

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

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

CAMPAGNE 2018

PAR

Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (INRA-UMR/CARTELE), CS 50511, FR - 74203 THONON-LES-BAINS Cedex

RÉSUMÉ

L'année 2018 est l'année la plus chaude mesurée depuis 1981. La température moyenne annuelle de l'air inter-stations est de 12.3 °C, soit supérieure de 1.5 °C à la normale de la période 1981-2010. L'année 2018 est normalement venteuse, bien ensoleillée et avec une pluviométrie qui présente un déficit de 9.1 % par rapport à la moyenne 1981-2010.

Les conditions météorologiques de l'année 2018 n'ont pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. La profondeur du brassage hivernal est observée à 201m. Les couches d'eau profondes ne sont pas réoxygénées. La concentration en oxygène dissous à 309m reste inférieure à 4mgO₂/L tout au long de l'année 2018.

La température moyenne de l'eau entre 0 et 10m montre un réchauffement de 0.6°C dans les couches d'eau superficielles par rapport à l'année 2017. L'activité phytoplanctonique est forte au mois d'avril et de septembre. La concentration en chlorophylle-a entre 0 et 30m est la plus importante depuis l'année 2008.

Les concentrations moyennes en phosphore total augmentent considérablement par rapport à l'année 2017 avec la valeur moyenne annuelle pondérée de 19.90 µgP/L. Le phosphore particulaire constitue une part majoritaire du phosphore dans les couches superficielles. Le phosphore soluble réactif continue à diminuer légèrement par rapport à 2017, avec une valeur moyenne annuelle pondérée à 14.49 µgP/L.

ABSTRACT

The year 2018 is the hottest year since 1981. The annual average inter-plant temperature in 2018 was 12.3 °C, 1.5°C above the normal of the period 1981 – 2010. The year 2018 was normally windy, sunny and showed a rainfall deficit of 9.1% compared to normal of the period 1981 – 2010.

The weather conditions of the year 2018 did not permit a complete homogenization of the water column of Lake Geneva. The partial mixing has reached 201m depth. Deep water layers were not reoxygenated. The dissolved oxygen concentration at 309m remained under 4mgO₂/L throughout the year 2018.

The average water temperature between 0 and 10m shows a warming of 0.6°C in surface water layers during compared to the year 2017. In 2018, the spring and autumnal phytoplankton activity is strong during April and September 2018. The chlorophyll-a concentration between 0 and 30m is highest since 2008.

The annual average concentration of total phosphorus increases considerably, 19.90 µgP/L in 2018 compared to 17.75µgP/L in 2017. The particulate phosphorus is predominant form of total phosphorus in surface water layers. The annual average concentration of orthophosphate continues to decrease to 14.49 µgP/L compared to the year 2017

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman en 2018, 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 2018 (température de l'air, pluviométrie, insolation, rayonnement global et vents) est intégré à ce rapport et figure en annexe V. 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 Alpains) pour la période 1973-2018 (SOERE OLA-IS 2018).

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).

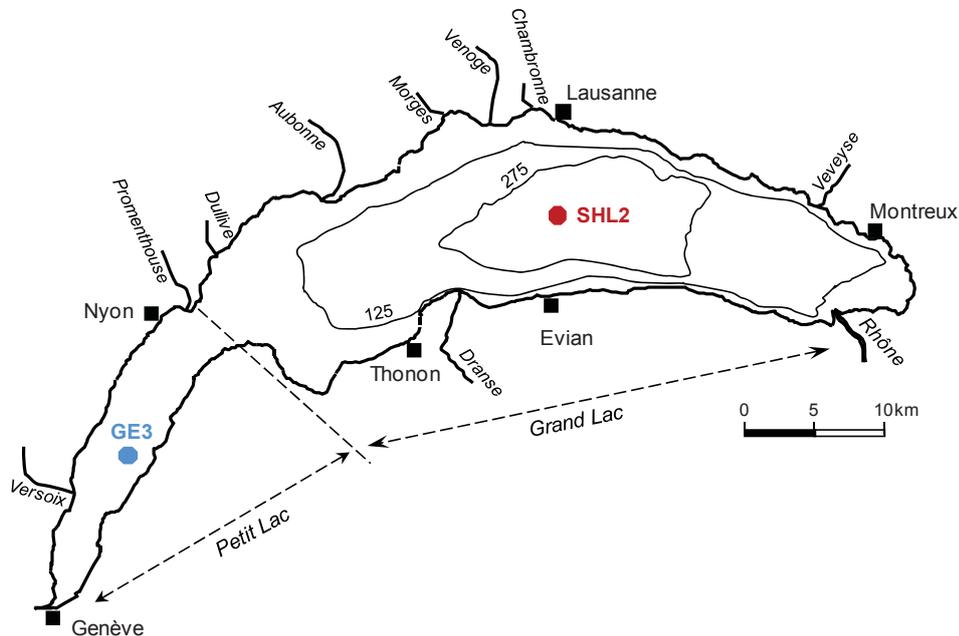


Figure 1 : Situation des points de prélèvement sur le Léman

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 20 campagnes de prélèvements en 2018, 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 | Campagne n° | Date |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 1 | 23.01.2018 | 11 | 17.07.2018 |
| 2 | 14.02.2018 | 12 | 30.07.2018 |
| 3 | 06.03.2018 | 13 | 22.08.2018 |
| 4 | 26.03.2018 | 14 | 12.09.2018 |
| 5 | 09.04.2018 | 15 | 26.09.2018 |
| 6 | 23.04.2018 | 16 | 09.10.2018 |
| 7 | 15.05.2018 | 17 | 24.10.2018 |
| 8 | 28.05.2018 | 18 | 21.11.2018 |
| 9 | 12.06.2018 | 19 | 28.11.2018 |
| 10 | 02.07.2018 | 20 | 18.12.2018 |

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 rapport d'activité en 2016 (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

L'année 2018 est plus chaude que les années de la chronique de référence 1981-2010. En 2018, la température moyenne annuelle de l'air inter-stations est de 12.3 °C, soit supérieure de 1.5 °C à la normale de la période 1981-2010, dont la moyenne est de 10.8°C. L'année 2018 se distingue de la chronique avec une température moyenne mensuelle supérieure à la normale 1981-2010 sur l'ensemble de l'année, excepté pour les mois de février et de mars (Annexe V).

La température moyenne pondérée des couches d'eau superficielles (0-10m) montre des mois d'hiver semblables à l'année 2017, un mois de juillet plus froid (19.0 °C) et des mois de mai, juin, août et décembre plus chaud que l'année 2017 avec une différence respective de 3.1°C, 3.4 °C, 1.5°C et 1.2°C (Figure 2).

Les conditions météorologiques de l'hiver 2018 n'ont pas permis un brassage hivernal complet de la colonne d'eau. D'après le suivi scientifique du Léman, le brassage hivernal partiel s'est effectué jusqu'à 201m de profondeur à la date du 06 mars 2018 (Figure 3a, Figure 4). Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 5.7 °C le 23 janvier 2018 soit 0.1°C et 0.2°C de plus qu'en 2017 et 2016. Ce brassage n'a pas été suffisant pour réoxygéner l'eau des couches profondes du lac. La concentration en oxygène dissous mesurée au fond du lac est de 3.52 mgO₂/L lors du brassage (Figure 3a).

Au mois d'avril en 2018, la température moyenne de l'air inter-stations est de 13.3 °C, soit 3.5°C de plus par rapport à la normale de la période 1981-2010. Les couches superficielles se réchauffent au 09 avril 2018 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 en chlorophylle-a est de 8.85 µgChla/L à 3.5m au 09 avril 2018, qui correspond à une concentration en oxygène dissous à 12.10 mgO₂/L soit 114 % en saturation d'oxygène. Le pic d'oxygène épilimnique maximal est observé à 16.50 mgO₂/L à 3m au 23 avril 2018. Ce pic d'oxygène dissous correspond à une concentration importante en chlorophylle-a et un pic de production primaire.

La température maximale en surface est observée le 22 août 2018 avec 26.1°C contre 24.5°C au mois de juillet 2017 et contre 22.2°C au mois d'août en 2016 (Figure 3c). L'année 2018 est une année particulièrement chaude. La déstratification thermique automnale de la masse d'eau arrive plus tardivement au 12 novembre 2018 par rapport aux années précédentes (Figure 3d).

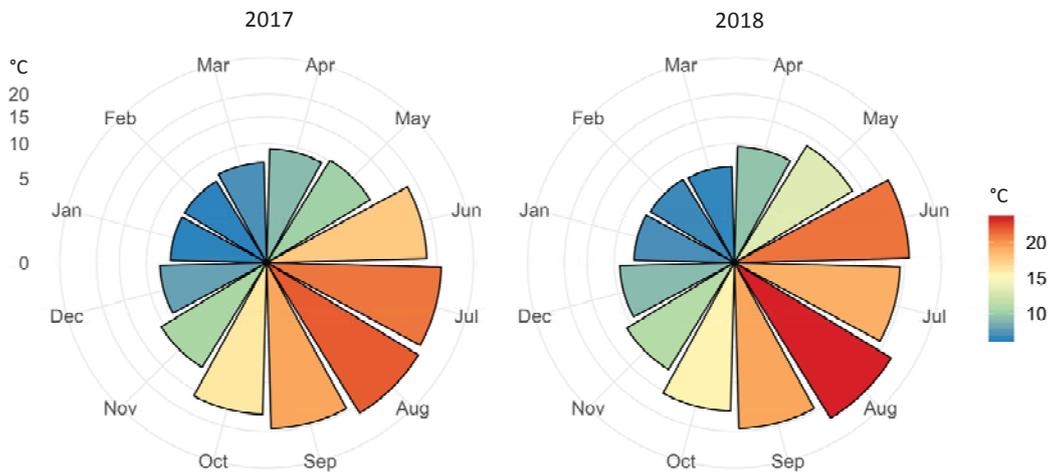


Figure 2 : Température moyenne mensuelle pondérée dans la couche superficielle (0-10 m) en 2017 et 2018, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 2 : Monthly weighted average temperature in water surface layer (0-10m) in 2017 and 2018, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

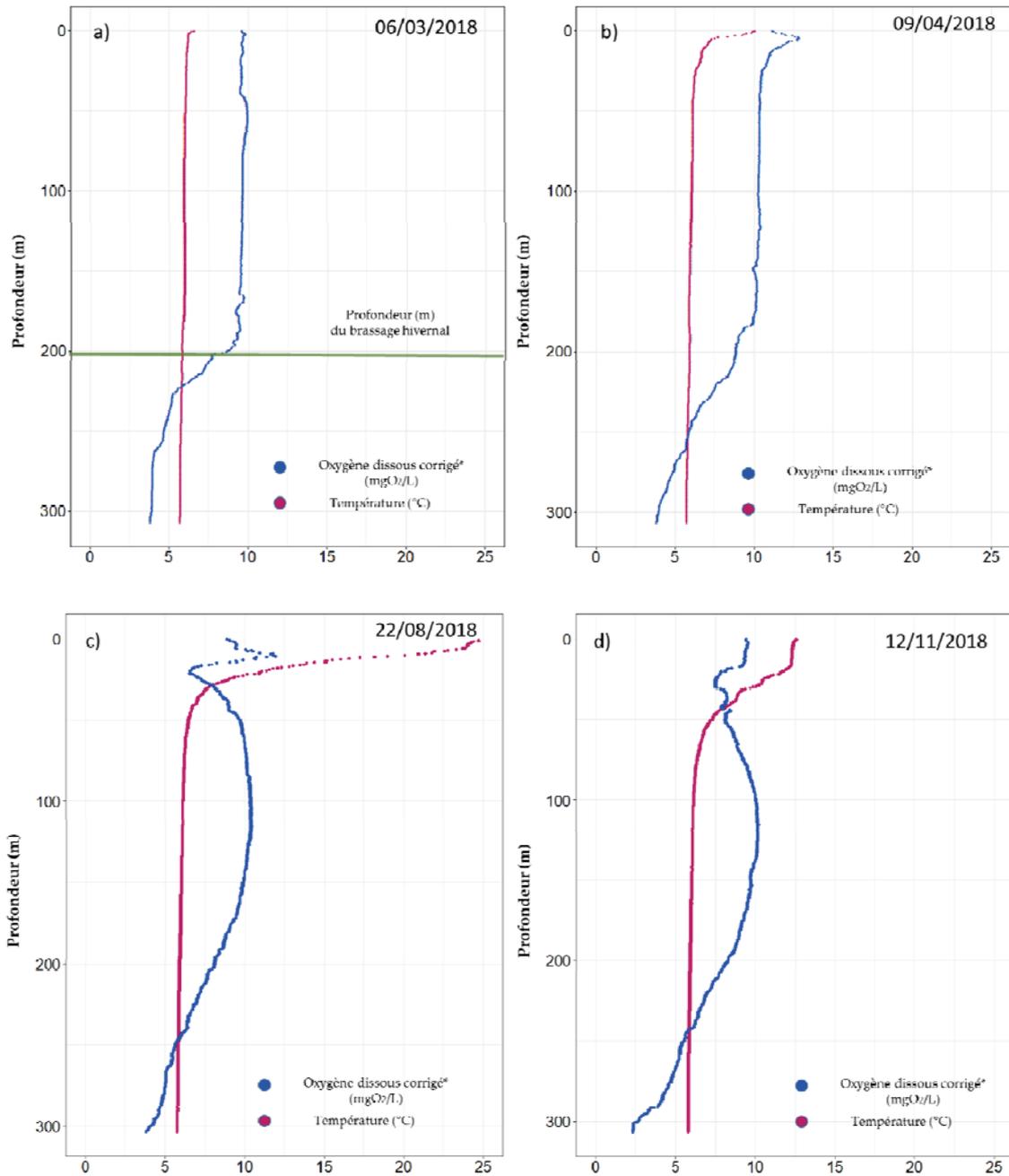


Figure 3 : Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman - Grand Lac (SHL2) :
a) en hiver lors du brassage partiel maximal (06.03.2018),
b) au printemps (06.03.2018),
c) en été (06.03.2018),
d) en automne (06.03.2018).

Figure 3 : Physico-chemical profile made using multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2) :
a) in winter after maximal water mixing (06.03.2018),
b) in spring (06.03.2018),
c) in summer (06.03.2018),
d) in autumn (06.03.2018).

* 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

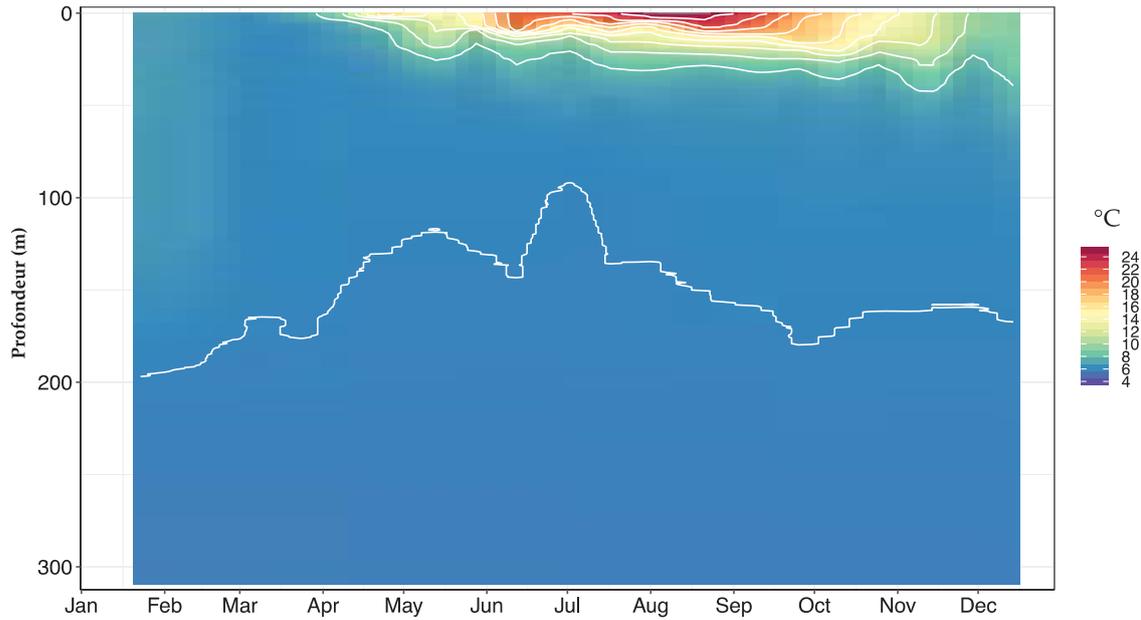


Figure 4 : Température des eaux du lac en 2018 (iso-contour en blanc), Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 4 : Water temperature in the lake in 2018 (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 marquée 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.

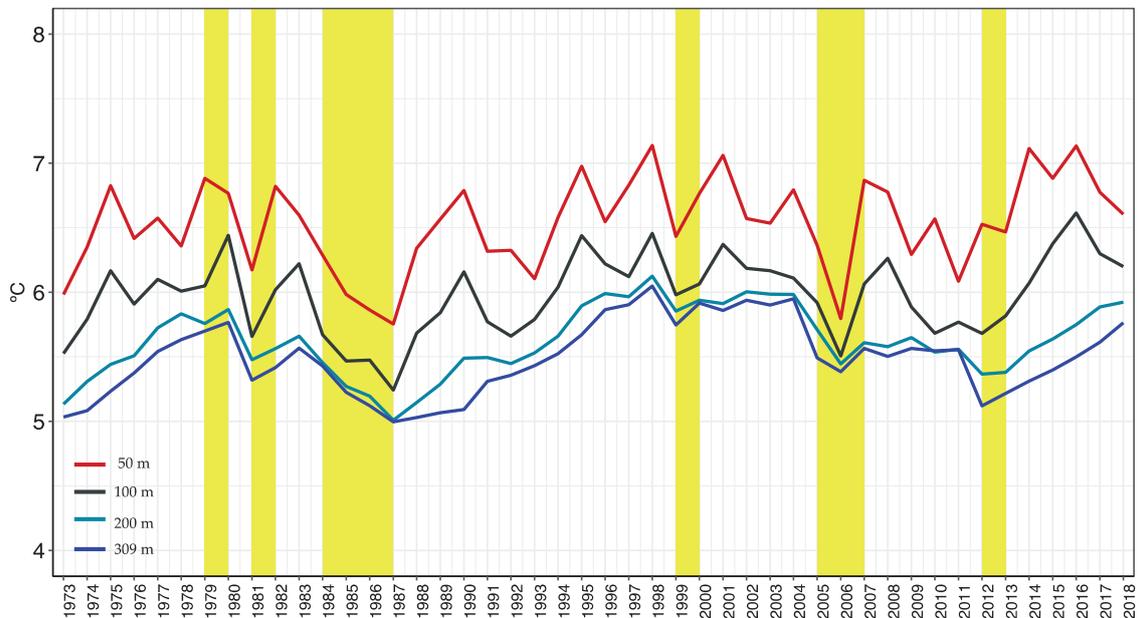


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1973 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

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 2018, 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.

