

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN (ÉLÉMENTS MAJEURS) ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

PHYSICO-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA (MAJOR-ELEMENTS) AND METEOROLOGICAL DATAS

CAMPAGNE 2016

PAR

Christine BARBIER, Philippe QUETIN et Orlanne ANNEVILLE

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

RÉSUMÉ

L'année climatique 2016 sur les rives du Léman peut être considérée comme relativement chaude avec une température moyenne annuelle de 11.2 °C, normalement venteuse et ensoleillée, et avec une pluviométrie qui présente un excédent de 10.5 % par rapport à la moyenne 1981-2010 avec 1115 mm de précipitations. L'été a été chaud, et les mois d'août et septembre furent particulièrement secs.

L'hiver 2016 a donné lieu à un brassage partiel de la colonne d'eau jusqu'à environ 70 m, réduisant la réoxygénation des couches d'eau profondes du Léman et la distribution des nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau.

La consommation des nutriments (azote nitrique, phosphore et silice) débute en avril et se poursuit jusqu'à ce qu'ils atteignent des concentrations traces dans les couches épilimniques.

Dans la zone d'activité phytoplanctonique, on constate une baisse du phosphore attribuable à l'action conjuguée de l'absence de brassage complet depuis plusieurs années et des mesures pour diminuer l'apport de phosphore au lac. En revanche, la concentration moyenne en phosphore mesurée sur toute la colonne d'eau est du même niveau que celle de 2015 avec une valeur annuelle moyenne de phosphore total de 19.1 µgP.L-1 (20.5 µgP.L-1 en 2014 et 19.0 µgP.L-1 en 2015).

Le flux de phosphore relargué à partir des sédiments, ainsi que la réduction de l'azote nitrique en azote ammoniacal au fond du lac sont faibles en fin d'année 2016 comme en 2015, et ce malgré les faibles concentrations en oxygène induites par l'absence de brassage complet depuis 2012. Les eaux du fond du lac contiennent néanmoins un stock de phosphore qui pourrait contribuer à un enrichissement ponctuel de toute la colonne d'eau en cas de brassage total.

En 2016, le stock d'azote nitrique dans le lac est un peu plus élevé qu'en 2015, avec 49'450 tonnes de N.

Le stock de chlorure dans le Léman continue d'augmenter mais de façon moins importante qu'en 2015 et atteint 901'280 tonnes en 2016.

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman en 2016, plus précisément du Grand Lac à la station SHL2, et présente l'évolution de 18 paramètres (température, pH, conductivité, titre alcalimétrique complet, oxygène dissous, phosphore total, orthophosphate, phosphore total particulaire, azote total, azote ammoniacal, nitrate, nitrite, 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 2016 (température de l'air, pluviométrie, insolation, rayonnement global et vents) est intégrée à ce rapport et figure en annexe IV. Cette annexe prend en compte les données des quatre stations météorologiques de Genève-Cointrin, Changins, Pully et Thonon-INRA.

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).

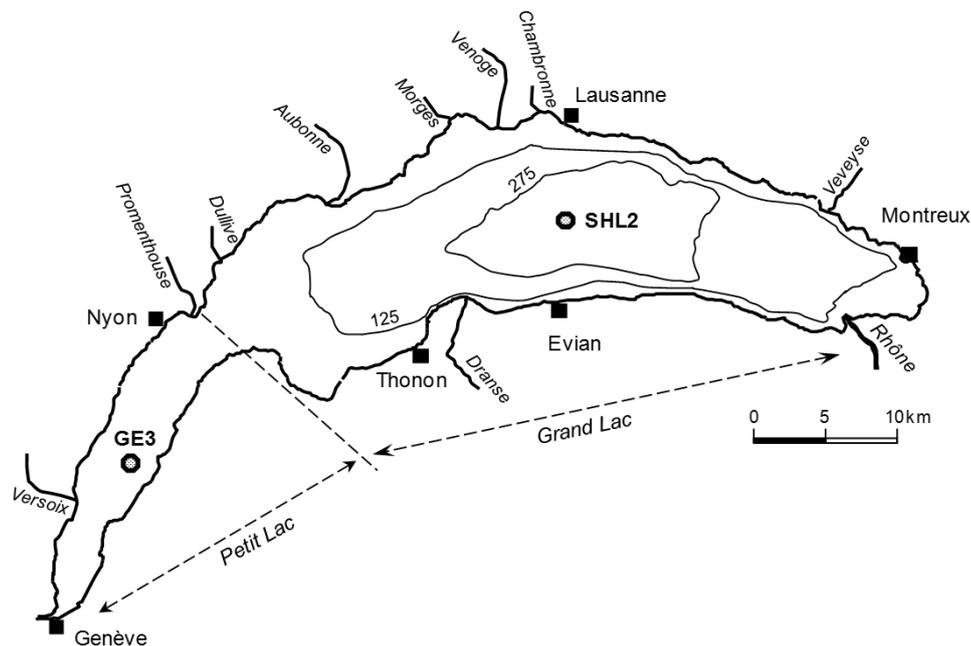


Figure 1 : Situation des points de prélèvement sur le Léman

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 I et II).

