2.7</b>

Pour l'année 2017 à Changins, il a été enregistré 23 jours de vent fort (> 5 m·s<sup>-1</sup>) dont 10 jours durant le 1<sup>e</sup> trimestre (figure 5.2). Le maximum de vent moyen journalier a été relevé le 17 janvier (avec 12.47 m·s<sup>-1</sup>).

Tableau 5.2 : Vent moyen annuel à Changins (m·s<sup>-1</sup>).

Table 5.2 : Mean annual wind speed at Changins (m·s<sup>-1</sup>).

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1980	2.5	1999	2.9
1981	2.5	2000	2.6
1982	2.6	2001	2.8
1983	2.7	2002	2.6
1984	3.4	2003	2.3
1985	3.0	2004	2.4
1986	2.9	2005	2.2
1987	2.7	2006	2.4
1988	3.1	2007	2.7
1989	3.0	2008	2.5
1990	3.1	2009	2.6
1991	3.2	2010	2.6
1992	2.8	2011	2.2
1993	2.9	2012	2.6
1994	2.7	2013	2.4
1995	2.9	2014	2.3
1996	2.7	2015	2.5
1997	2.5	2016	2.4
1998	3.0	2017	2.4

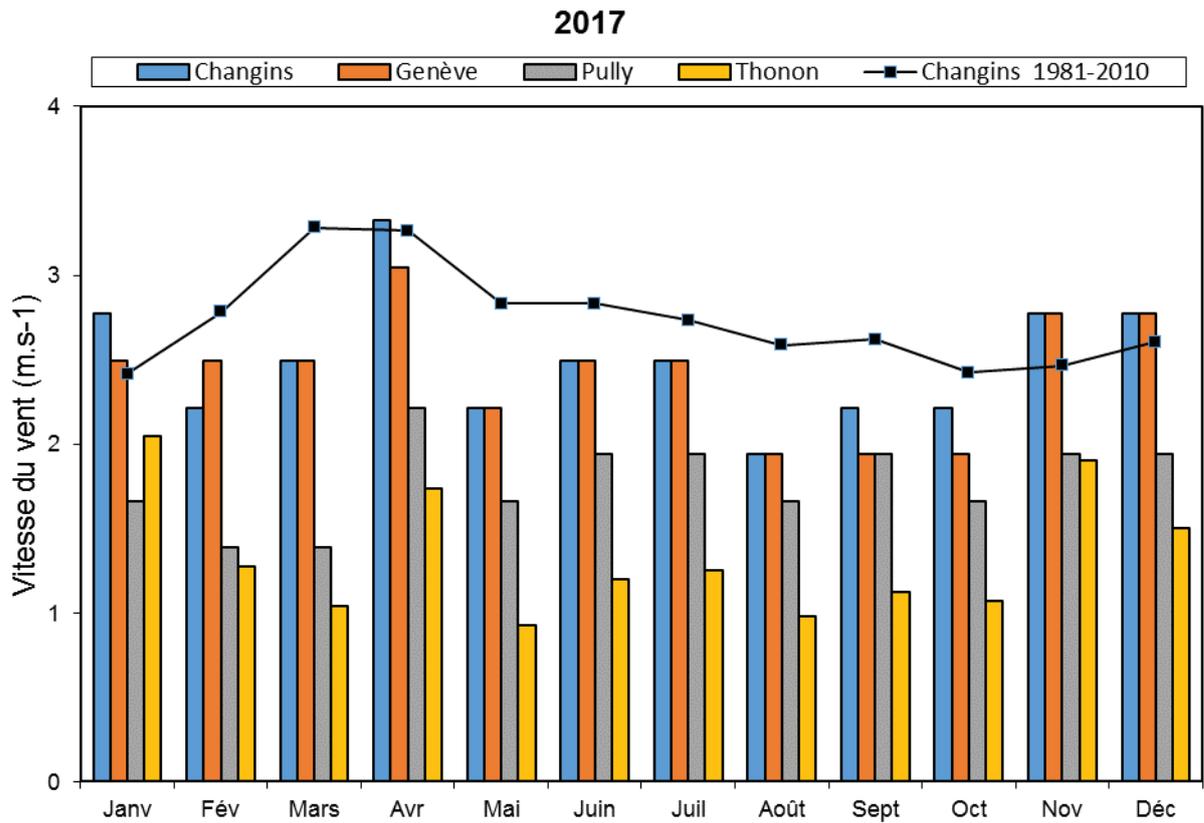


Figure 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2017 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5.1 : Mean monthly wind speeds at each station in 2017 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