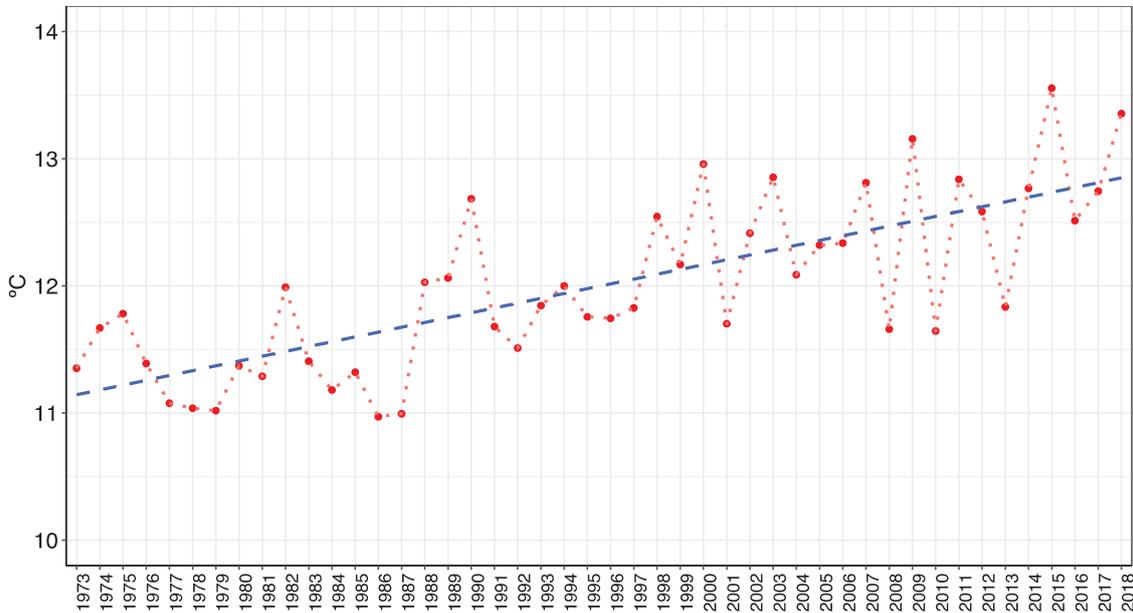


Figure 6 : Evolution de la température moyenne annuelle pondérée de l'eau de la couche superficielle (0-10m) de 1973 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 6 : Inter-annual changes in the weighted annual average water temperature of the top layer (0-10m) from 1973 to 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

La température dans les couches superficielles (0-10m) des mois d'hiver et d'automne en 2018 est comprise dans la distribution de température de la période 1973-2017. Du printemps à l'été, la température est supérieure à sa valeur de 75% percentile du 1973-2017, excepté pour le mois de juillet en 2018 (figure 7).

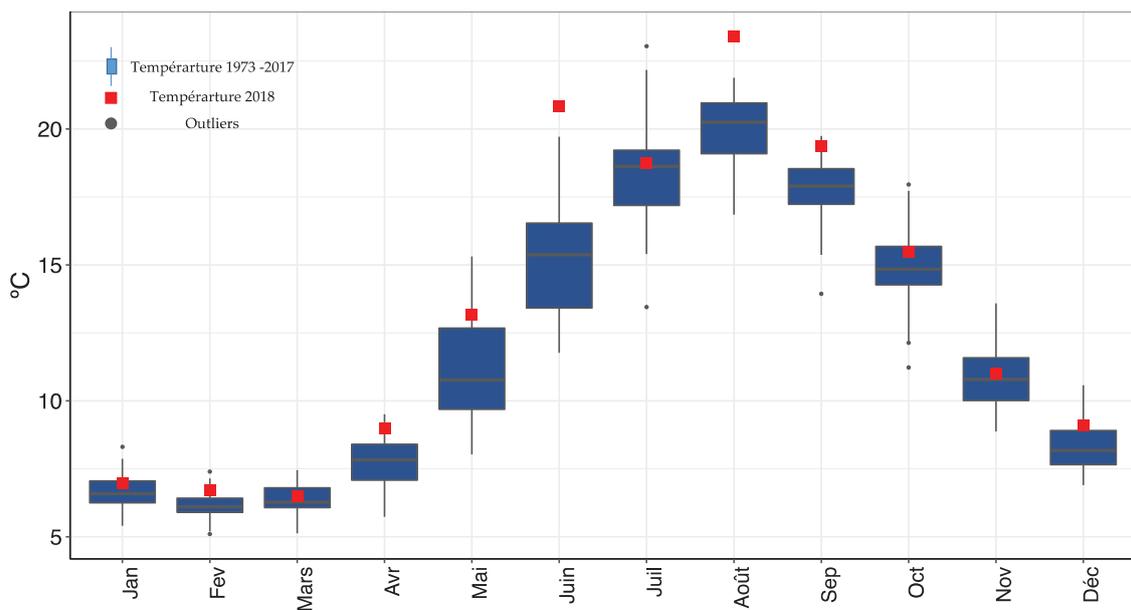


Figure 7 : Température moyenne mensuelle de l'eau de la couche superficielle (0-10m) du 1973-2017 (boxplot) et en 2018 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 7 : Monthly average water temperature of the top layer (0-10m) from 1973 – 2017 (boxplot) and in 2018 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

4. CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE 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 201 m, le pH de la colonne d'eau oscille entre 7.27 – 7.26 tel que l'on peut l'observer sur le profil du 06 mars 2018 en rouge (figure 8). La reprise de l'activité phytoplanctonique printanière provoque une augmentation du pH des couches superficielles dès au début du mois d'avril 2018. Cette hausse est provoquée par la consommation de CO₂ lors la photosynthèse. Le CO₂ étant consommé, l'équilibre acido-basique du milieu est modifié et le pH augmente. Lors du pic phytoplanctonique le 09 avril 2018, le pH moyen mesuré dans les couches d'eau superficielle entre 0-10m est de 8.40, soit 0.9 supérieur à la valeur du pH au mois de janvier 2018. Le pH continue à augmenter dans les couches d'eau superficielle jusqu'à la valeur maximale de 9.01 au 12 septembre 2018, plus tardive qu'en 2017 où ce phénomène a été observé le 04 juillet 2017. Cette valeur de pH correspond à des concentrations élevées en chlorophylle-a et des valeurs élevées de la production primaire durant les mois d'août et septembre (ANNEVILLE et al, ce rapport). Au mois de décembre 2018, le pH diminue progressivement dans toute la colonne d'eau en raison de la déstratification de la masse d'eau et de la diminution de l'activité phytoplanctonique.

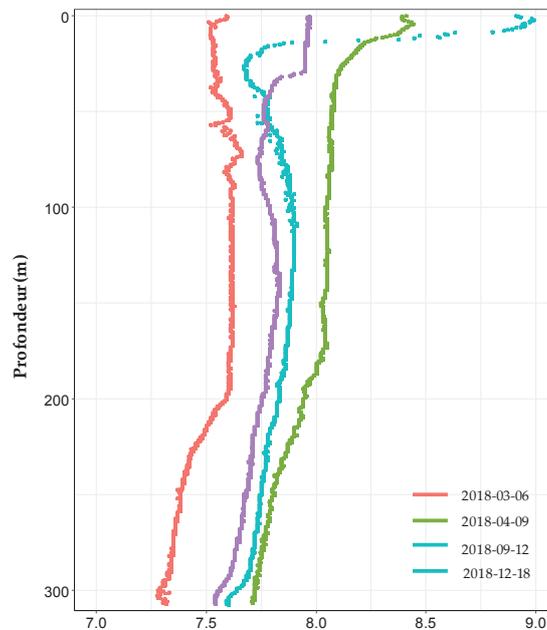


Figure 1 : pH des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (06/03/2018), à la reprise d'une activité photosynthétique significative (09/04/2018) et à l'issue de la déstratification de la colonne d'eau (18/12/2018), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8 : pH in the lake as a function of depth after maximal water mixing (06/03/2018), during recovery of significant photosynthetic activity (09/04/2018) and after water column destratification (18/12/2018), 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 2018 de janvier à septembre est comprise dans la gamme haute (supérieure ou égale à la 75^{ème} percentile) de l'historique des données de 1973 – 2017. Ceci traduirait pour 2018, une activité phytoplanctonique élevée.

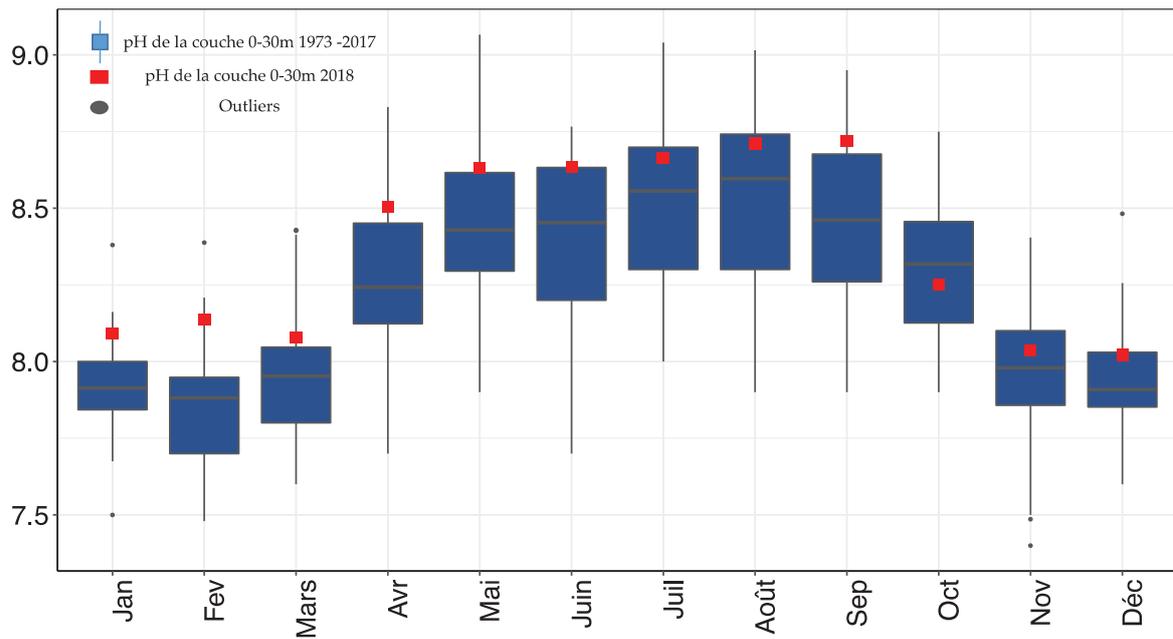


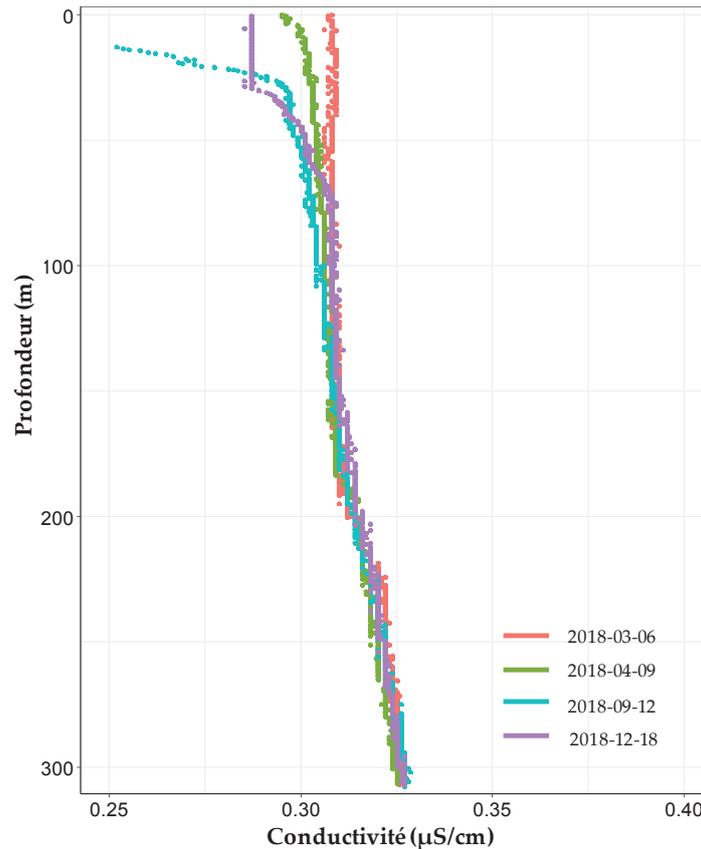
Figure 9 : Evolution du 90^e percentile du pH mensuel à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0–30 m) de 1973 à 2017 (boxplot) et en 2018 (carré rouge), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 9 : Change in 90th percentile of monthly pH at 25°C in lake's water surface layer (0 - 30 m) from 1973 to 2017 (boxplot) and in 2018 (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 306 et 326 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par la suite, la conductivité commence à diminuer de manière significative au début du mois d'avril dans l'épilimnion à partir de la reprise de l'activité phytoplanctonique. Cette diminution en conductivité est importante durant les mois juillet et septembre. 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 12 septembre 2018 avec des valeurs proches aux alentours de 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de 0 à 30 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 (06/03/2018), lors du démarrage significatif de la précipitation du carbonate de calcium (09/04/2018), lors de sédimentation maximale du carbonate de calcium (12/09/2018) et lors de l'enfoncement maximal de la thermocline (18/12/2018), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10 : Conductivity in the lake as a function of depth after maximal water mixing (06/03/2018), during the beginning of significant calcium carbonate precipitation (09/04/2018), during maximal calcium carbonate sedimentation (12/09/2018) and after thermocline deepening (18/12/2018), 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 1.52 et 1.80 meq/L en 2018. Il atteint une valeur maximale dans la colonne d'eau à 1.80 meq/L le 09 avril 2018 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 dans l'épilimnion est minimal au début de l'automne avec 1.52 meq·L⁻¹. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2018.

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 2018. 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.

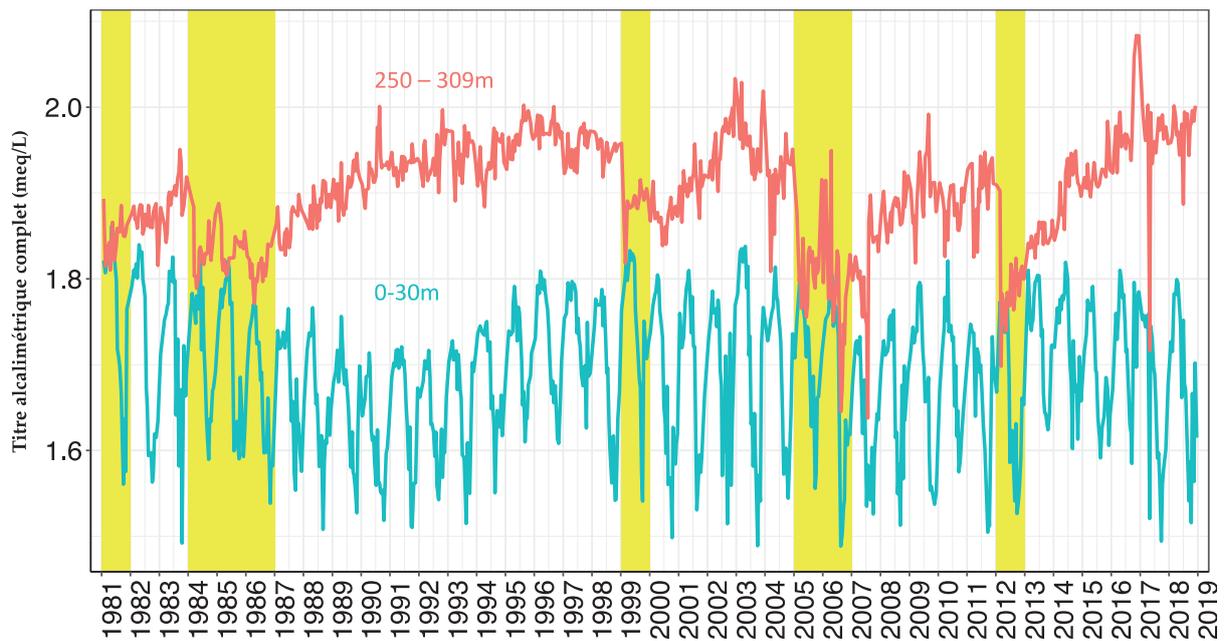


Figure 11 : Titre alcalimétrique complet moyen pondéré dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250-309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

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 2018 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 (figure 12).

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 2018.

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 4.62 $\mu\text{gP/L}$ dans les couches superficielles (0-30m) en 2018, soit 0.8 $\mu\text{gP/L}$ supérieure par rapport à l'année 2017.

Dans les couches profondes, la concentration en phosphore réactif soluble montre une modification temporelle sur le long terme. Le brassage complet de la colonne d'eau contribue à une réduction de la concentration en phosphore soluble réactif dans les couches profondes. La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif est de 39.02 $\mu\text{gP/L}$ dans les couches 250 – 309m en 2018, soit une diminution de 1.77 $\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2017.

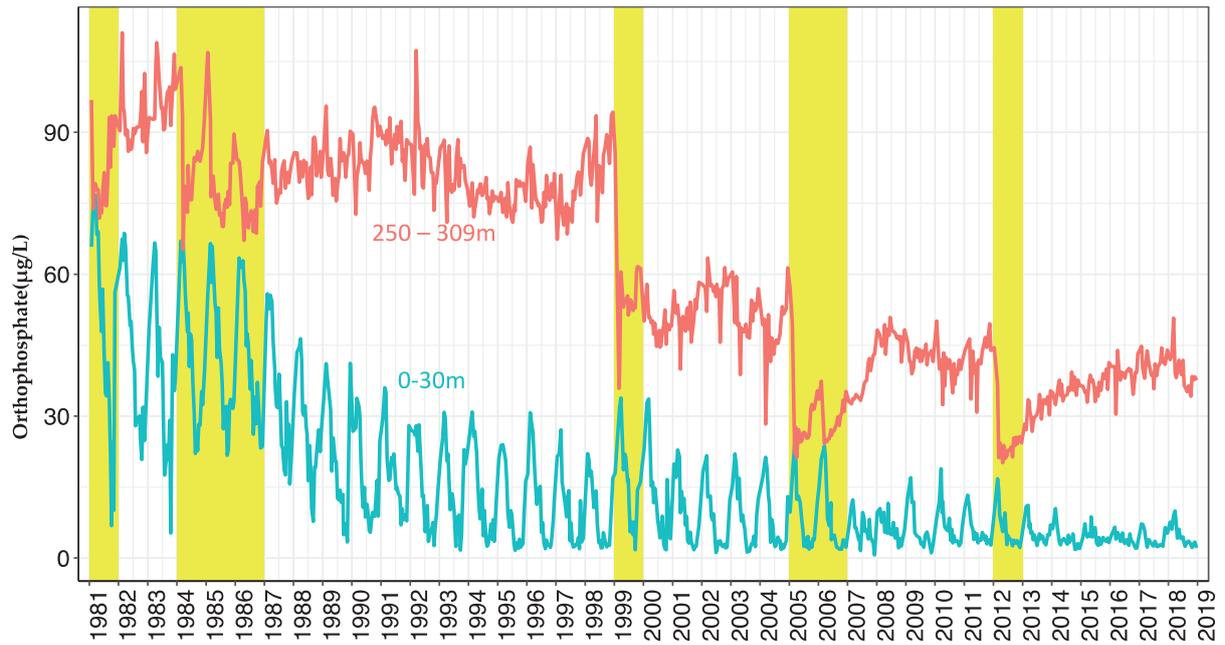
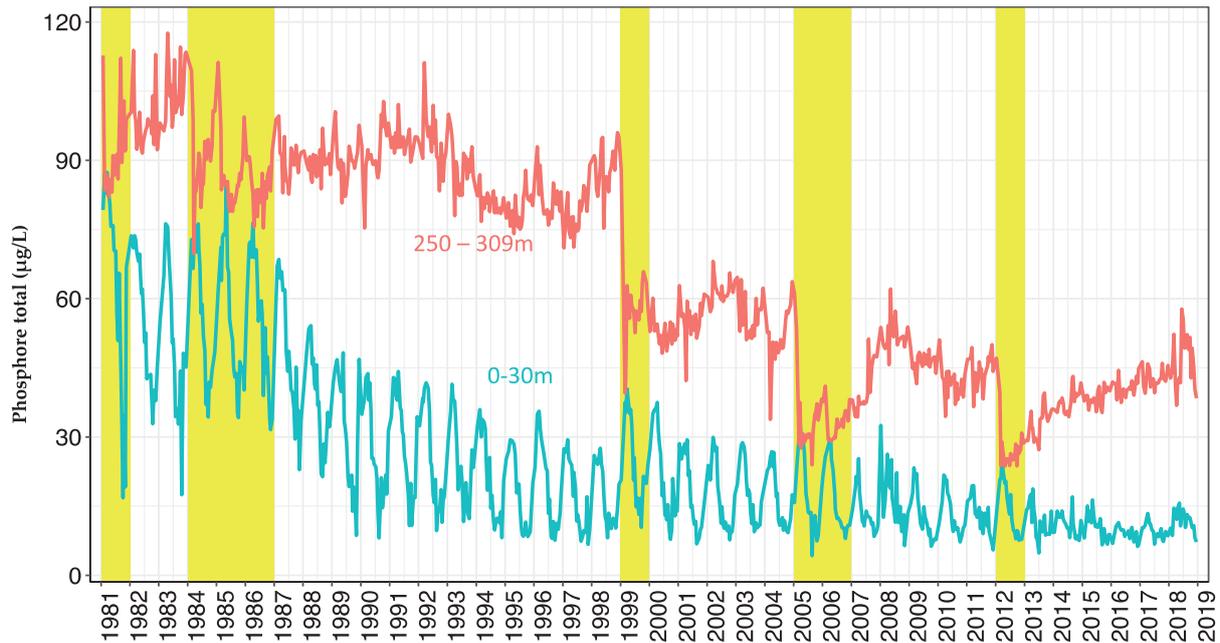


Figure 12 : Concentration moyenne pondérée en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

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 ($P-P_{tot}$) des eaux superficielles (0 - 30 m) et des eaux profondes (250-309m) de 1981 à 2018.