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, lorsque l'activité biologique est réduite ; bimensuelle de mars à novembre, lorsque l'activité est intense.

Il y a eu 19 campagnes de prélèvements en 2016, réparties selon les dates indiquées dans le Tableau 1.

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

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

Campagne n°	Date
1	20.01.2016
2	01.03.2016
3	15.03.2016
4	04.04.2016
5	21.04.2016
6	09.05.2016
7	24.05.2016
8	06.06.2016
9	23.06.2016
10	05.07.2016
11	18.07.2016
12	08.08.2016
13	24.08.2016
14	07.09.2016
15	19.09.2016
16	17.10.2016
17	15.11.2016
18	30.11.2016
19	15.12.2016

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 sont validées 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 III.

Lors de chaque campagne, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH et chlorophylle *a in vivo* sont réalisés à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable (BLANC et *al.*, 1993). Dans le même temps, une mesure de la transparence est effectuée en observant la profondeur de disparition d'un disque de Secchi normalisé (disque noir et blanc, 20 cm). De 1957 à mi-2009, cette mesure était effectuée uniquement avec le disque de Secchi 'INRA' non-normalisé (disque blanc d'un diamètre de 30 cm). Une comparaison de la transparence entre les deux types de disque de Secchi a été réalisée de mi-2009 à 2015.

L'analyse par régression linéaire des résultats présentée dans le précédent rapport d'activité (BARBIER et *al.*, 2016) montre que les valeurs obtenues pour les deux types de disques sont significativement corrélées ($R^2 = 0,93$; $n > 100$). Depuis 2016, seul le disque de Secchi normalisé est employé.

3. RÉGIME THERMIQUE : INFLUENCE SUR LA STRATIFICATION ET LE MÉLANGE DES EAUX

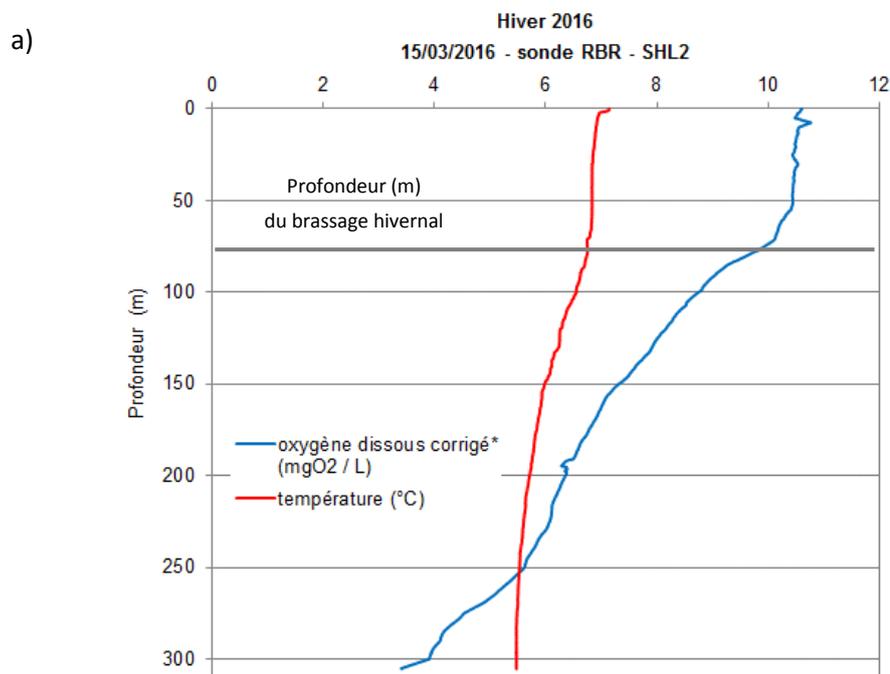
En 2016, les températures des mois de janvier et février, ainsi que celle d'août et septembre sont plus élevées que les moyennes inter-stations et peuvent être classifiées comme chaudes (Annexe IV).

L'été 2016 a néanmoins été moins chaud que celui de 2015.