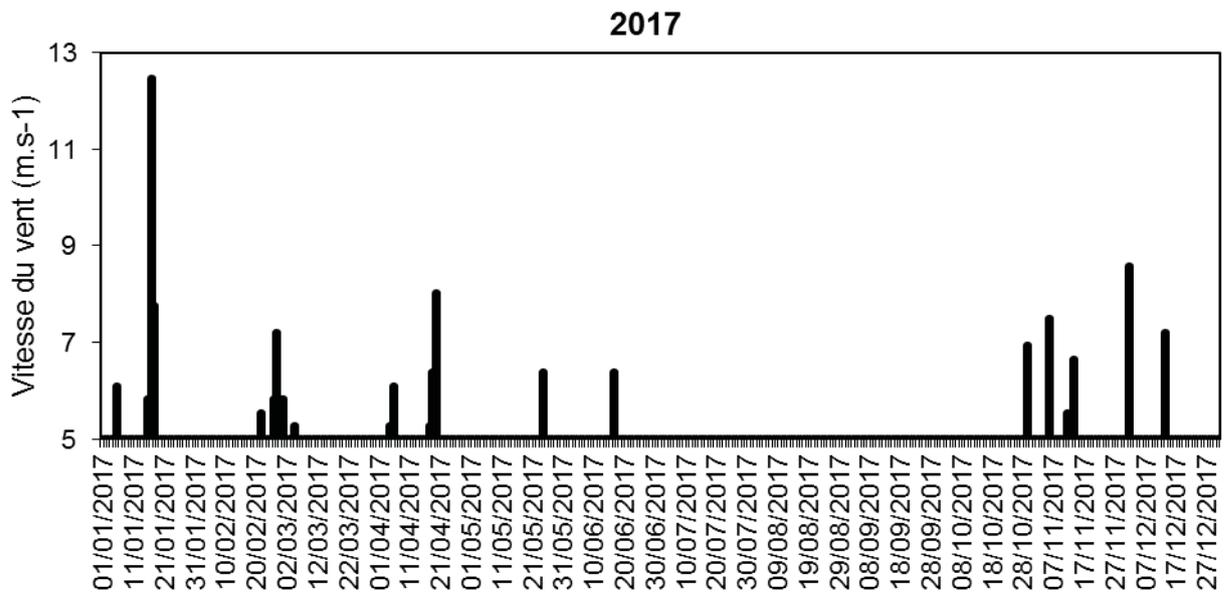


Figure 5.2 : Répartition annuelle (en 2017) des vents forts (> 5 m.s-1) à Changins.

Figure 5.2 : Annual distribution (in 2017) of strong winds (> 5 m.s-1) at Changins.

## 6.2 ROSE DES VENTS

Pour l'année 2017 à Changins, 64 % des vents (figure 5.3) se répartissent principalement selon le demi-cercle S-O-N. Les vents qui sont supérieurs à  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  représentent 11.2% des vents totaux, 42.9 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 43.8 % sont d'origine opposée S-O.

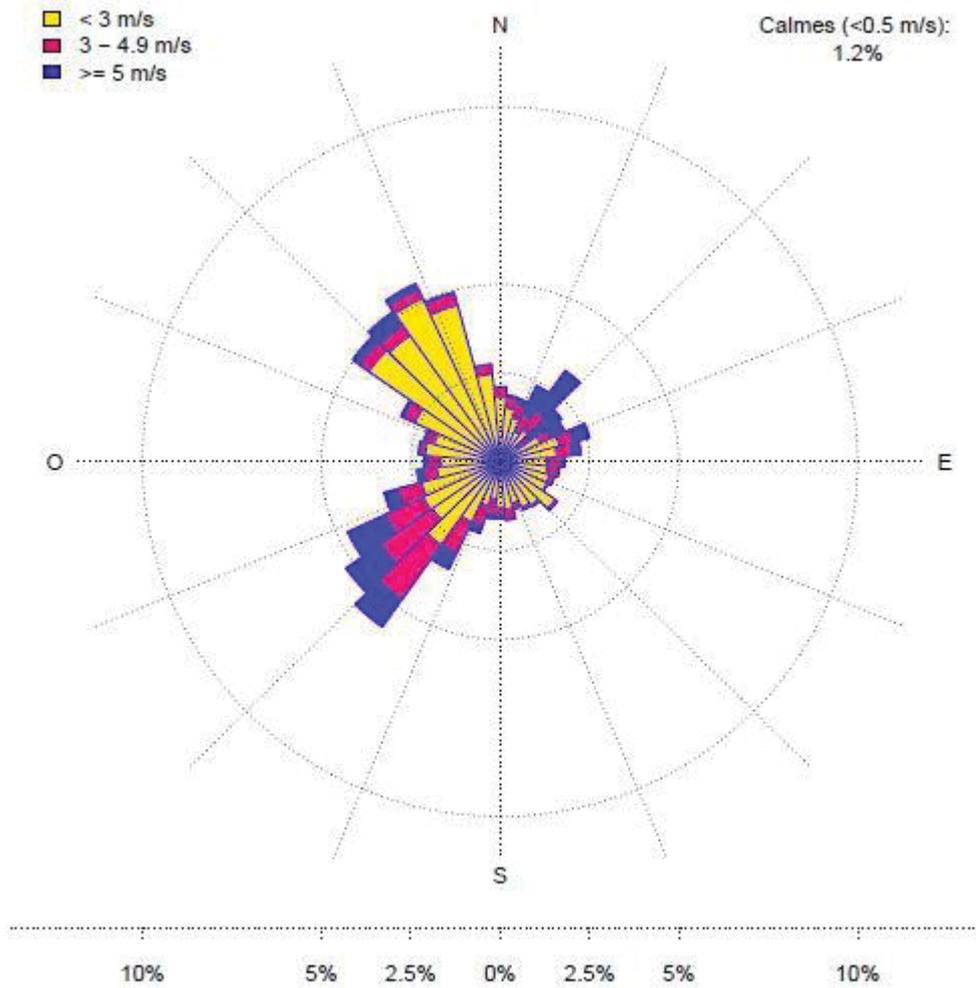


Figure 5.3 : Rose des vents moyennes à Changins en 2017 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle : % d'occurrence).

Figure 5.3 : Wind directions at Changins in 2017 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).