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 0-30m en 2018 est de 11.90 $\mu\text{gP/L}$, soit une augmentation de 2.27 $\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2017. La concentration en phosphore total dans les couches profondes est de 46.21 $\mu\text{gP/L}$, soit une augmentation de 3.51 $\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2017.



*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 $9.02\mu\text{gP/L}$, soit $3.07\mu\text{gP/L}$ de plus par rapport à l'année 2017. Depuis 2016, la concentration du phosphore soluble réactif dans la couche 0-30m mesurée lors du brassage hivernal continue à augmenter.

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. En 2018, la concentration en phosphore total lors du brassage est de $14.56\mu\text{gP/L}$, soit une augmentation de $3.67\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2017.

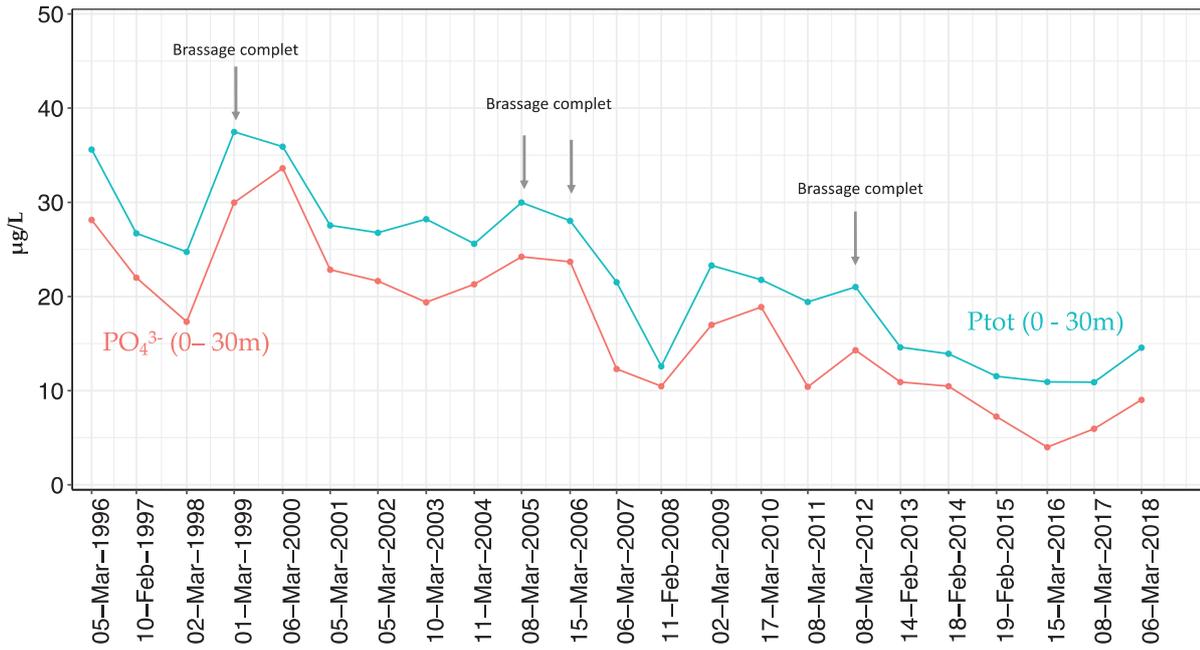


Figure 14 : Concentration moyenne pondérée en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) et phosphore total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2018 à l'issue du brassage hivernal, Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 14 : Weighted average concentration of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) and total phosphorus in the lake's water surface layer of 0 - 30m from 1996 to 2018 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 06 mars 2018, est de 580 $\mu\text{gN/L}$ entre 0-30m, soit inférieur à l'année 2017 avec environ 610 $\mu\text{gN/L}$ (figure 15). Elle atteint 600 $\mu\text{gN/L}$ le 23 janvier 2018, soit une concentration du même ordre de grandeur par rapport à l'année 2017. 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 12 septembre 2018 avec 110 $\mu\text{gN/L}$ à 0 et 2.5m de la surface du lac. La consommation ralentit dès le mois d'octobre et commence à s'accroître pour atteindre une concentration moyenne en azote nitrique entre 0m et 30m de 540 $\mu\text{gN/L}$ en décembre 2018.

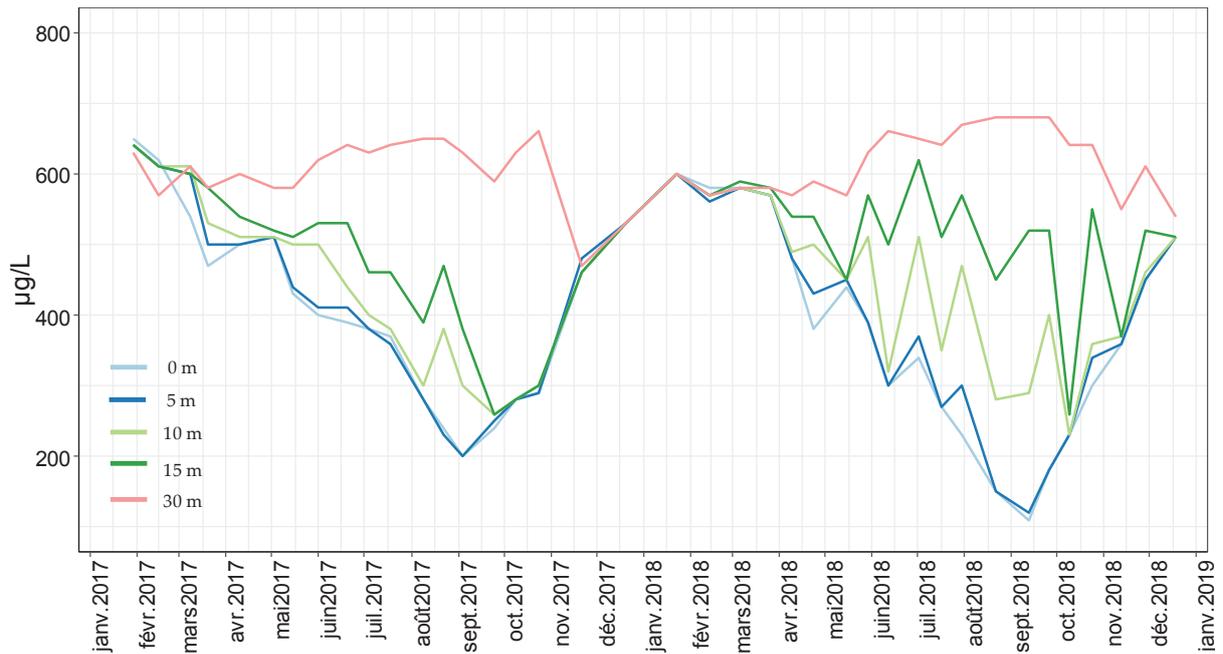


Figure 15 : Concentration en azote nitrique (N-NO_3^-) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 15 : Concentration of nitrate (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 2018. On observe une relative stabilité de la teneur d'azote sur cette chronique. La concentration d'azote total et d'azote nitrique au 06 mars 2018 sont respectivement de 667 $\mu\text{gN/L}$ soit du même ordre de grandeur que celle de l'année 2017 et de 581 $\mu\text{gN/L}$, inférieur à l'année 2017.

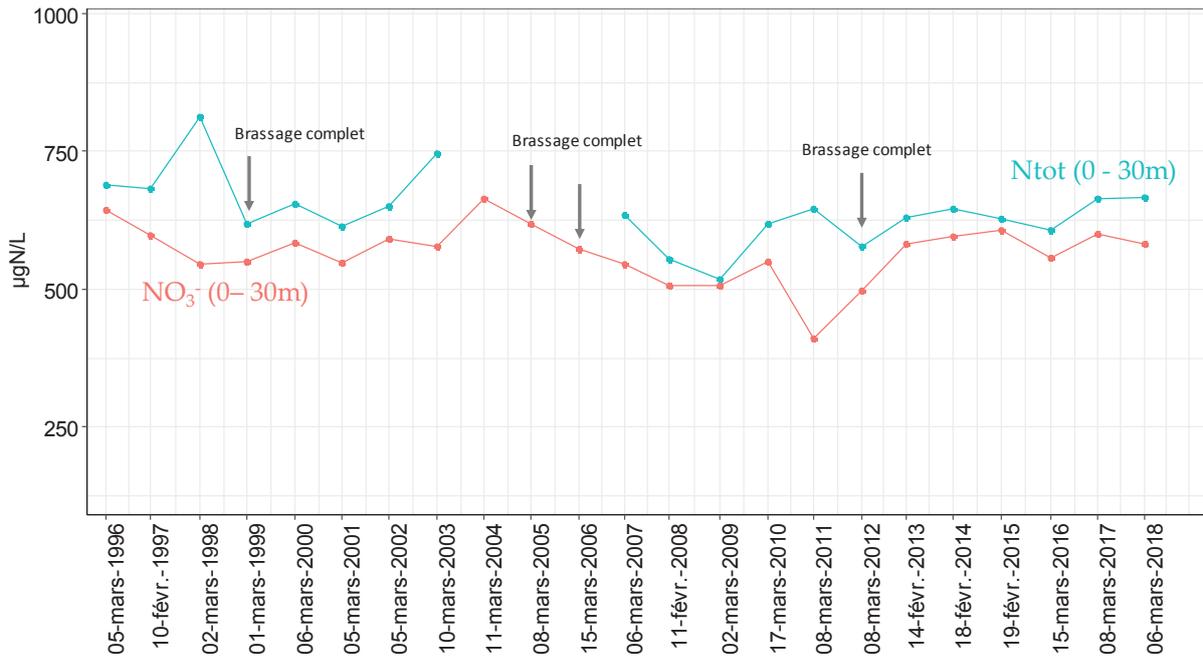


Figure 16 : Concentration moyenne pondérée en azote nitrique (NO_3^-) et azote total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2018 à l'issue du brassage hivernal, Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 16 : Weighted average concentration of nitrate (NO_3^-) and total nitrogen in the lake's water surface layer of 0 - 30m from 1996 to 2018 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, 2019). 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 2018, excepté le pic de $41 \mu\text{gN.L}^{-1}$ à 15 m le 15 mai 2017. En 2018, la valeur maximale était de $30 \mu\text{gN.L}^{-1}$ à 10 m le 12 septembre 2018 (figure 17). Ceci est à corréliser avec une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (RIMET, 2019).

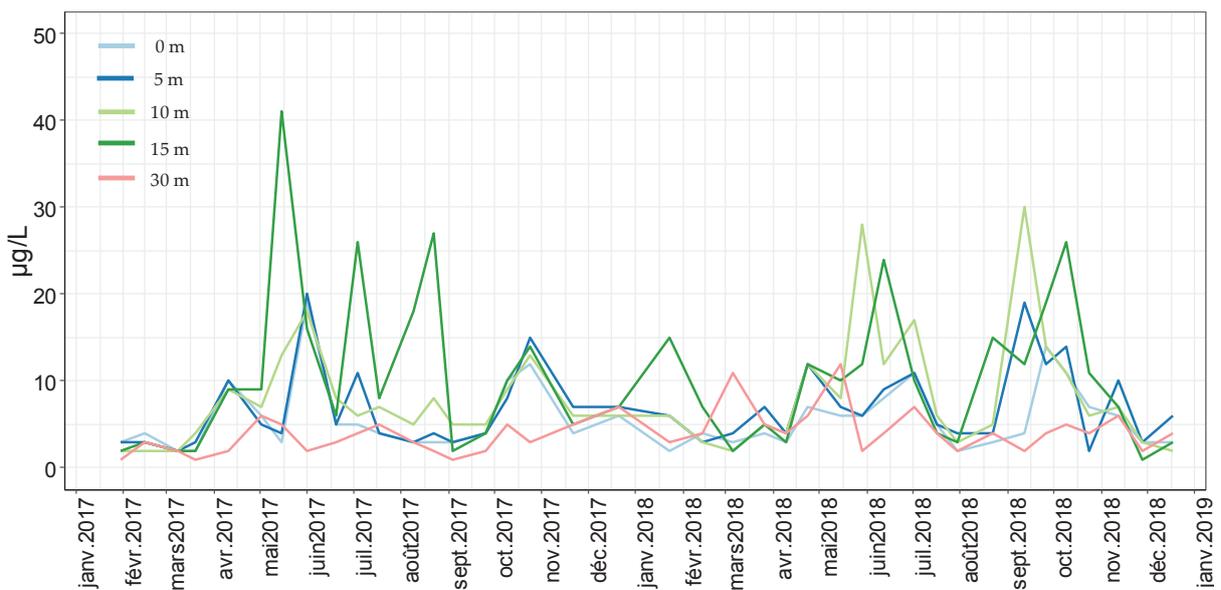


Figure 17 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH_4^+) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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 1.35 mgSiO₂/L à l'issue du brassage hivernal le 06mars 2018. La concentration moyenne annuelle en 2018 est de 0.95mgSiO₂/L, soit supérieure de 0.30mgSiO₂/L par rapport à l'année 2017. Cet enrichissement constitue une source nutritive importante pour les algues diatomées (RIMET, ce rapport). La concentration en silice diminue progressivement à l'issue du brassage partiel pour atteindre une valeur de 0.59 mgSiO₂/L le 12 juin 2018. La silice continue à rester faible entre juin et septembre 2018. Elle atteint une valeur minimale de 0.49 mgSiO₂/L le 09 octobre 2018. A partir du mois de novembre 2018, 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.

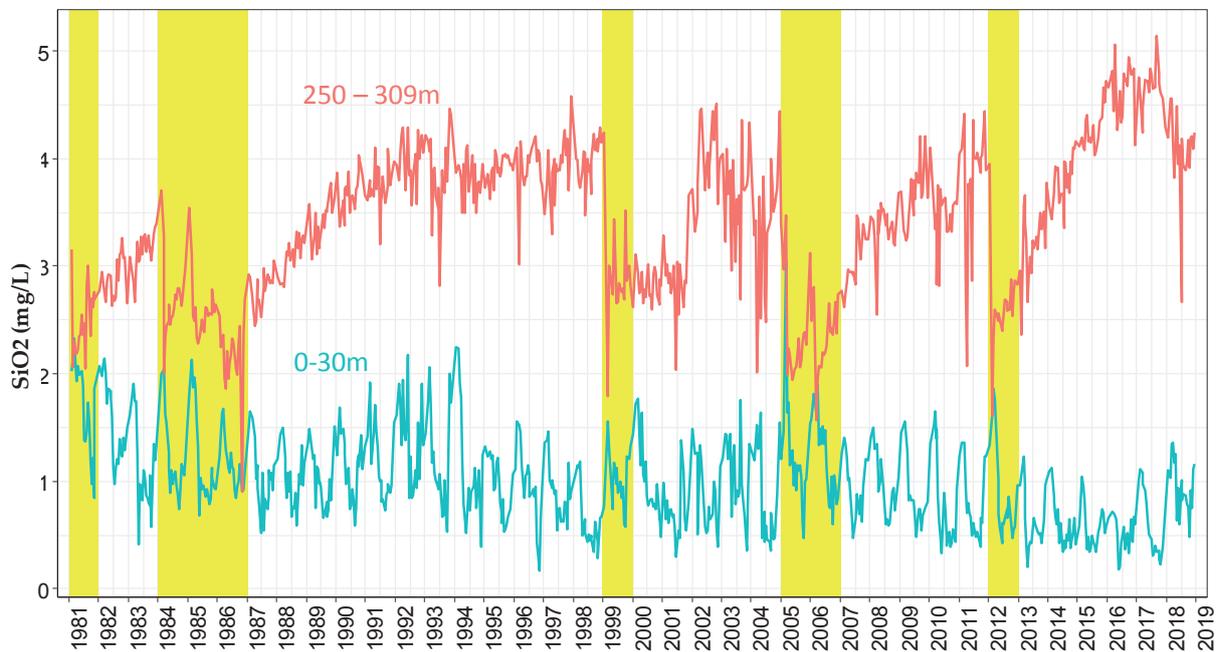


Figure 18 : Concentration moyenne pondérée en silice (SiO₂) dans les couches superficielles (0 - 30 m) et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 18 : Concentration of silica (SiO₂) 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 à partir du mois d'avril 2018. Cette activité phytoplanctonique printanière engendre une sursaturation en oxygène à la surface qui peut atteindre une valeur moyenne entre 0-30m de 11.3mgO₂/L le 09/04/2018.

La concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles continue à augmenter pour atteindre la valeur moyenne maximale de 12.4 mgO₂/L le 23 avril 2018. Après cette date, la concentration en oxygène dans la couche 0-30m diminue progressivement à cause de la baisse de l'activité photosynthétique et atteint une valeur de 9.8mgO₂/L le 28 mai 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. A partir de l'automne, l'enfoncement de la thermocline se met en place. Cependant, l'évolution de cet enfoncement de thermocline n'est pas continue en raison de la température de l'air particulièrement élevée de l'année 2018 qui réchauffe la couche d'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 5.7 mgO₂/L en 2018 contre 6.32 mgO₂/L en octobre 2017.