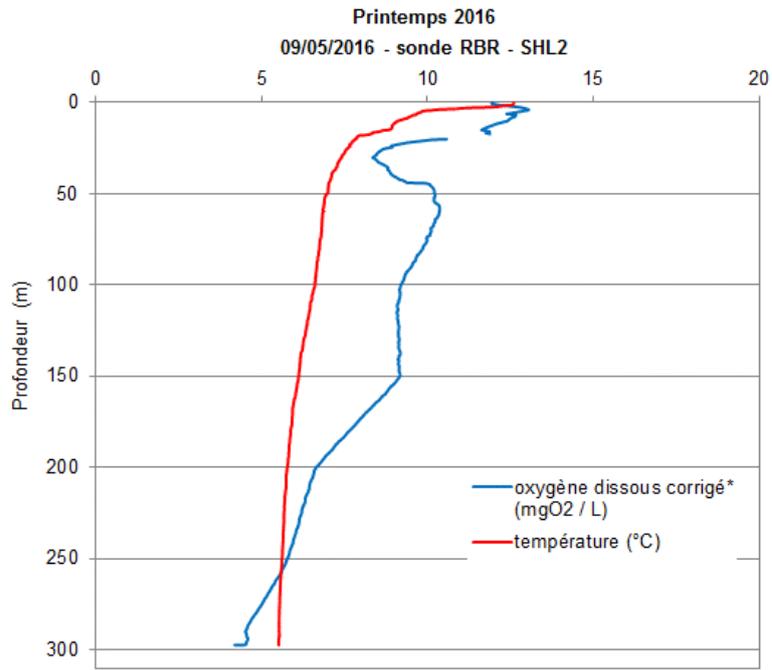
En 2016, la température moyenne extérieure annuelle inter-stations est de 11.2 °C, légèrement inférieure à 2015 (11.7°C).

La température la plus basse observée au fond du lac durant l'hiver est de 5.5 °C le 20 janvier 2016 soit 0.2 et 0.1 °C de plus qu'en 2014 et 2015, respectivement. Les conditions météorologiques de l'hiver 2016, n'ont pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. D'après les mesures *in situ* réalisées au cours des campagnes de suivi du Léman, un brassage partiel a eu lieu jusqu'à environ 70 m de profondeur à la date du 15 mars 2016 (Figure 2a). Par conséquent, l'eau des couches profondes du lac n'a pas été réoxygénée. La valeur d'oxygène dissous mesurée au fond du lac au mois de mars lors du brassage partiel maximal est égale à 3.37 mgO₂·L⁻¹.

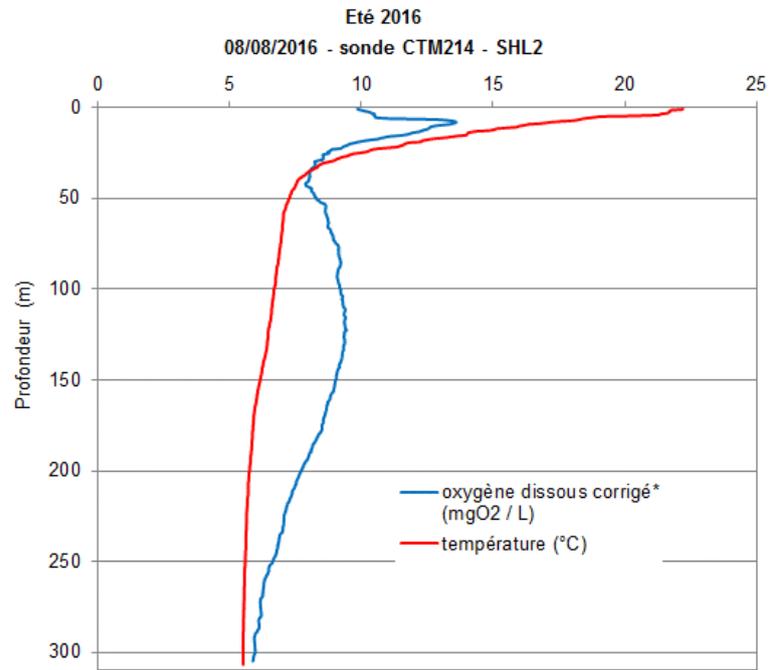
Les couches superficielles se réchauffent et se stratifient au printemps, induisant la reprise de l'activité phytoplanctonique qui permet une augmentation de l'abondance phytoplanctonique au cours du printemps et conduit au pic d'oxygène épilimnique le 9 mai 2016 (Figure 2b). La température maximale en surface est observée le 24 août 2016 avec 22.2°C (Figure 2c) contre 24.8 °C à la même période de l'année précédente. Ces températures estivales moins élevées en surface qu'en 2015 peuvent s'expliquer par un été moins chaud et des pluies d'orage importantes au mois de juillet 2016. L'arrivée de l'automne engendre l'enfoncement et l'érosion de la thermocline. On obtient alors un épilimnion caractéristique et plus épais qui s'étend jusqu'à environ 40 mètres (Figure 2d). La température de l'eau à la surface le 15 décembre 2016 est égale à 8.6 °C contre 9.7 °C en 2015.