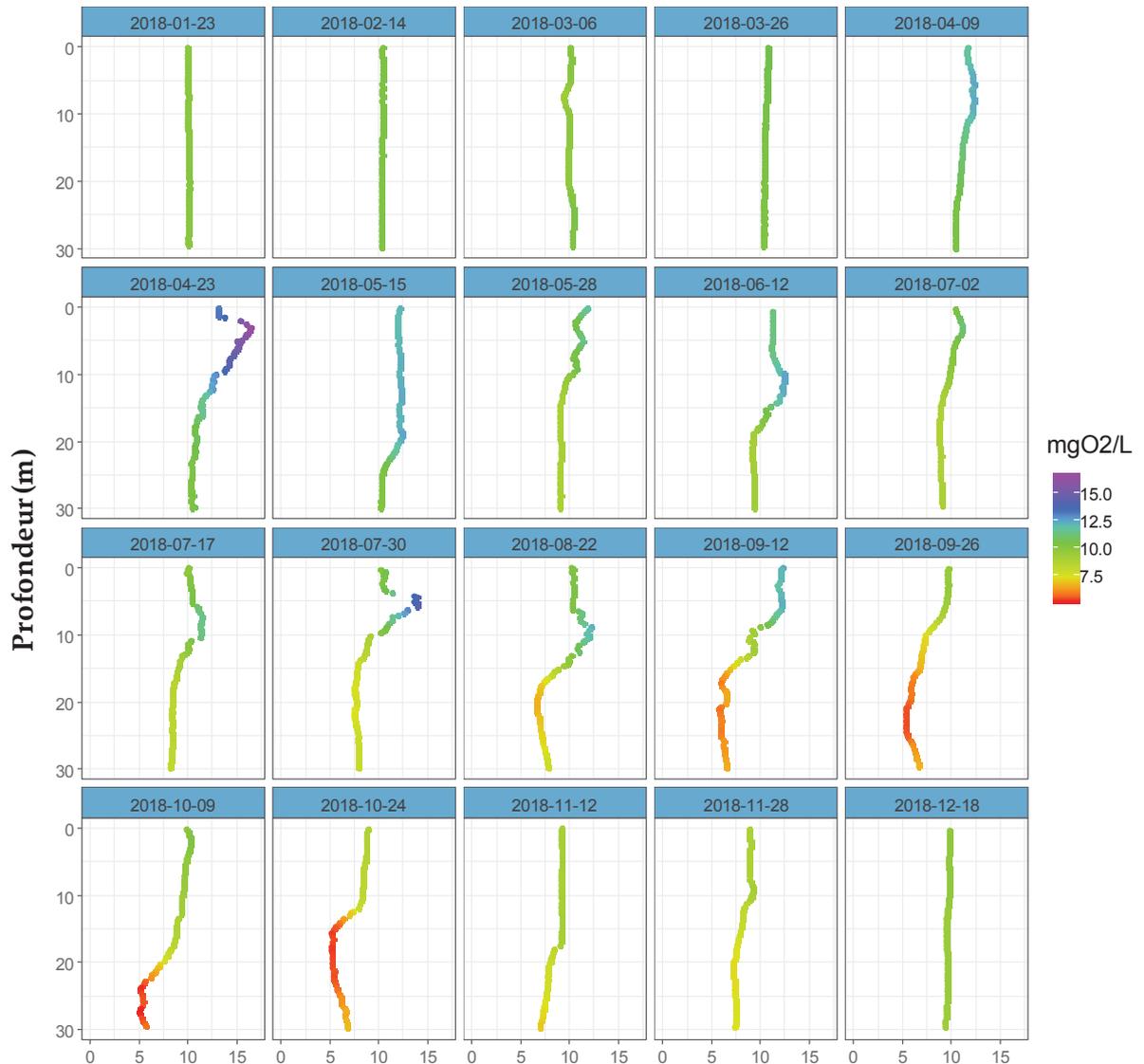


Figure 19 : Concentration en oxygène dissous entre 0 et 30m de la colonne d'eau du lac , Léman - Grand Lac (SHL2).

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 2018 est représentée sur la figure 20. En hiver la transparence maximale mesurée atteint 12m le 06 mars, soit une profondeur inférieure à celle relevée en hiver 2017 (15.5 m le 15 février 2017).

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 3.1m le 28 mai 2018. La transparence varie entre 3.1 et 6.8 m de mai à juin pendant la phase où le phytoplancton printanier est le plus abondant et essentiellement constitué de Diatomées, Chlorophycées, Chrysophycées et Zygothécées (RIMET, ce rapport).

On observe ensuite un pic de transparence à 7.2 m le 30 juillet 2018 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, 2019).

La transparence diminuera de nouveau les semaines suivantes après l'apparition du deuxième pic de biomasse de l'année 2018 qui s'étend de mi-août à mi-septembre 2018, 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 10.9 m le 18 décembre 2018.

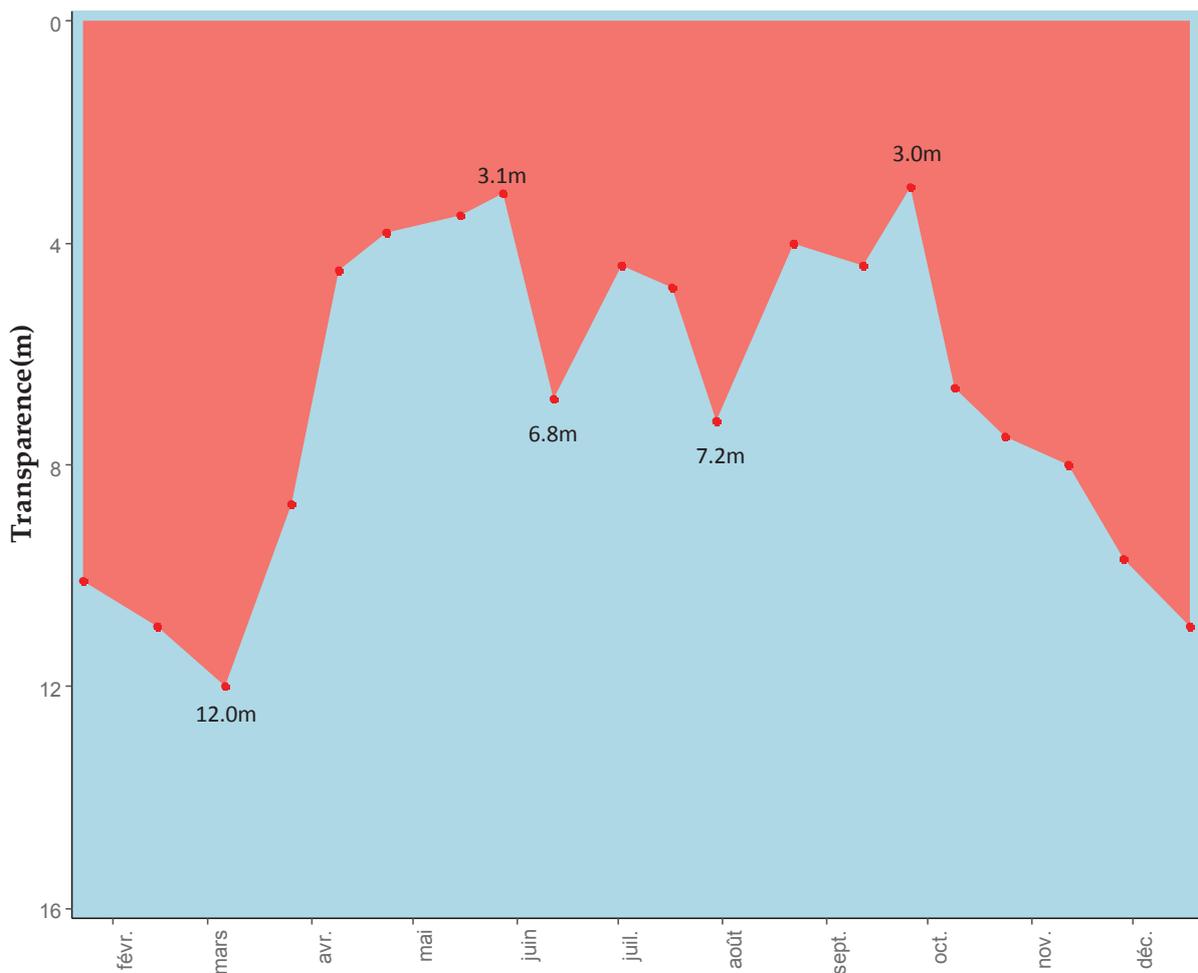


Figure 20 : Transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2).

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 reprise printanière de l’activité phytoplanctonique et la période où la transparence est de nouveau importante durant les 20 dernières années (1997 à 2018). La reprise de l’activité phytoplanctonique printanière s’opère à la même période que les années précédentes vers mi-avril et la croissance printanière s’étend jusqu’à la troisième semaine du mois de juin 2018.

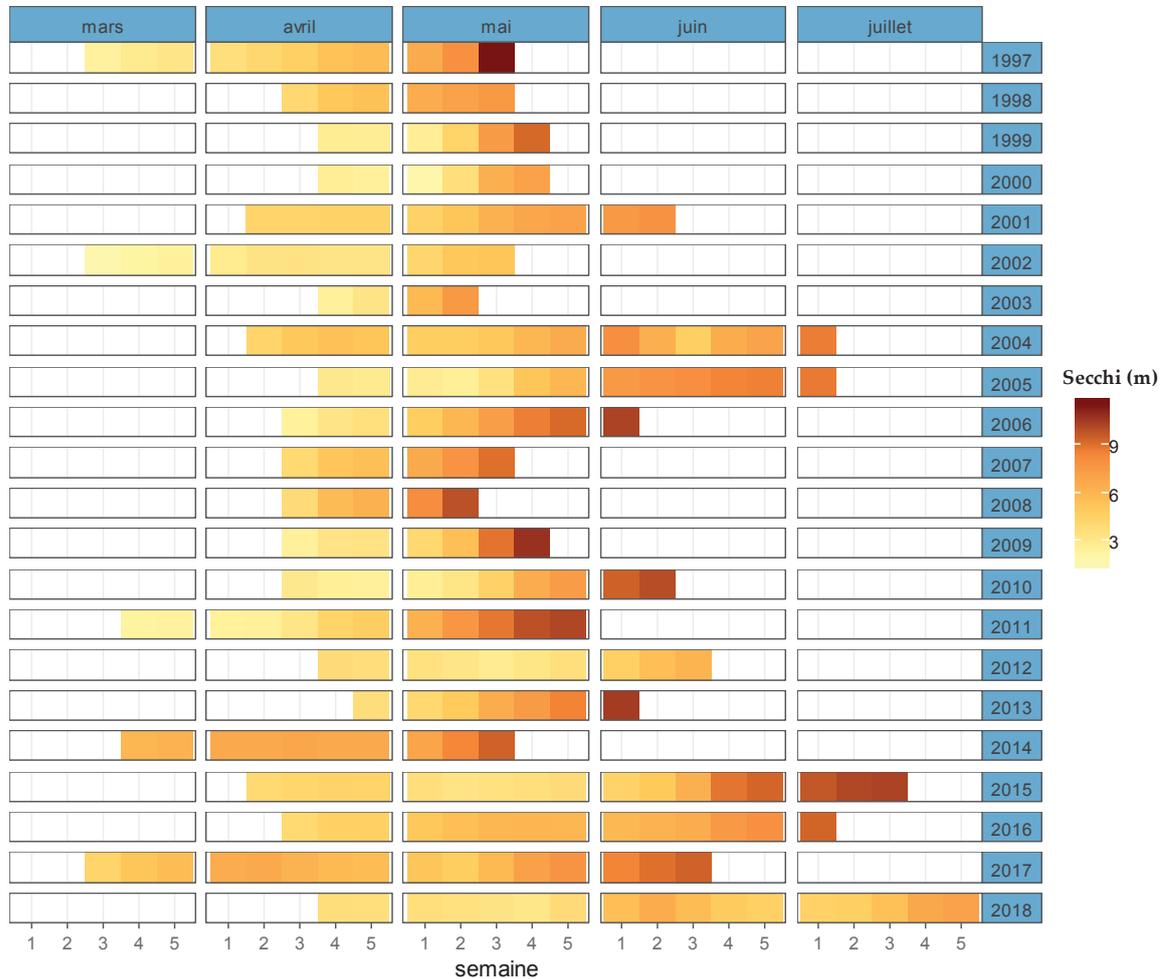


Figure 21 : Début de la reprise de l’activité phytoplanctonique à la période des phases des eaux claires de 1997 à 2018, Léman –Grand Lac (SHL2).

Figure 21 : Beginning of the recovery of phytoplankton activity to period of clear water phases from 1997 to 2018, 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 du début d’avril à la fin de juin 2018 avec une valeur maximale de 558 $\mu\text{gC/L}$ à 0m, soit supérieure à la valeur maximale observée de 404 $\mu\text{gC/L}$ à 5m en 2017. Le deuxième pic plus marqué de carbone organique particulaire s’étend de mi-juillet à mi-octobre, et est signalé par un maximum le 22 août 2018, avec 514 $\mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$. Pour l’année 2018, les deux pics de carbone organique particulaire observés correspondent aux périodes où l’activité phytoplanctonique est importante (RIMET, 2019).

Le premier pic printanier le 15 mai 2018 est observé avec une valeur de carbone organique particulaire de 558 $\mu\text{gC/L}$ à la surface et correspond à une baisse significative de la transparence à 3.5m (Figure 22). Le deuxième pic dit « automnal » apparaît le 12 septembre 2018 avec une valeur de 514 $\mu\text{gC/L}$, et correspond à l'apparition de nouvelles communautés d'algues qui remplacent les diatomées.

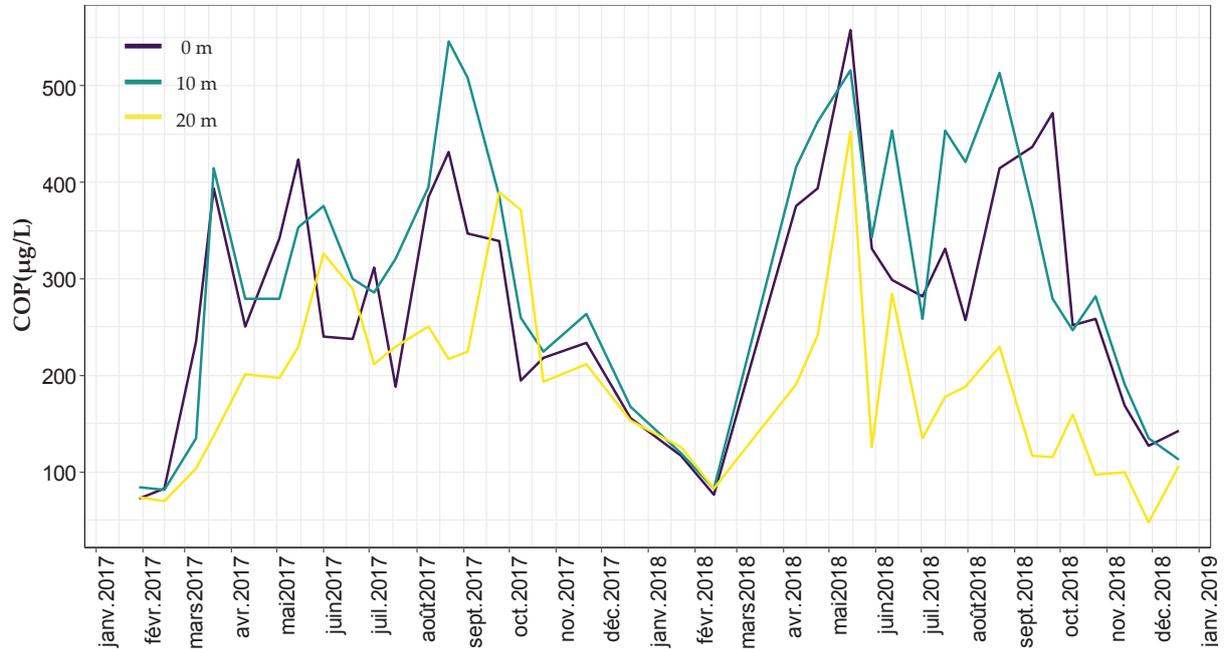


Figure 22 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches superficielles (0, 10 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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 et l'azote organique particulaire sont du même ordre de grandeur que l'année 2017. Le phosphore particulaire est plus important que les deux dernières années 2016 et 2017.

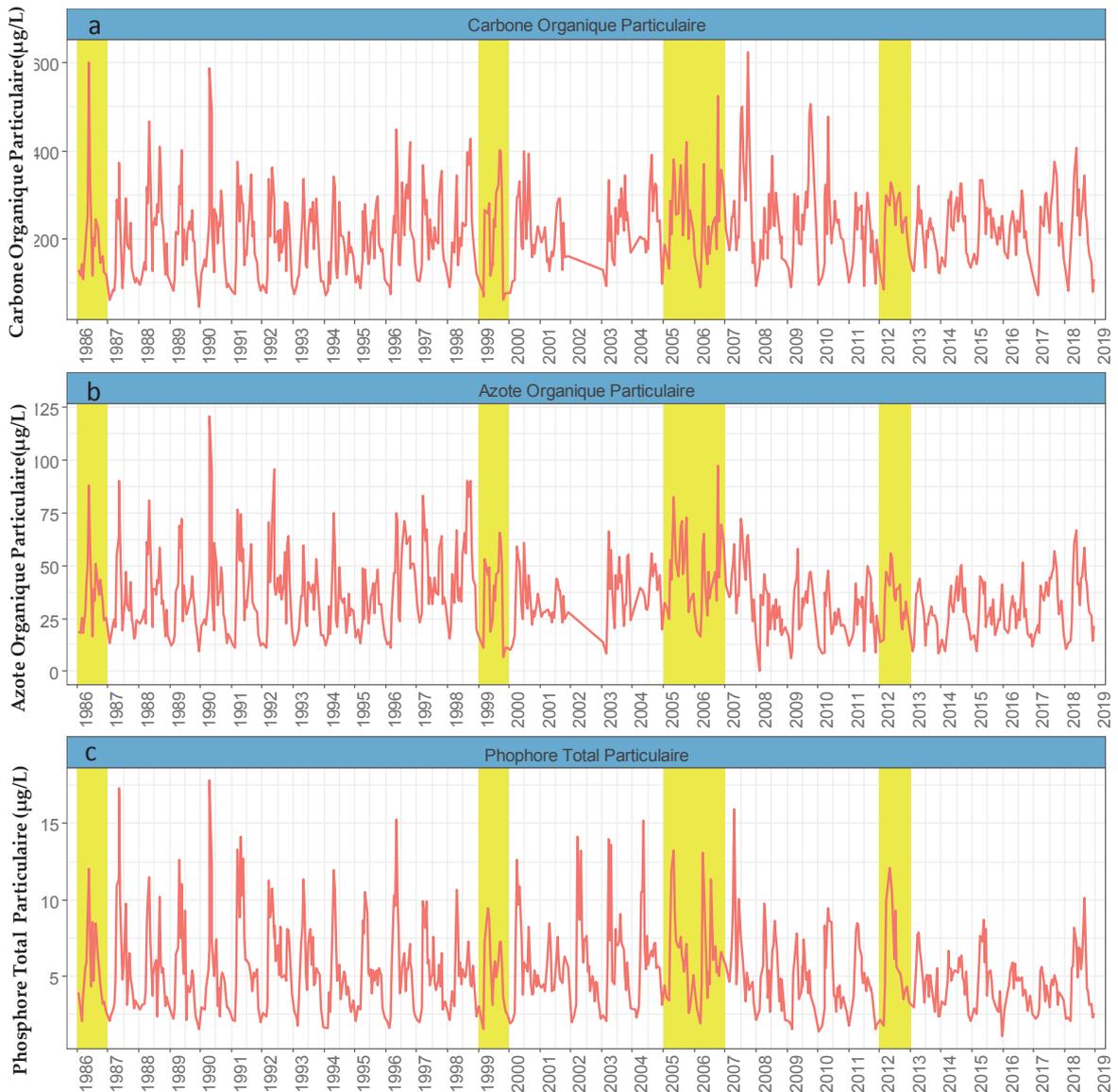


Figure 23 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- 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 2018, 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 2018 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 2018 indique une carence en phosphore. Cependant, elle est moins importante qu'en 2017. Ceci s'explique par l'augmentation des concentrations en phosphore total et phosphore soluble réactif.

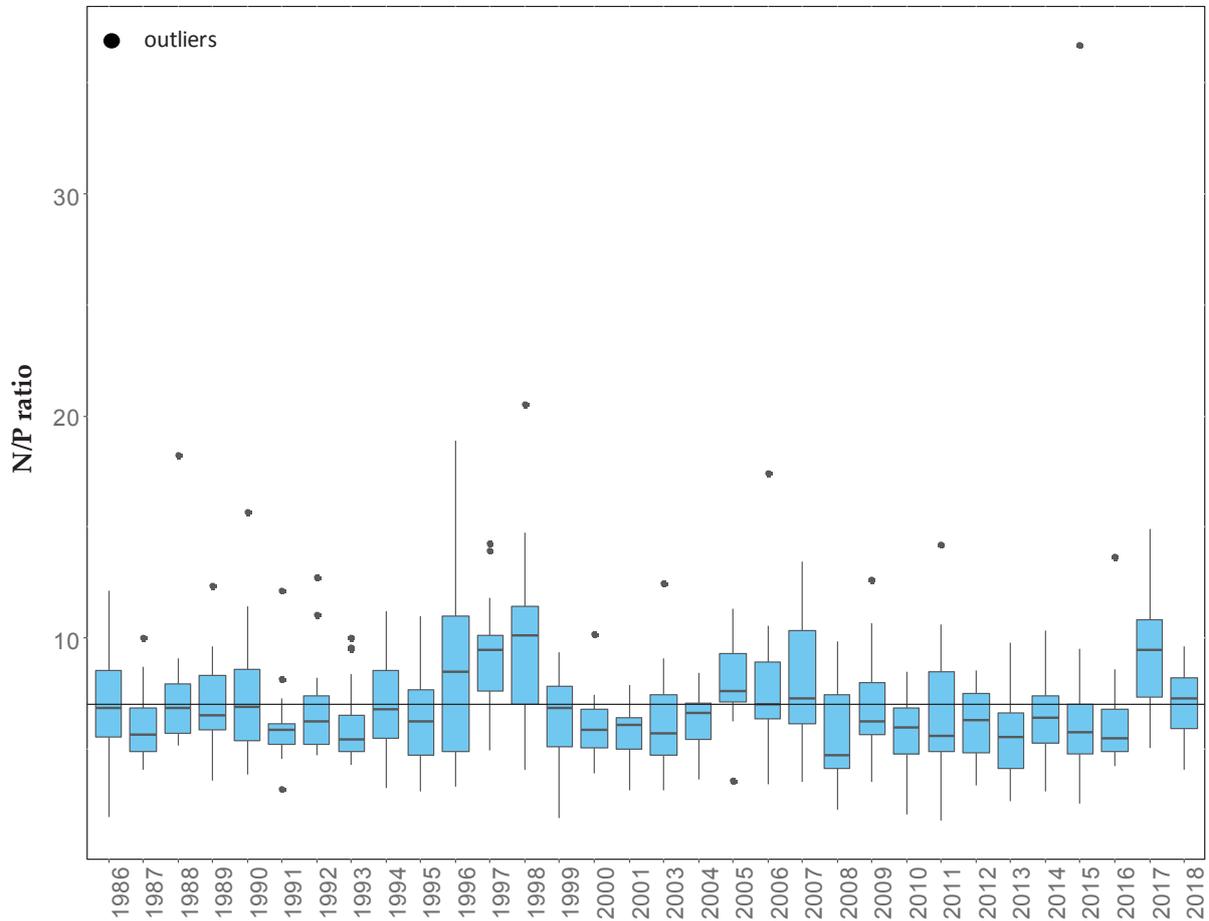


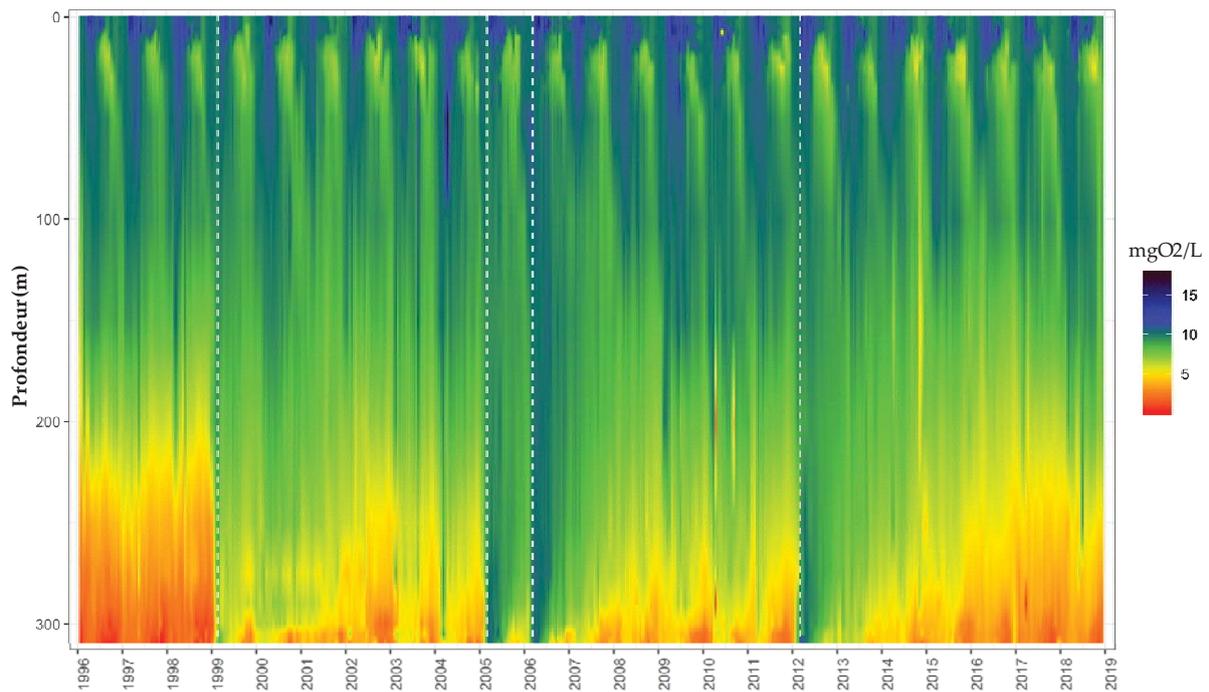
Figure 24 : Evolution du rapport NOP / Ppart dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in PON / Ppart ratio in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1986 to 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

6. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

Le brassage partiel hivernal 2018 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 06 mars 2018, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à 3.52 mgO₂/L, soit inférieure à 4 mgO₂/L qui est la valeur minimum relative aux exigences sur la qualité des eaux en Suisse. Cette concentration reste inférieure au seuil de 4 mgO₂/L tout au long de l'année 2018.

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.



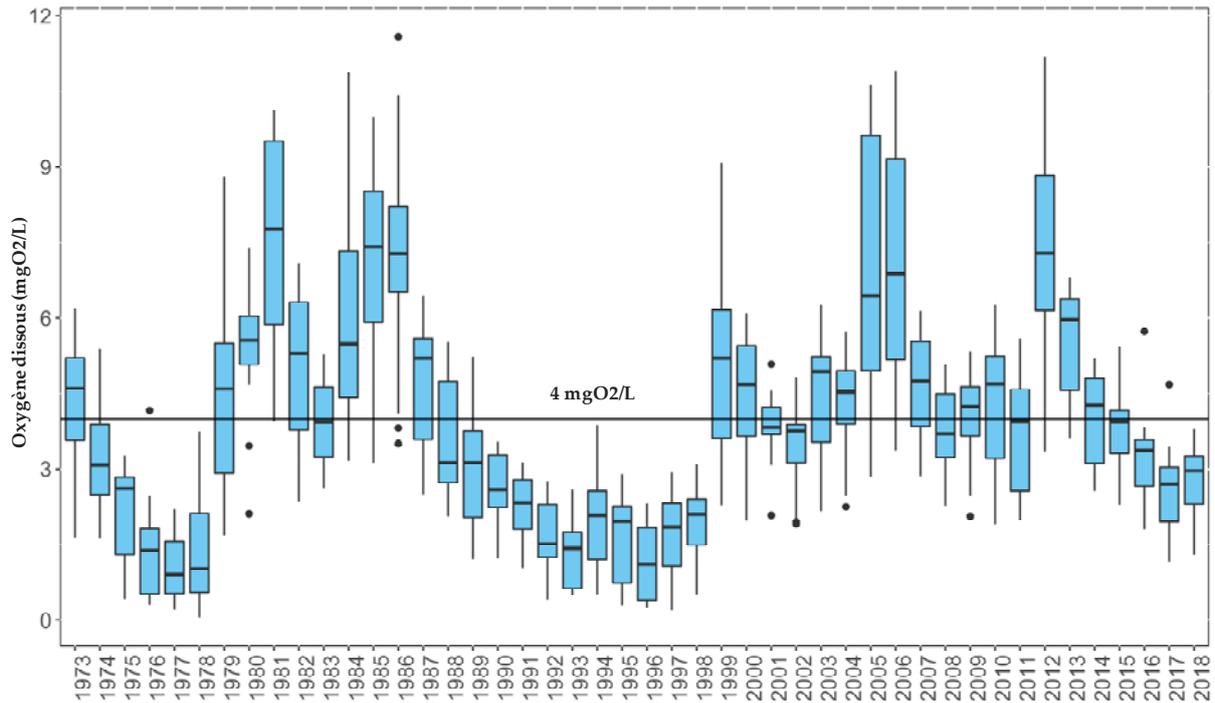
* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 25 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau du lac de 1996 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 25 : Change in the concentration of dissolved oxygen in lake's water column from 1996 to 2018, 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 mgO₂·L⁻¹ ; 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 termes d'oxygène dissous pour le lac. A cause de l'absence de brassage complet depuis 2012, l'oxygène est de nouveau inférieur au seuil de 4mgO₂·L⁻¹ pour les trois années successives 2016, 2017 et 2018.

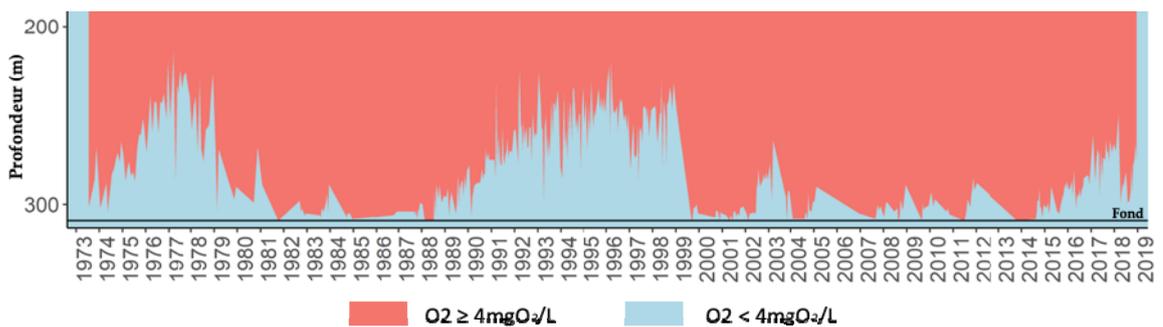


* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 26 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 26 : Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2018, 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 1973 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 2018, la couche d'eau « désoxygénée » ($< 4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$), est de plus en plus importante depuis 2014.



* 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 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 27 : Change in threshold's depth at 4 mg of dissolved oxygen per liter from 1973 to 2018, 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. Une diminution de la concentration en oxygène dissous pourrait engendrer une augmentation en phosphore soluble réactif.

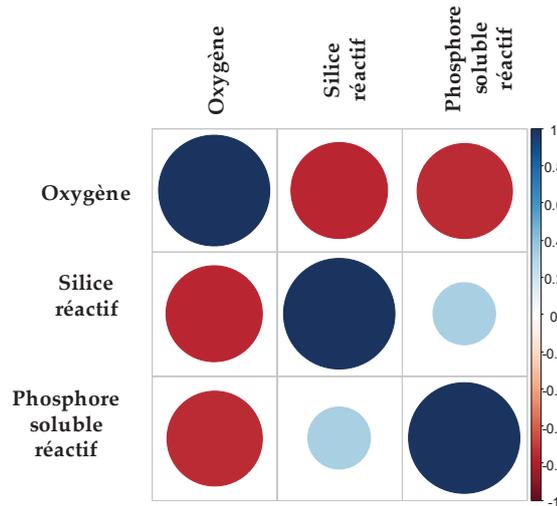


Figure 28 : Corrélation de l'oxygène dissous avec la silice réactif et le phosphore soluble réactif à 309m de 1996 à 2018.

Figure 28 : Correlation of dissolved oxygen and reactive silica and soluble reactive phosphorus at 309m from 1996 to 2018.

7. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

7.1 PHOSPHORE RÉACTIF SOLUBLE ET PHOSPHORE TOTAL

La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total est de 19.90 µgP/L en 2018, soit une augmentation de 2.15 µgP/L par rapport à l'année 2017 (figure 29). Cette augmentation est à la limite de la significativité ($p = 0.052$) car induite par des concentrations élevées mesurées de façon ponctuelle en période estivale.

La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif (orthophosphate) est de 14.49 µgP/L en 2018, soit une différence de 0.29 µgP/L par rapport à l'année 2017 (Figure 29). Néanmoins, cette diminution n'est pas statistiquement significative ($p > 0.05$).

Le phosphore particulaire est plus élevé qu'en 2018 dans toute la colonne d'eau tandis que l'orthophosphate est plus élevé dans les couches superficielles et plus faible dans les couches profondes (figure 30 et 31). La concentration moyenne annuelle du phosphore particulaire dans les couches superficielles est de 7.27 µgP/L en 2018, soit supérieure à 5.75 µgP/L en 2017 et 5.09 µgP/L en 2016. La valeur du phosphore particulaire dans les couches profondes est de 7.19 µgP/L en 2018, soit supérieure à 1.94 µgP/L en 2017 et 1.64 µgP/L en 2016.

L'augmentation du phosphore total est donc liée à l'augmentation du phosphore particulaire et pourrait s'expliquer par les hypothèses suivantes :

Faible perte de la biomasse phytoplanctonique par un broutage exceptionnellement réduit : l'année 2018 réunit toutes les conditions propices pour le développement phytoplanctonique (température élevée toute au long de l'année, charge de nutriments plus importante à l'issue du brassage et un ensoleillement important) et l'abondance en zooplancton est à son plus bas niveau observé depuis les années 80. La pression de prédation par le zooplancton serait donc relativement faible et la biomasse phytoplanctonique se serait accumulée comme en témoigne les concentrations en phosphore particulaire qui sont plus élevées que l'année précédente dans la strate correspondant à la zone euphotique.

Apport accru par les affluents : les apports des affluents peuvent avoir un effet double pour la concentration du phosphore dans le lac. D'une part, le Rhône amont présente un fort apport en phosphore total, essentiellement en phosphore particulaire en 2018 (Sabarathnam et Oriez., 2019) qui en période stratifiée, pourrait enrichir le méta et hypolimnion. D'autre part, les apports des affluents peuvent également enrichir le lac en orthophosphates. Ces apports en phosphore soluble constituent une charge supplémentaire de nutriments pour le développement du phytoplancton. Par ailleurs, la sédimentation de la biomasse phytoplanctonique non consommée par le zooplancton, entrainerait également un enrichissement en phosphore particulaire dans les couches profondes.

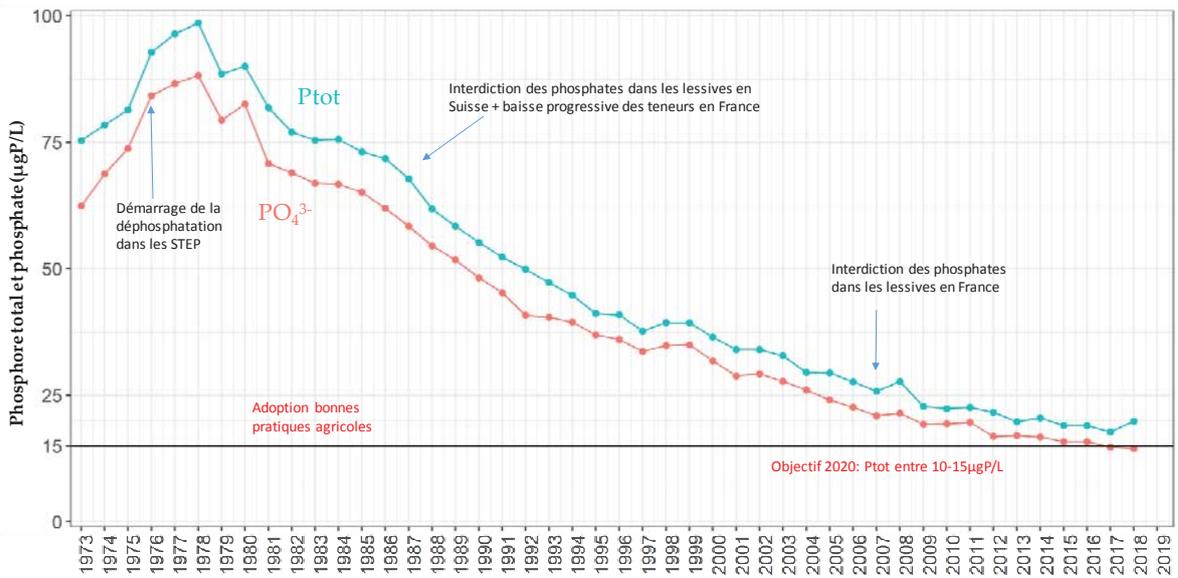


Figure 29 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée de phosphore réactif soluble et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

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 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

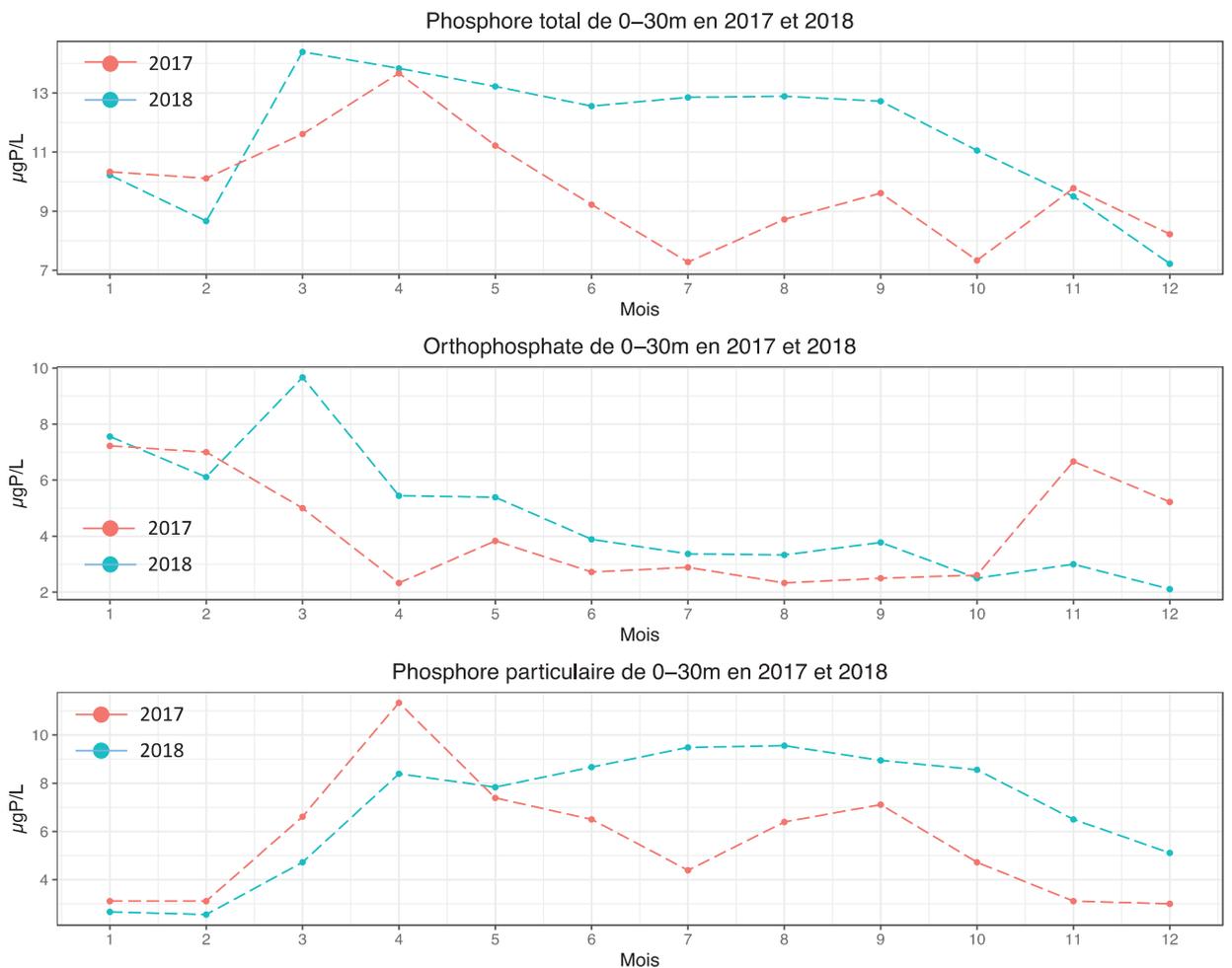


Figure 30 Evolution de la concentration moyenne mensuelle de phosphore total, de phosphore réactif soluble et de phosphore particulaire entre 0 – 30m en 2017 et 2018, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 30 Change in monthly average of total phosphorus, soluble reactive phosphorus and particulate phosphorus concentration between 0 – 30m in 2017 and 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