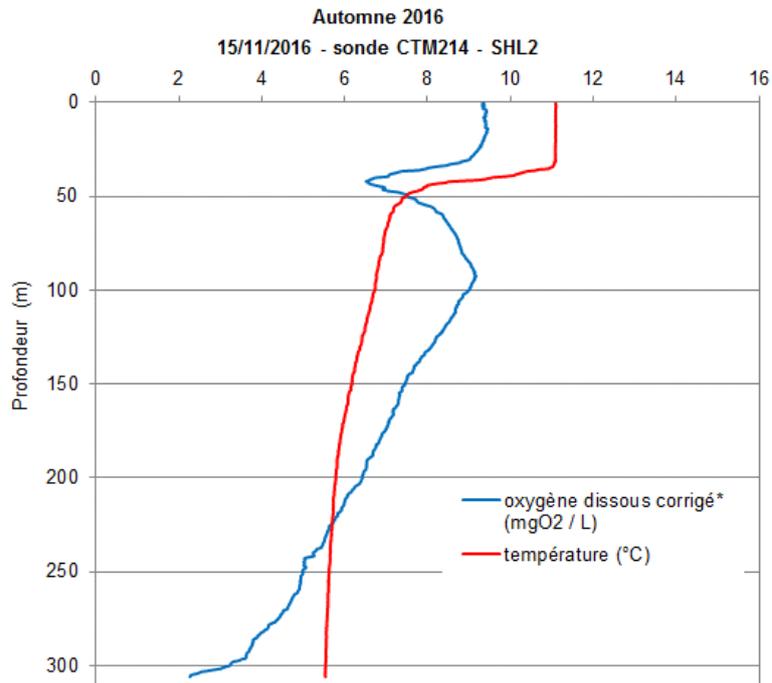
b)



c)



d)



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

Figure 2 : Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman - Grand Lac (SHL2) :
a) en hiver lors du brassage partiel maximal (15.03.2016),
b) au printemps (09.05.2016),
c) en été (08.08.2016),
d) en automne (15.11.2016).

Figure 2: Physico-chemical profile made using multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2) :
a) in winter after maximal water mixing (15.03.2016),
b) in spring (09.05.2016),
c) in summer (08.08.2016),
d) in autumn (15.11.2016).

Les figures 3 à 5 représentent l'évolution saisonnière et interannuelle de la température des eaux du lac. La tendance au réchauffement observée ces vingt dernières années (Figures 3 et 4) est confirmée en 2016, comme cela apparaît sur le suivi de la température annuelle moyenne à différentes profondeurs de la colonne d'eau. La figure 5 nous permet de constater que les températures moyennes des eaux de la couche 0 - 20 mètres en 2016 ont été plus élevées de janvier à juillet ainsi qu'en septembre que la moyenne de la période 2000-2015.

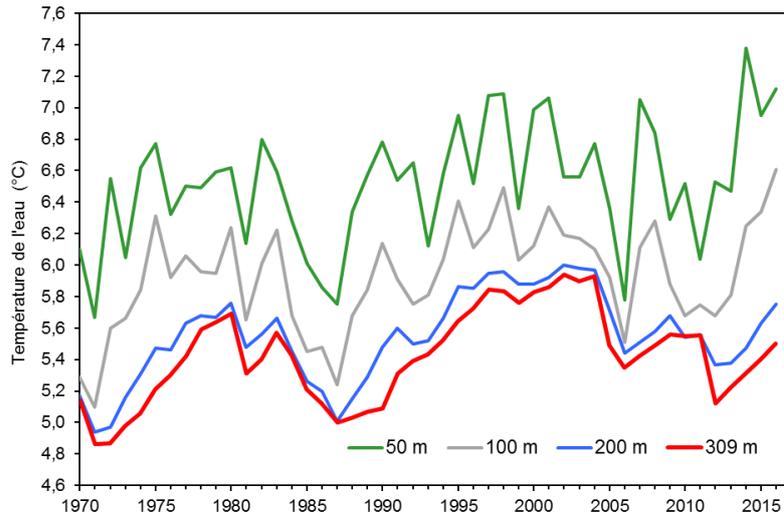


Figure 3 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1970 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 3: Inter-annual changes in annual mean water temperature in the lake at depths of 50, 100, 200 and 309 meters from 1970 to 2016, lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

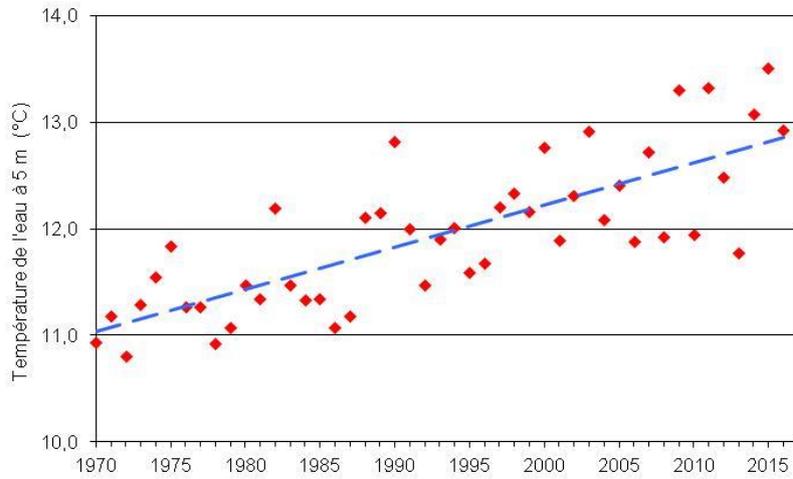


Figure 4 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du lac à 5 mètres de profondeur de 1970 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 4: Inter-annual changes in the annual mean water temperature of the lake at a depth of 5 meters from 1970 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