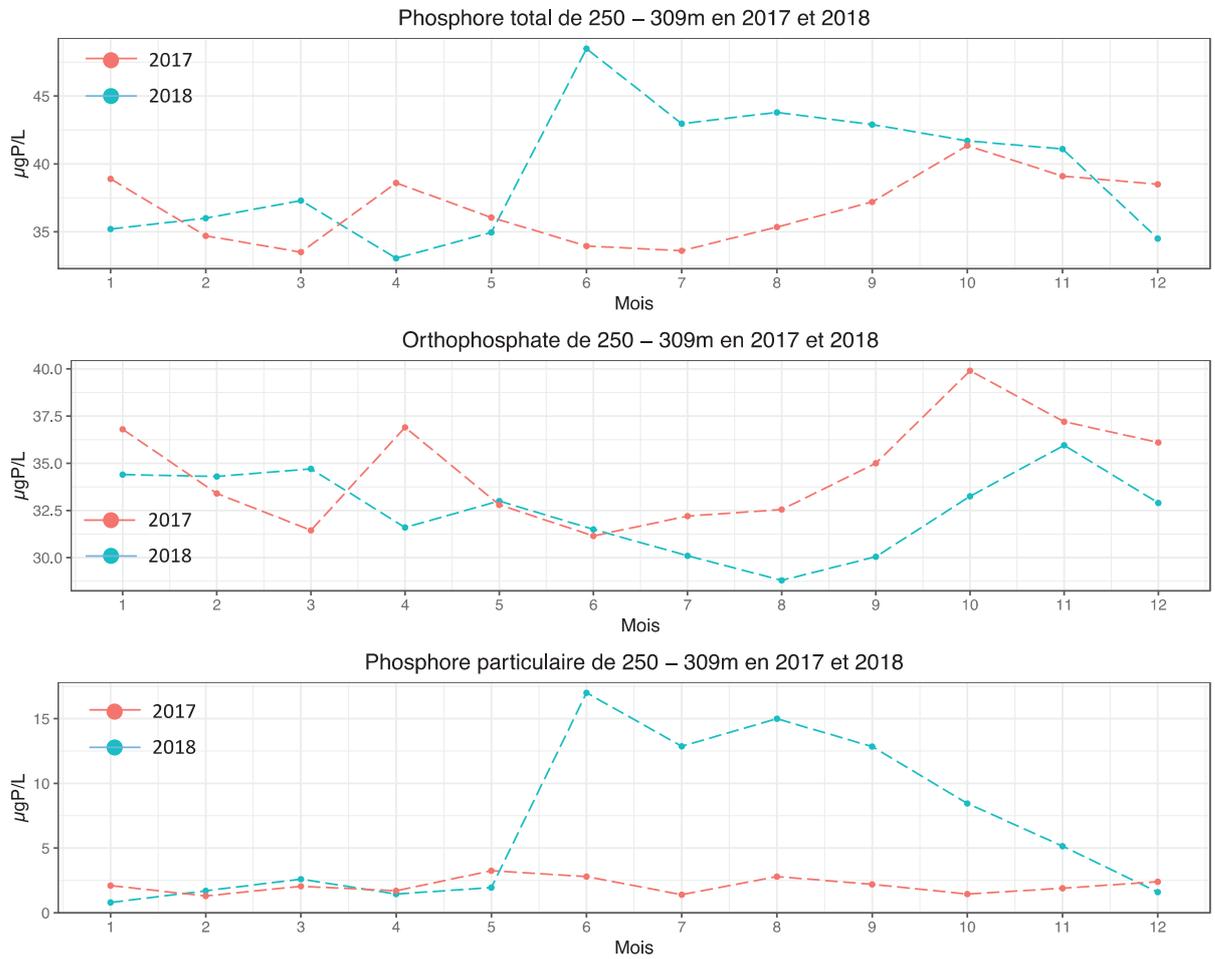


Figure 31 Evolution de la concentration moyenne mensuelle de phosphore total, de phosphore réactif soluble et de phosphore particulaire entre 250 – 309m en 2017 et 2018, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 31 Change in monthly average of total phosphorus, soluble reactive phosphorus and particulate phosphorus concentration between 250 – 309m in 2017 and 2018, 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 2018, la concentration moyenne en azote total est de 0.67 mgN/L. La concentration moyenne annuelle en azote nitrique, quant à elle, est égale à 0.70mgN/L (Figure 32). Cette teneur en nitrates d'environ 0.69 mgN·L⁻¹ dans les eaux du Léman, soit 3.07 mgNO₃⁻·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 mgNO₃⁻·L⁻¹ et en France, une limite de qualité qui est de 50 mgNO₃⁻·L⁻¹.

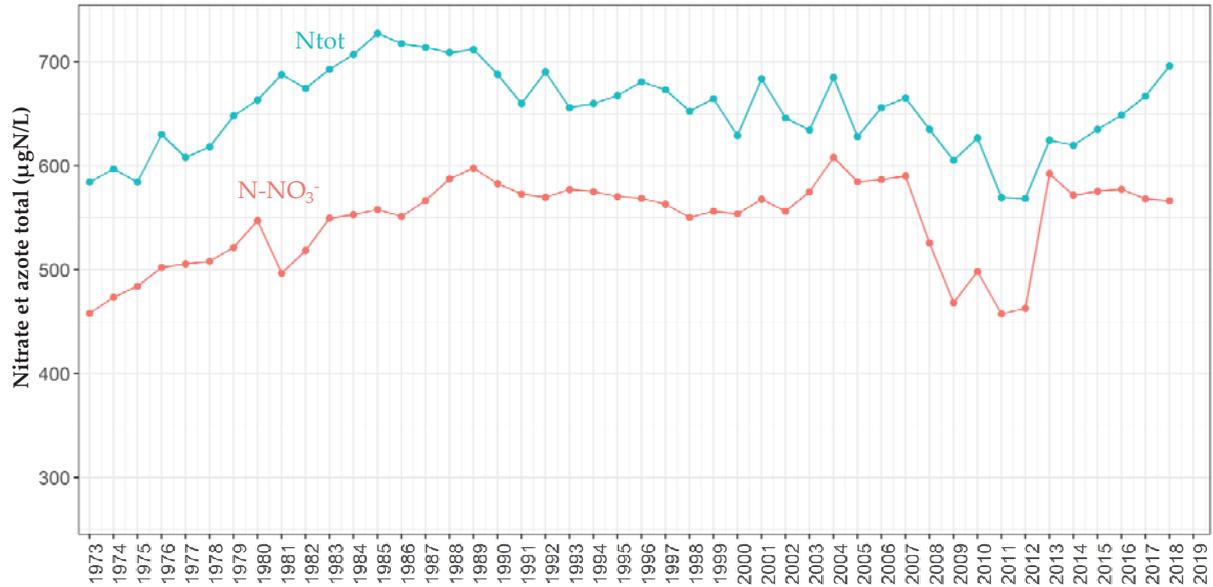


Figure 32 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 32 : Change in the weighted mean annual total concentration of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1973 to 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

7.3 CHLORURE

La concentration des ions chlorures dans le Léman est en constante augmentation de 1973 à 2016. Les valeurs en 2017 et 2018 sont comparables à celle de 2016 (Figure 33). En 2017, le stock de chlorure est égal à 891'953 tonnes soit une teneur moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.37 mgCl⁻ /L contre 891'952 tonnes et 10.31 mg Cl⁻/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). La stabilisation des concentrations en Cl⁻ observée en 2017 et 2018 reste à confirmer par le prochain suivi de 2019.

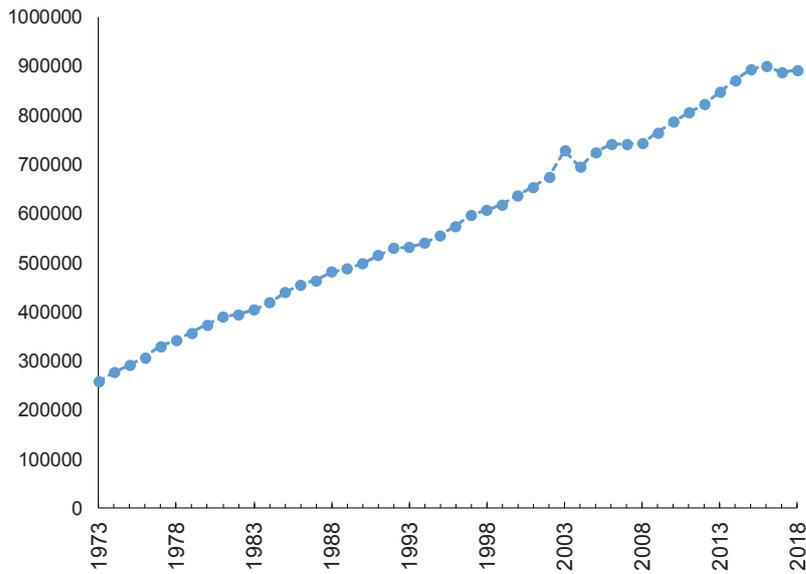


Figure 33 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 33 : Change in the weighted mean annual concentration and stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

8. CONCLUSIONS

L'année 2018 est enregistrée comme l'année la plus chaude dans la chronique de référence 1981-2010. La température moyenne annuelle de l'air inter-stations est de 12.3 °C. Les températures moyennes mensuelles sont supérieures à la normale 1981-2010 tout au long de l'année 2018, excepté pour les mois de février et mars. L'année 2018 est normalement venteuse, bien ensoleillée et avec une pluviométrie qui présente un déficit de 9.1 % par rapport à la moyenne 1981-2010

Les faits marquants de l'évolution physico-chimique des eaux du Léman en 2018 sont les suivants :

- L'hiver 2018 n'a pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. La profondeur du brassage hivernal est observée à 201 m. Par conséquent, le brassage partiel réduit la réoxygénation des couches d'eau profondes du Léman et la redistribution des nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau ;
- Les concentrations en oxygène dissous à 309m de l'année 2018 restent en dessous de 4mgO₂/L tout au long de l'année 2018.
- L'activité phytoplanctonique est importante au mois d'avril et de septembre 2018. La concentration moyenne annuelle en chlorophylle-a entre 0-30m est la plus élevée depuis 2008.
- Les concentrations moyennes en phosphore total mesurées en période estivale augmentent considérablement par rapport à l'année 2017 et présentent une valeur moyenne annuelle pondérée de 19.90 µgP/L. Cette augmentation de la moyenne annuelle, à la limite de la significativité statistique, est induite par des concentrations en phosphore particulières élevées sur toute la colonne d'eau en période estivale. La concentration moyenne annuelle en phosphore soluble réactif (14.49 µgP.L⁻¹) est comparable à celle mesurée en 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- ANNEVILLE, O., LAINE, L. (2019) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2018.
- 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.
- TRAN KHAC, V., QUETIN, P. et ANNEVILLE, O. (2019) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman (éléments majeurs) et données météorologiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2018.
- 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. (2019) : Biomasse chlorophyllienne et production primaire dans le Léman, Comm. int. prot. Eaux Léman contre pollut. Campagne 2018, 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. (2019) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2018.
- 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.

ANNEXE I

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

$$C_{moyennepondérée} = \frac{\sum Ci * Vi}{\sum Vi}$$

Avec :

Ci : Concentration obtenue des mesures ou analyses du laboratoire à la profondeur d'échantillonnage

Vi : 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) | Année | Niveau (m) | Volume (km3) | Année | Niveau (m) | Volume (km3) |
|---------------|------------------|------------|--------------|--------------------|------------|--------------|-----------|------------|--------------|
| Grand Lac | 1957 - mars 1976 | 0 | 1.2388 | dès 04.1976 - 1980 | 0 | 1.2388 | 1990-1981 | 0.0 | 0.6200 |
| | | 5 | 1.8516 | | 5 | 1.8516 | | 2.5 | 1.2376 |
| | | 10 | 1.2279 | | 10 | 1.2279 | | 5.0 | 1.2328 |
| | | 20 | 1.8310 | | 20 | 1.8310 | | 7.5 | 1.2279 |
| | | 30 | 2.4268 | | 30 | 2.4268 | | 10.0 | 1.8310 |
| | | 40 | 3.5583 | | 40 | 3.5583 | | 15.0 | 2.4268 |
| | | 50 | 6.7501 | | 50 | 6.7501 | | 20.0 | 3.5583 |
| | | 100 | 14.2477 | | 100 | 14.2477 | | 30.0 | 6.7501 |
| | | 150 | 16.5454 | | 150 | 16.5454 | | 50.0 | 14.2477 |
| | | 200 | 20.0474 | | 200 | 14.0402 | | 100.0 | 23.5655 |
| | | 250 | 13.3846 | | 225 | 12.0143 | | 200.0 | 19.0344 |
| | | 300 | 2.5840 | | 250 | 6.0745 | | 250.0 | 6.0745 |
| | | | | | 275 | 2.6058 | | 275.0 | 1.6991 |
| | | | | | 309 | 1.2811 | | 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 | | | | |

| Partie du lac | Année | Niveau (m) | Volume (km3) | Année | Niveau (m) | Volume (km3) | Année | Niveau (m) | Volume (km3) |
|---------------|-----------|------------|--------------|-----------|------------|--------------|----------|------------|--------------|
| Grand Lac | 1992-1991 | 0.0 | 0.6200 | 2001-1993 | 0 | 0.6200 | dès 2002 | 0 | 0.6200 |
| | | 2.5 | 1.2376 | | 2.5 | 1.2376 | | 2.5 | 1.2376 |
| | | 5.0 | 1.2328 | | 5 | 1.2328 | | 5 | 1.2328 |
| | | 7.5 | 1.2279 | | 7.5 | 1.2279 | | 7.5 | 1.2279 |
| | | 10.0 | 1.8310 | | 10 | 1.8310 | | 10 | 1.8310 |
| | | 15.0 | 2.4268 | | 15 | 2.4268 | | 15 | 2.4268 |
| | | 20.0 | 3.5583 | | 20 | 3.5583 | | 20 | 2.3722 |
| | | 30.0 | 6.7501 | | 30 | 6.7501 | | 25 | 2.3111 |
| | | 50.0 | 14.2477 | | 50 | 14.2477 | | 30 | 2.2500 |
| | | 100.0 | 16.5454 | | 100 | 16.5454 | | 35 | 4.3928 |
| | | 150.0 | 14.0402 | | 150 | 14.0402 | | 50 | 13.2300 |
| | | 200.0 | 12.0143 | | 200 | 12.0143 | | 100 | 16.5454 |
| | | 250.0 | 6.0745 | | 250 | 6.0745 | | 150 | 14.0402 |
| | | 275.0 | 1.6991 | | 275 | 2.1530 | | 200 | 12.0143 |
| | | 280.0 | 0.4539 | | 290 | 0.9769 | | 250 | 6.0745 |
| | | 285.0 | 0.4134 | | 300 | 0.4848 | | 275 | 2.1530 |
| | | 290.0 | 0.3821 | | 305 | 0.2451 | | 290 | 0.9769 |
| | | 295.0 | 0.3628 | | 309 | 0.0271 | | 300 | 0.4848 |
| | | 300.0 | 0.3034 | | | | | 305 | 0.2451 |
| | | 305.0 | 0.2451 | | | | | 309 | 0.0271 |
| 309.0 | 0.0271 | | | | | | | | |

ANNEXE II

Tableau 3 : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2018, 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 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). Calculation based on database extracted from SOERE OLA-IS according to ponderation coefficient in Annexe I.

| Année | Oxygène | Ptot | PO ₄ ³⁻ | Ntot | Σ Nmin | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | COP | NOP | Ppart | Transparence | Transparence |
|-------|--------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------|
| | mg·L ⁻¹ | µgP·L ⁻¹ | µgP·L ⁻¹ | µgN·L ⁻¹ | µgN·L ⁻¹ | µgN·L ⁻¹ | µgN·L ⁻¹ | mgCl·L ⁻¹ | µgC·L ⁻¹ | µgN·L ⁻¹ | µgP·L ⁻¹ | 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 ^b | 13.4 ^b | 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 |
| 2018 | 8.57 | 19.90 | 14.49 | 696.21 | 571.97 | 3.95 | 566.38 | 10.37 | 79.73 | 11.6 | 2.28 | 6.70 | 4.56 |

b : valeurs interpolées

ANNEXE III

Tableau 4 : Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2018, Léman - Grand Lac (SHL2).

Tableau 4 : Annual total content in metric tons from 1957 to 2018, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

| Année | Oxygène | Ptot | P-PO ₄ ³⁻ | Ntot | Nmin | N-NH ₄ ⁺ | N-NO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | 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 ^b | 173 | 1154 ^b |
| 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 |
| 2018 | 737418 | 1712 | 1246 | 59874 | 49189 | 340 | 48709 | 891953 | 6857 | 196 | 995 |

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 ⁻¹ | 1.8 |
| χ | S·cm ⁻¹ | 1.1 |
| NO ₃ ⁻ | µgN·L ⁻¹ | 5.1 |
| NH ₄ ⁺ | µgN·L ⁻¹ | 11.2 |
| Ntot | µgN·L ⁻¹ | 10.9 |
| NOP | µgN·L ⁻¹ | 6.0 |
| PO ₄ ³⁻ | µgP·L ⁻¹ | 6.2 |
| Ptot | µgP·L ⁻¹ | 8.4 |
| Ppart | µgP·L ⁻¹ | 8.0 |
| COP | µgC·L ⁻¹ | 3.0 |
| Cl ⁻ | mgCl ⁻ ·L ⁻¹ | 4.4 |
| SiO ₂ | mgSiO ₂ ·L ⁻¹ | 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 V

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, l'insolation, le rayonnement global, le vent et la Rose des vents à Changins (calculée par Météo Suisse). 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 2018, le mois de février qui fut relativement frais et dans une moindre mesure celui de mars, le reste de l'année 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 2018 (°C).

Table 1.1 : Mean monthly air temperature for each station in 2018 (°C).

| | Genève | Changins | Pully | Thonon | inter-stations 1981 - 2010 |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Janvier | 6 | 5.4 | 5.8 | 6.4 | 2.1 |
| Février | 1.2 | 0.8 | 0.9 | 1.9 | 2.8 |
| Mars | 5.3 | 4.9 | 5.2 | 5.8 | 6.4 |
| Avril | 13.3 | 12.9 | 13.6 | 13.2 | 9.8 |
| Mai | 15.5 | 15.3 | 15.5 | 15.5 | 14.2 |
| Juin | 19.7 | 19.5 | 19.6 | 19.7 | 17.7 |
| Juillet | 22.3 | 22.1 | 22.4 | 22.4 | 20.2 |
| Août | 21.7 | 21.5 | 22.0 | 22.1 | 19.7 |
| Septembre | 17.9 | 17.9 | 18.3 | 18.3 | 15.7 |
| Octobre | 12.3 | 12.4 | 12.8 | 13.0 | 11.4 |
| Novembre | 6.9 | 6.8 | 7.4 | 7.7 | 6.0 |
| Décembre | 4.9 | 4.6 | 5.1 | 5.8 | 3.1 |
| Moyenne annuelle | 12.3 | 12.0 | 12.4 | 12.6 | 10.8 |

En 2018, la température moyenne annuelle inter-stations est de 12.3 °C. Avec cette température, l'année 2018 se classe au 1^e rang (la seconde année la plus chaude étant 1994 avec 11.9 °C et la plus fraîche 1985 avec 9.4 °C) de la période 1981 - 2018. (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 |
|--------|------------------------------|--------|------------------------------|
| 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 |
| 1999 | 11.0 | 2018 | 12.3 |

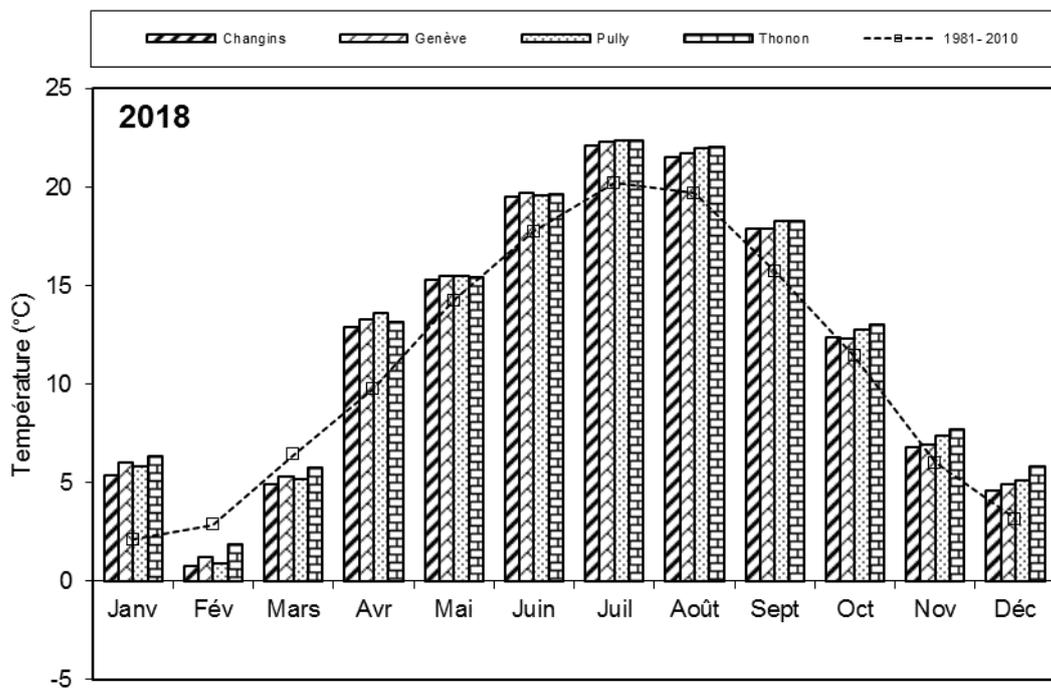


Figure 1.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2018 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1.1 : Mean monthly air temperature at each station in 2018 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

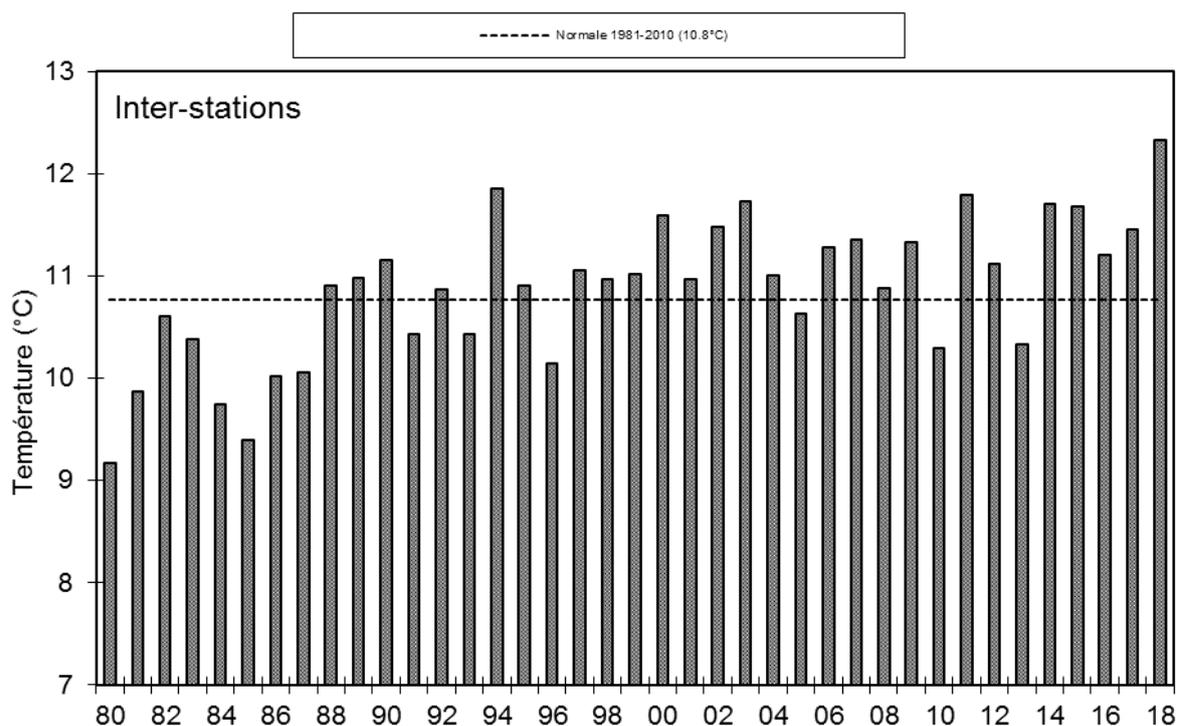


Figure 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

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

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2018 sur le bassin lémanique est de 917mm, soit 92 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 2018 un déficit de 9.1 % par rapport à la normale. Changins est la station la plus arrosée avec 962.4 mm, Genève avec 864.4 mm à les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Le mois de janvier fut très pluvieux. A l'opposé les mois de juillet à novembre furent plutôt secs.

Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2018.

Table 2.1 : Monthly rainfall (mm) at each station in 2018.

| Mois | Genève | Changins | Pully | Thonon | inter-stations 1981 - 2010 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|
| Janvier | 173.5 | 236.4 | 142.5 | 122 | 72.9 |
| Février | 28.9 | 32 | 46.5 | 31.5 | 60.8 |
| Mars | 105.4 | 121.4 | 125.5 | 100.5 | 68.5 |
| Avril | 19 | 20.4 | 28.3 | 38 | 73.5 |
| Mai | 97.5 | 105.2 | 105 | 106 | 92.8 |
| Juin | 93.3 | 62.8 | 103.4 | 113.4 | 94.3 |
| Juillet | 49 | 60.8 | 80.4 | 49.5 | 83.8 |
| Août | 62.5 | 69 | 36.4 | 117 | 86.6 |
| Septembre | 22.3 | 10.9 | 30.9 | 13.5 | 99.0 |
| Octobre | 27.9 | 21.8 | 27.1 | 30.5 | 102.5 |
| Novembre | 72.6 | 70.9 | 49.9 | 61 | 83.0 |
| Décembre | 112.4 | 150.8 | 163.2 | 119 | 88.9 |
| Total annuel | 864.4 | 962.4 | 939.1 | 901.9 | 1'008.9 |

En inter-stations, l'année 2018 se classe au 28^e rang (sur 38) de la chronologie pluviométrique 1981 - 2018 (le 1^{er} étant 2001 avec 1'299 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 |
|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
| 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 |
| 1999 | 1'266.0 | 2018 | 916.9 |

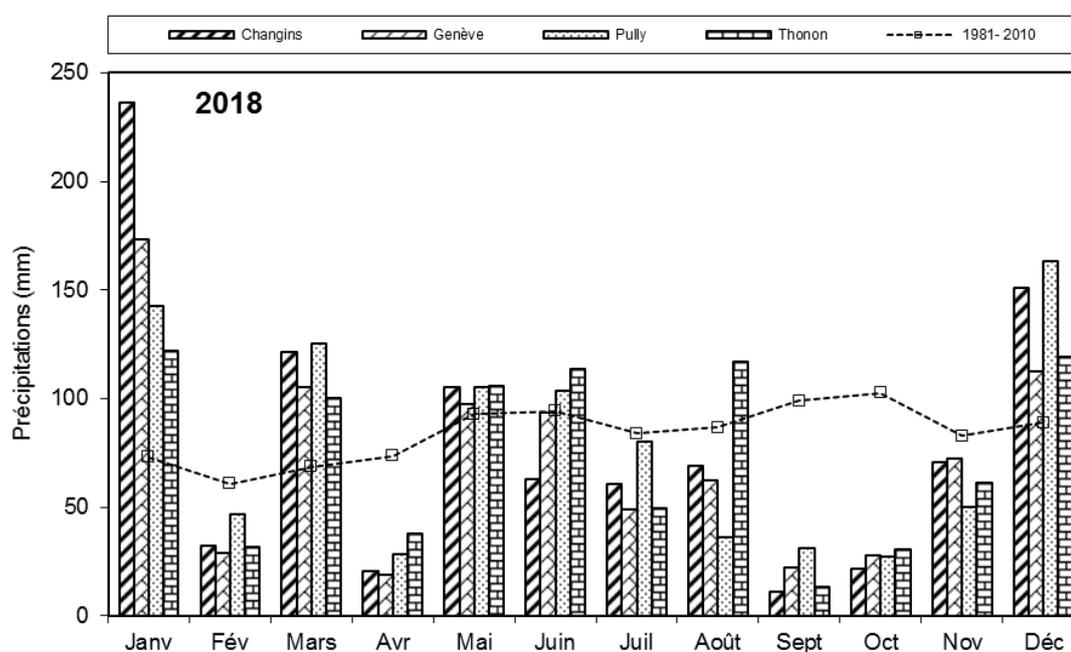


Figure 2.1 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2018 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 2.1 : Monthly rainfall at each station in 2018 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

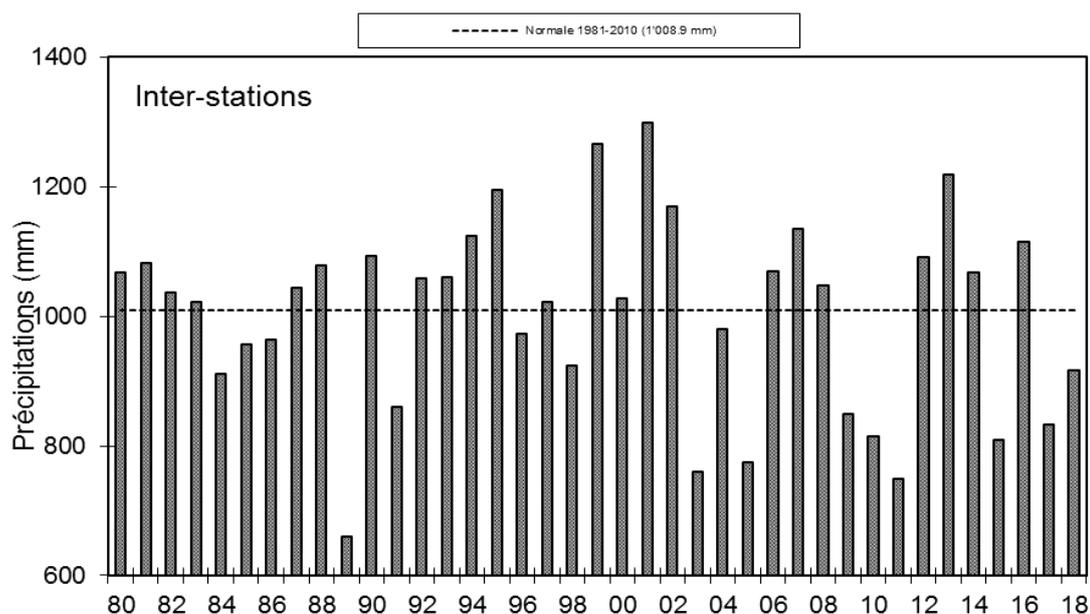


Figure 2.2 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

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

4. INSOLATION

L'insolation du premier trimestre fut particulièrement faible (-100 heures par rapport à la moyenne 1981-2010). Par contre de mars à octobre, elle fut très excédentaire (+330 heures par rapport à la moyenne 1981-2010) (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Insolation mensuelle à chaque station en 2018 (h).

Table 3.1 : Monthly insolation at each station in 2018 (h).

| Mois | Genève | Changins | Pully | Thonon | inter-stations 1981 - 2010 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|
| Janvier | 34 | 40 | 50 | 37 | 62.4 |
| Février | 60 | 75 | 77 | 59 | 90.7 |
| Mars | 93 | 104 | 99 | 113 | 156.4 |
| Avril | 214 | 226 | 225 | 227 | 182.1 |
| Mai | 187 | 199 | 195 | 226 | 208.1 |
| Juin | 296 | 288 | 282 | 328 | 236.7 |
| Juillet | 335 | 327 | 329 | 335 | 258.6 |
| Août | 277 | 277 | 279 | 269 | 236.8 |
| Septembre | 249 | 258 | 250 | 231 | 183.6 |
| Octobre | 173 | 194 | 186 | 164 | 120.0 |
| Novembre | 27 | 29 | 47 | 33 | 69.2 |
| Décembre | 34 | 49 | 52 | 34 | 49.8 |
| Total annuel | 1'979 | 2'065 | 2'069 | 2'056 | 1'854.4 |

L'année 2018 avec une moyenne inter-stations de 2'042.3 heures est une année ensoleillée. Elle se classe 6^e sur la période 1981 - 2018 (la 1^e étant 2003 avec 2'290 h, la dernière étant 1987 avec 1'442 h). C'est la 10^e fois depuis 2000 que l'insolation total annuel 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 |
|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| 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 | 2017 | 2'089.5 |
| 1999 | 1'770.1 | 2018 | 2'042.3 |

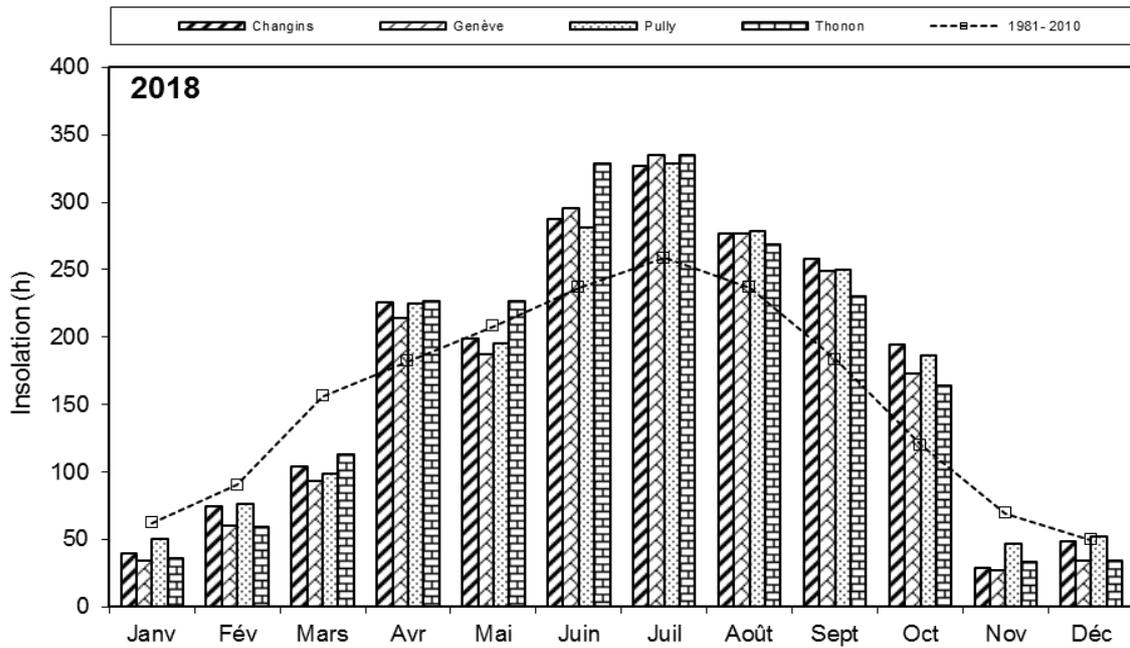


Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2018 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3.1 : Monthly insolation at each station in 2018 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

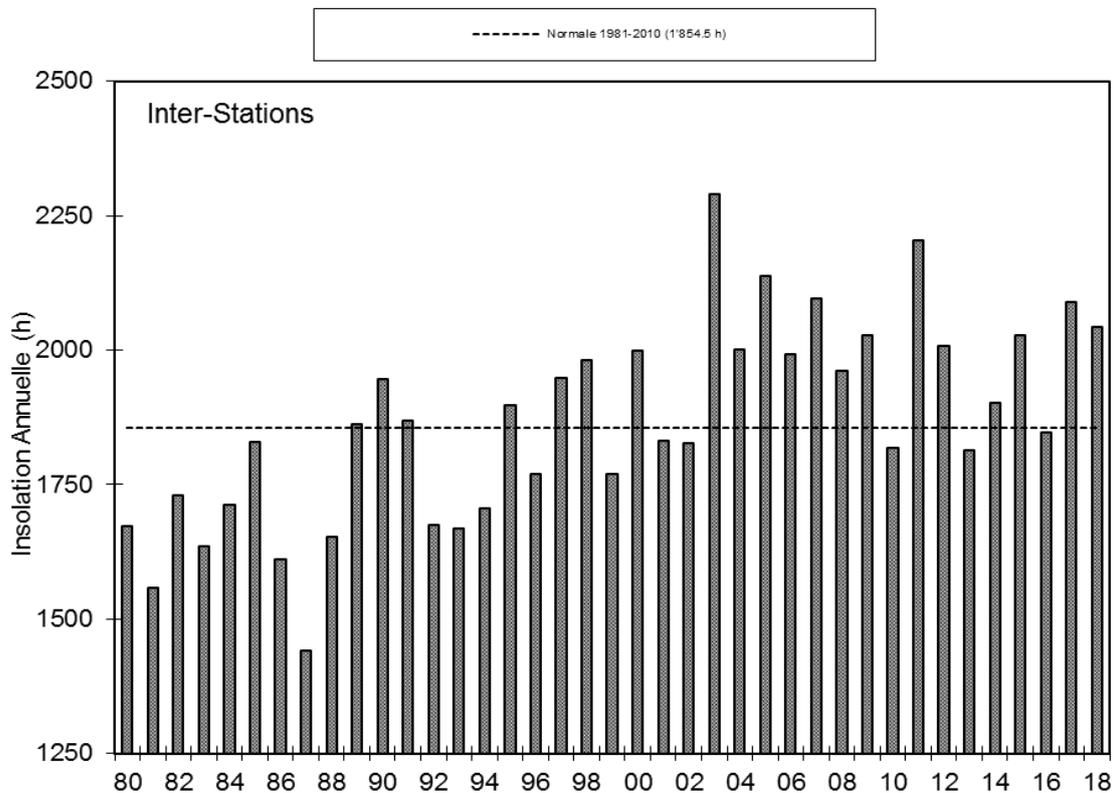


Figure 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations.