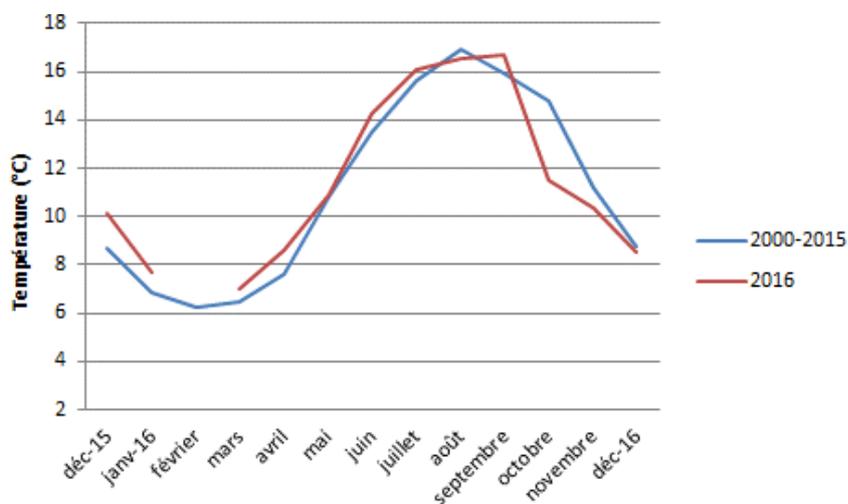


Figure 5 : Température moyenne mensuelle de l'eau du lac en 2016 et de 2000 à 2015 à entre 0 et 20 mètres de profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2)

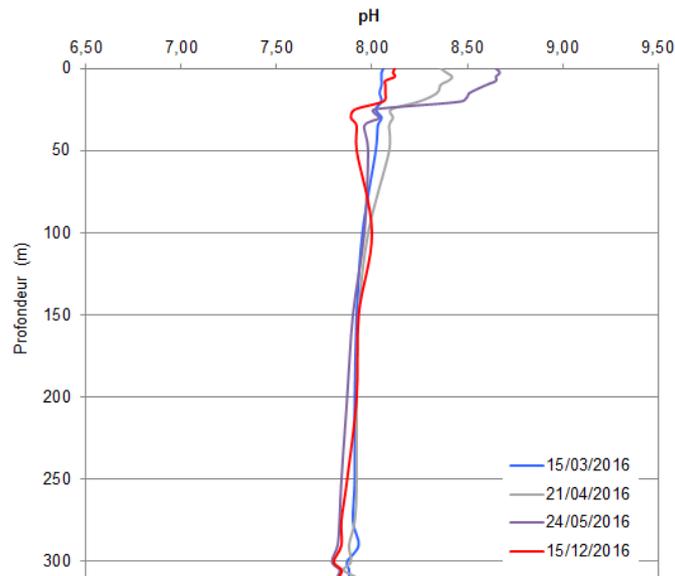
Figure 5: Mean monthly water temperature in 2016 and from 2010 to 2015 at a depth of 0 to 20 meters, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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 6 représente l'évolution saisonnière du pH dans la colonne d'eau du lac. A l'issue du brassage hivernal partiel jusqu'à 70 m, le pH de la colonne d'eau varie entre 7.87 et 8.06, tel que l'on peut l'observer sur le profil du 15 mars 2016 en bleu sur la figure 6. L'activité phytoplanctonique printanière conduit à une augmentation significative du pH dès le mois d'avril 2016, 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 pour atteindre une valeur maximale de 8.65 mesurée en surface le 24 mai 2016, beaucoup plus tardivement qu'en 2015 où ce phénomène avait été constaté le 29 avril. Ceci correspond à la période où la biomasse phytoplanctonique est la plus importante (RIMET, 2017).



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

Figure 6 : pH des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (—), à la reprise d'une activité photosynthétique significative (—), lors du pic phytoplanctonique (—) et à l'issue de la destratification de la colonne d'eau (—), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 6: pH in the lake as a function of depth after maximal water mixing (—), during recovery of significant photosynthetic activity (—), during phytoplankton peak (—) and after water column destratification (—), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 7 représente l'évolution du pH dans les couches d'eau superficielles (0 - 20 m) de 1980 à nos jours. On ne relève pas de tendance significative de gamme de valeur du pH sur la chronique, mais la gamme de variabilité tend à se réduire.

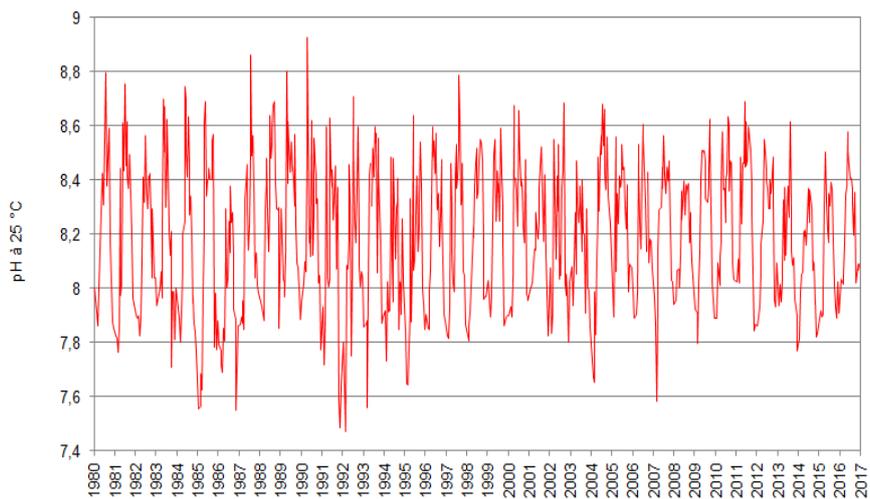


Figure 7 : Evolution du pH à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2016 Léman - Grand Lac (SHL2)

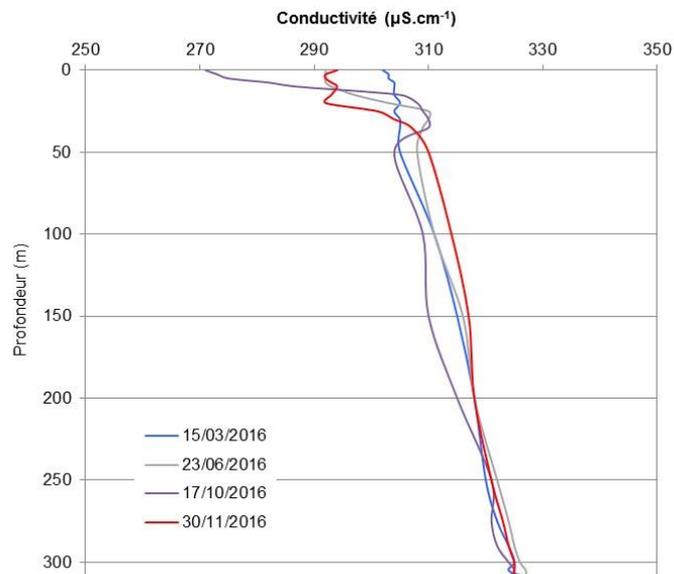
Figure 7: Change in pH at 25°C in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.2 CONDUCTIVITÉ

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

L'évolution saisonnière de la conductivité dans la colonne d'eau du lac est représentée sur la figure 8. On constate que la conductivité n'est pas homogène dans l'ensemble de la masse d'eau le 15 mars 2016 au moment du brassage hivernal partiel et varie entre 302 et 327 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Par la suite, la conductivité commence à diminuer de manière significative à partir du mois de juin dans l'épilimnion à l'issue d'une activité phytoplanctonique intense. 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 de la conductivité qui commence en été. La conductivité minimale dans l'épilimnion est observée en octobre avec 271 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 0 m tel que cela est représenté en violet sur la figure 8.

On observe également une augmentation de la conductivité dans l'hypolimnion. Ce phénomène s'explique par la minéralisation de la matière organique par l'activité bactérienne induisant une désoxygénation et provoquant le relargage de plusieurs sels dissous.



La mesure de la conductivité à 25°C est effectuée en laboratoire à des profondeurs définies

Figure 8 : Conductivité des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (—), lors du démarrage significatif de la précipitation du carbonate de calcium (—), lors de sédimentation maximale du carbonate de calcium (—) et lors de l'enfoncement maximal de la thermocline (—), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8: Conductivity in the lake as a function of depth after maximal water mixing (—), during the beginning of significant calcium carbonate precipitation (—), during maximal calcium carbonate sedimentation (—) and after thermocline hollow (—), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 9 représente l'évolution de la conductivité dans les couches d'eau superficielles (0 - 20 m) sur la chronique de 1980 à 2016. Après une tendance à la baisse dans les années 80, puis une hausse dans les années 90, la conductivité ne présente pas de tendance significative depuis le début des années 2000.