Figure 3.2 : Annual insolation at the inter-stations.

5. RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations pour l'année 2018 est de 13.5 MJ·m⁻²·d⁻¹ (tableau 4.1, figure 4.1).

Tableau 4.1 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2017 (moyenne journalière en MJ·m⁻²·d⁻¹).

Table 4.1: Global monthly solar irradiation at each station in 2017 (mean daily irradiation in MJ·m⁻²·d⁻¹).

| Mois | Genève | Changins | Pully | Thonon | inter-stations 1981 - 2010 |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Janvier | 3.1 | 3.2 | 3.7 | 2.8 | 3.6 |
| Février | 5.9 | 6.4 | 6.7 | 4.8 | 6.5 |
| Mars | 10.2 | 10.2 | 9.6 | 9.2 | 11.2 |
| Avril | 19 | 18.8 | 18.7 | 17.6 | 15.6 |
| Mai | 19.9 | 19.7 | 18.9 | 18.8 | 18.8 |
| Juin | 26.4 | 25.8 | 25 | 25.7 | 21.3 |
| Juillet | 26.3 | 25.5 | 24.8 | 25.1 | 21.3 |
| Août | 21.2 | 20.8 | 20.1 | 20 | 18.2 |
| Septembre | 17.3 | 17 | 16.4 | 15.7 | 13.4 |
| Octobre | 9.9 | 10.5 | 10 | 9.4 | 7.9 |
| Novembre | 3.5 | 3.5 | 4.5 | 3 | 4.3 |
| Décembre | 2.9 | 3.1 | 3.1 | 2.4 | 2.9 |
| Moyenne annuelle | 13.8 | 13.7 | 13.5 | 12.9 | 12.1 |

Pour l'inter-stations en 2018, le rayonnement global annuel obtenu est de 4'922. MJ·m⁻², ce qui classe l'année, troisième sur la période 1981 - 2018 (tableau 4.2, figure 4.2).

Tableau 4.2 : Rayonnement global annuel en inter-stations (MJ·m⁻²).

Table 4.2 : Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ·m⁻²).

| Années | Rayonnement global total annuel | Années | Rayonnement global total annuel |
|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|
| 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 |
| 1999 | 4'188 | 2018 | 4'922 |

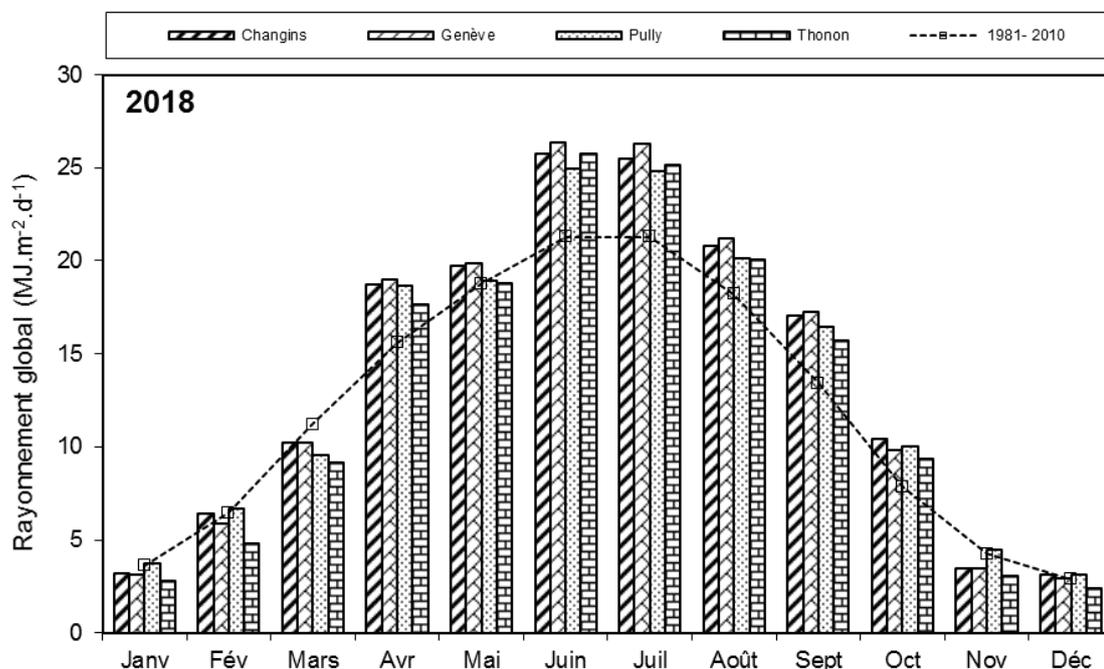


Figure 4.1 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2018 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 4.1 : Mean monthly global solar irradiation at each station in 2018 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

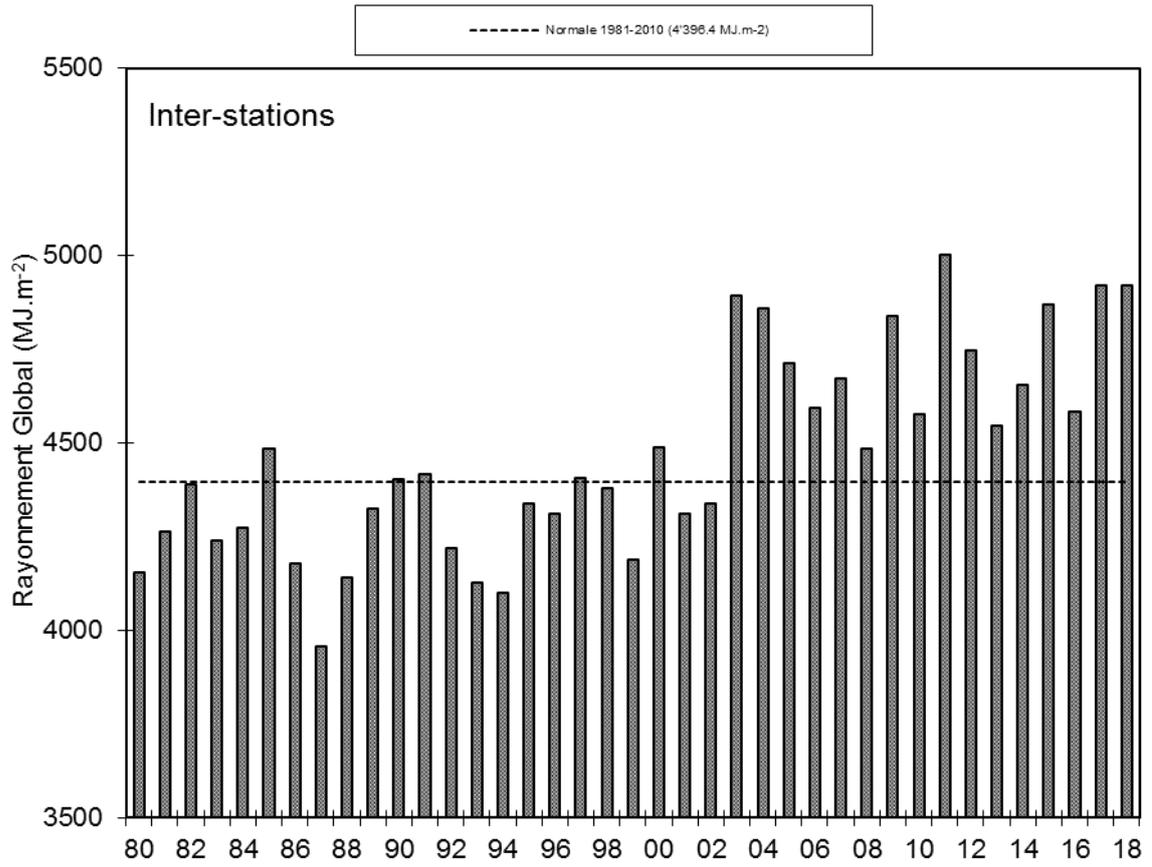


Figure 4.2 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m⁻²).

Figure 4.2 : Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ.m⁻²).

6. VENT

6.1 VITESSE DU VENT

En 2018 à Changins, station de référence, le mois de janvier, février, juin et septembre furent venteux, le reste de l'année les vitesses de vent sont 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 2018 (m·s⁻¹)

Table 5.1 : Mean monthly wind speeds in 2018 (m·s⁻¹).

| | Genève | Changins | Pully | Thonon | Changins 1981-2010 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------|
| Janvier | 3.3 | 3 | 1.9 | 1.6 | 2.4 |
| Février | 3.3 | 3.6 | 2.2 | 2.9 | 2.8 |
| Mars | 2.8 | 2.5 | 1.7 | 1.7 | 3.3 |
| Avril | 2.2 | 2.2 | 1.7 | 1 | 3.3 |
| Mai | 2.2 | 2.2 | 1.7 | 1 | 2.8 |
| Juin | 2.8 | 3 | 2.2 | 1.5 | 2.8 |
| Juillet | 2.2 | 2.5 | 1.9 | 1 | 2.7 |
| Août | 2.2 | 2.2 | 1.9 | 1.1 | 2.6 |
| Septembre | 2.2 | 2.8 | 1.9 | 1.6 | 2.6 |
| Octobre | 2.2 | 2.5 | 1.9 | 1.5 | 2.4 |
| Novembre | 1.7 | 1.7 | 1.4 | 1.5 | 2.5 |
| Décembre | 2.2 | 2.5 | 1.7 | 1.4 | 2.6 |
| Moyenne annuelle | 2.4 | 2.6 | 1.8 | 1.5 | 2.7 |

Pour l'année 2018 à Changins, il a été enregistré 35 jours de vent fort (> 5 m·s⁻¹) dont 15 jours durant le 1^{er} trimestre et 7 durant le dernier trimestre. Le maximum de vent moyen journalier (10.53 m·s⁻¹) a été relevé pour l'année 2018 le 26 février (figure 5.2).

Tableau 5.2 : Vent moyen annuel à Changins ($m \cdot s^{-1}$).

Table 5.2 : Mean annual wind speed at Changins ($m \cdot s^{-1}$).

| Années | Vent moyen annuel | Années | Vent moyen annuel |
|-------------|-------------------|-------------|-------------------|
| 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 |
| 1999 | 2.9 | 2018 | 2.6 |

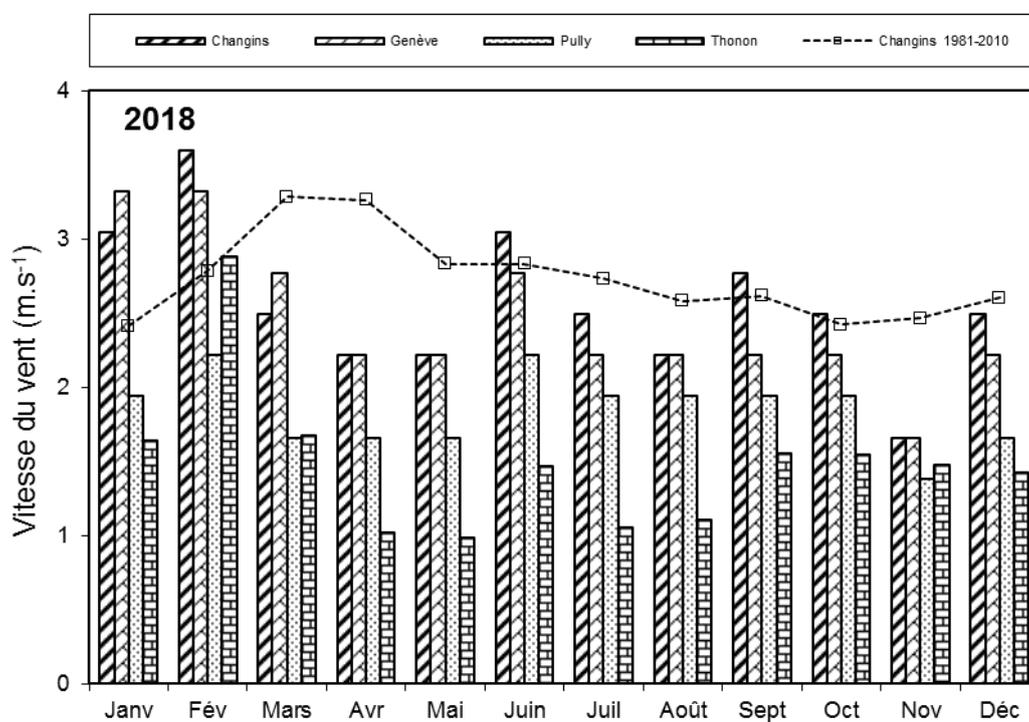


Figure 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2018 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5.1 : Mean monthly wind speeds at each station in 2018 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

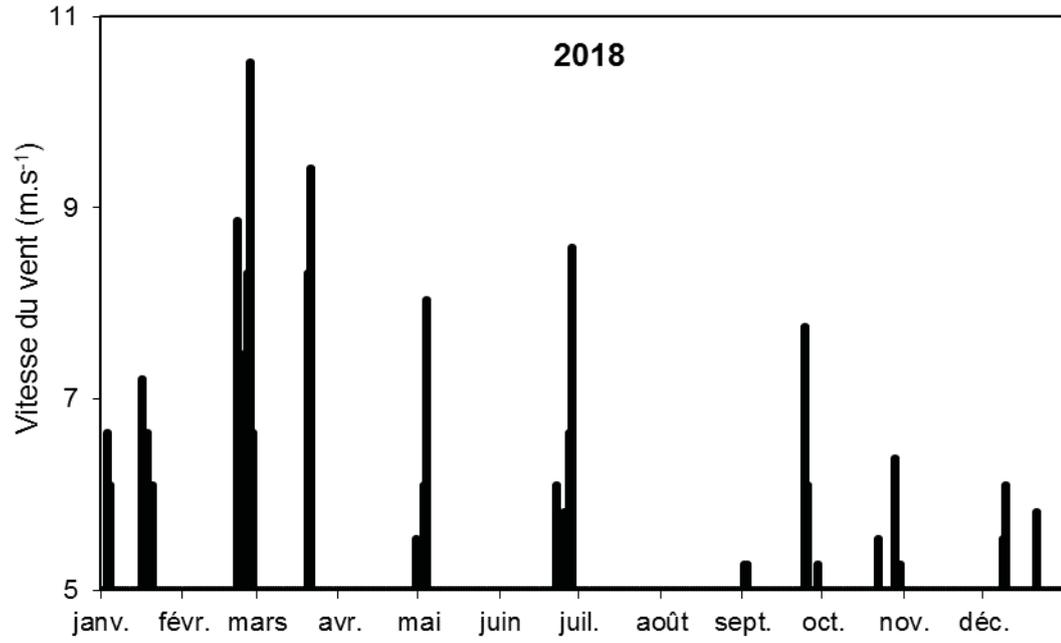


Figure 5.2 : Répartition annuelle (en 2018) des vents forts (> 5 m-s-1) à Changins.

Figure 5.2 : Annual distribution (in 2018) of strong winds (> 5 m-s-1) at Changins.

6.2 ROSE DES VENTS

Pour l'année 2018 à Changins, 58.3 % 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 13% des vents totaux, 53.8 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 37.7 % sont d'origine opposée S-O.

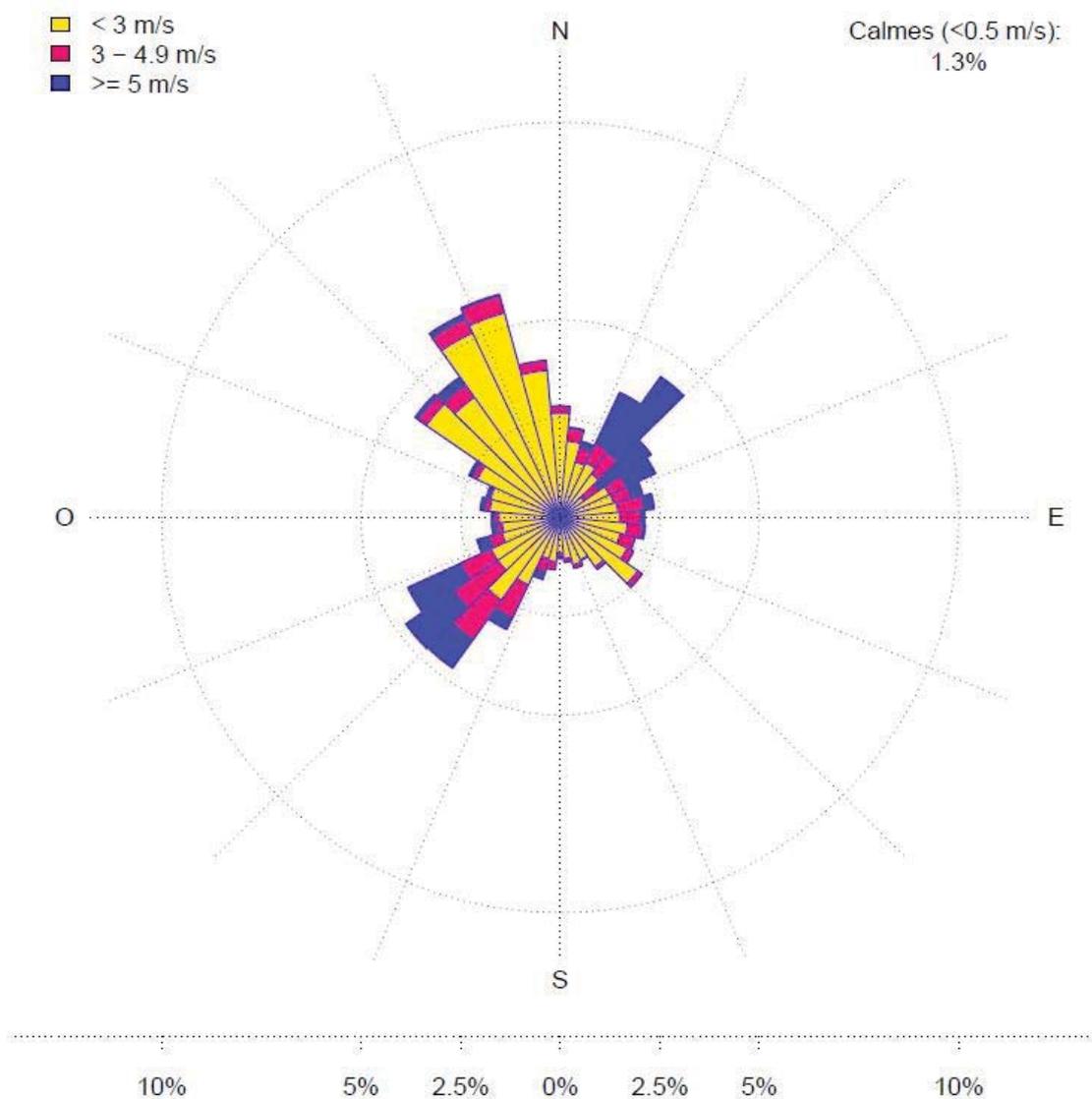


Figure 5.3 : Rose des vents moyens à Changins en 2018 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle: % d'occurrence).

Figure 5.3 : Wind directions at Changins in 2018 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).