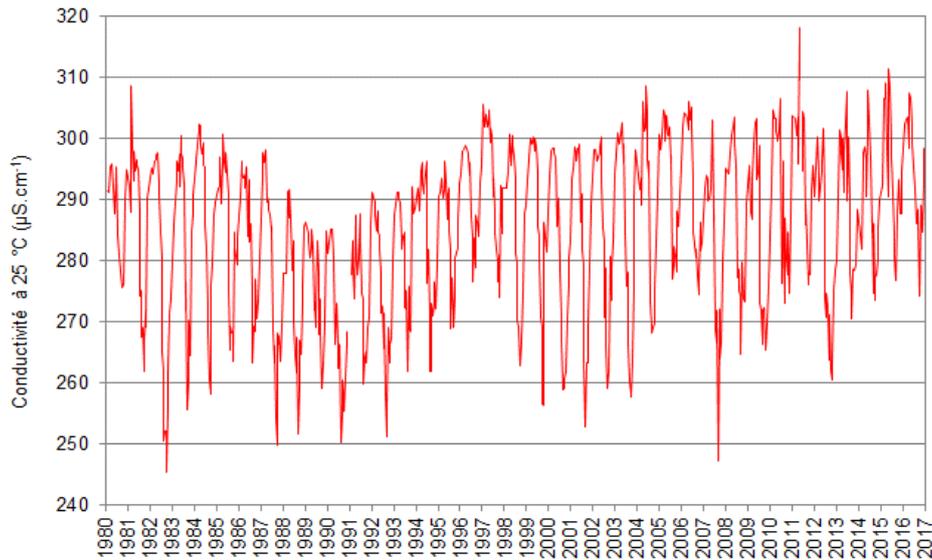


Figure 9 : Evolution de la conductivité à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 9: Change in the conductivity at 25°C in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.3 TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est la mesure de la teneur en hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes de l'eau. Durant l'hiver 2016, le TAC est hétérogène dans la colonne d'eau et fluctue entre 1.60 et 2.01 meq·L⁻¹ à l'issue du brassage partiel. Le TAC diminue ensuite dans les eaux superficielles (0 - 20 m) parallèlement à la baisse de la conductivité à partir du mois de juin 2016, ce qui s'explique par la précipitation des ions carbonates avec le calcium (Figure 10). Le titre alcalimétrique complet est minimal dans l'épilimnion en fin d'été avec environ 1.45 meq·L⁻¹. A l'automne, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2016.

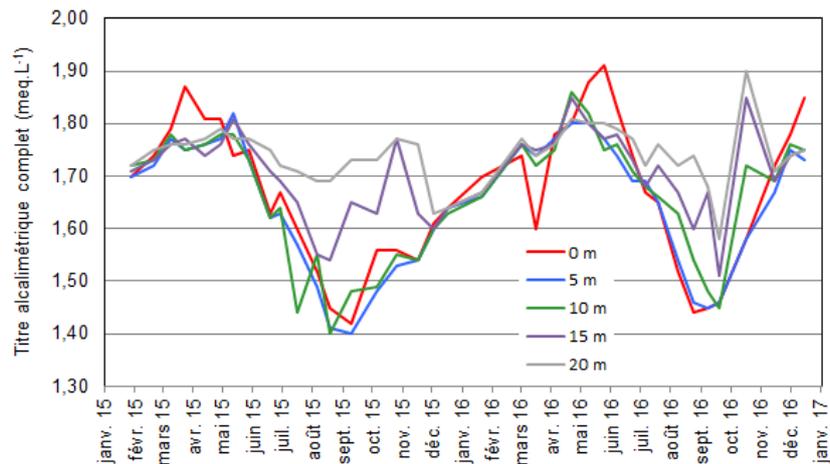


Figure 10 : Titre alcalimétrique complet dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10: Total alkalinity in lake's water surface layer (0 - 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

L'évolution du titre alcalimétrique complet des eaux superficielles (0 - 20 m) de 1980 à 2016 est présentée sur la figure 11. La même observation que la conductivité peut être faite à savoir qu'après une tendance à la baisse dans les années 80, puis une hausse dans les années 90, ce paramètre ne présente pas de tendance significative depuis le début des années 2000. Cette évolution présente un profil similaire avec celui de l'évolution du phytoplancton.

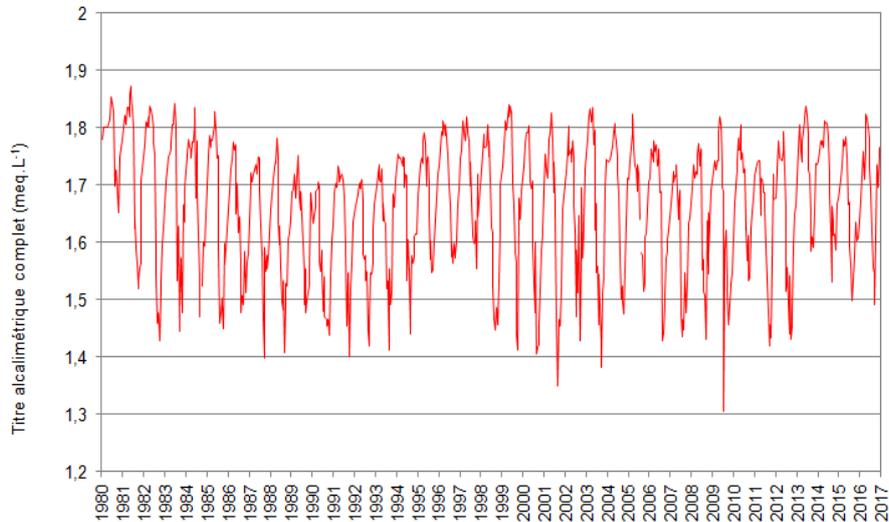


Figure 11 : Evolution du titre alcalimétrique complet dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11: Change in total alkalinity in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Le brassage hivernal des eaux d'un lac permet la remise à disposition des nutriments dans la colonne d'eau à partir des couches inférieures plus concentrées, et la réoxygénation des eaux du fond. Le brassage de l'hiver 2016 n'a pas été complet, ce qui a eu pour conséquence une redistribution des nutriments tout le long de la colonne d'eau qui n'a pas été homogène.

5.1 PHOSPHORE TOTAL ET ORTHOPHOSPHATE

La figure 12 présente l'évolution des concentrations en phosphore réactif soluble, c'est-à-dire en orthophosphates dans la zone 0 - 20 m. Ces variations de concentrations sont liées essentiellement à l'activité phytoplanctonique.

Une concentration moyenne maximale en phosphore réactif soluble de $3.8 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ est détectée le 15 mars 2016 entre 0 et 20 m (Figure 12), à l'issue du brassage partiel du lac. Cette valeur est inférieure à celle observée l'année précédente, avec $7.2 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ à la suite d'une homogénéisation partielle de la colonne d'eau.

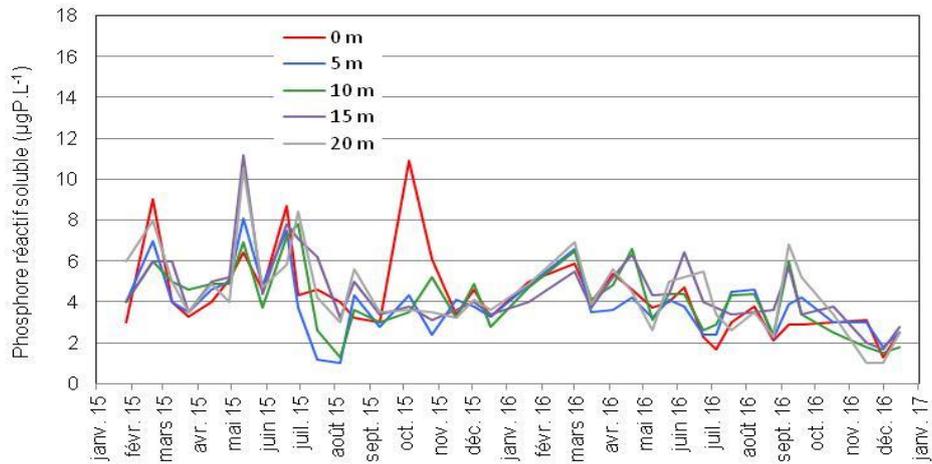


Figure 12 : Concentration en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 12: Concentration of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

L'évolution depuis 1996 du stock en phosphore total et en orthophosphate dans la couche 0 – 30 m lors du brassage hivernal est représenté sur la figure 13. C'est dans cette couche qu'il est disponible pour l'activité phytoplanctonique. On constate que le stock en orthophosphate, directement biodisponible, est plus faible que l'année précédente du fait de plusieurs années consécutives sans brassage complet. Cette évolution est dépendante de l'intensité du brassage de l'année en cours mais aussi de celui de l'année précédente.

Sur cette chronique de 1996 à nos jours, une tendance globale à la baisse du stock de phosphore apparaît. Ce phénomène s'explique aisément d'une part du fait que les brassages de la colonne d'eau sont partiels depuis plusieurs années, et d'autre part du fait de 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 et de l'augmentation des performances en matière de déphosphatation des STEP.



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

Figure 13 : Stock de phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) et phosphore total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2016 à l'issue du brassage hivernal, Léman - Grand Lac (SHL 2)

Figure 13: Stock of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) and total phosphorus in the lake's water surface layer of 0 - 30 m from 1996 to 2016 after winter mixing, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.2 AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

A l'issue du brassage partiel, le 15 mars 2016, la concentration en azote nitrique atteint son maximum, avec en moyenne 561 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ entre 0 et 20 m ce qui est un peu inférieur à l'année antérieure avec environ 602 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figure 14).

Dès la campagne suivant le brassage hivernal, on peut constater sur la figure 14 que la concentration en azote nitrique des couches superficielles de 0 à 10 m diminue significativement. Par la suite, la consommation de l'azote nitrique continue et la concentration de cet élément atteint un minimum le 24 août 2016 avec 210 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ à la surface du lac. L'azote nitrique est consommé de manière significative jusqu'à 15 m.

En 2016, l'abaissement de la concentration en l'azote nitrique est moins important qu'en 2015 où des concentrations de l'ordre de 180 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$, étaient mesurées à 0 et 5 m au mois de septembre. Cette différence peut s'expliquer en partie par une biomasse moins importante que celle de 2015 qui était largement dominée par *Mougeotia gracillima* (RIMET, 2016).

Finalement, la consommation ralentit dès le mois de septembre pour atteindre de nouveau, en décembre, une concentration moyenne en azote nitrique de 378 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ dans l'eau des couches superficielles.

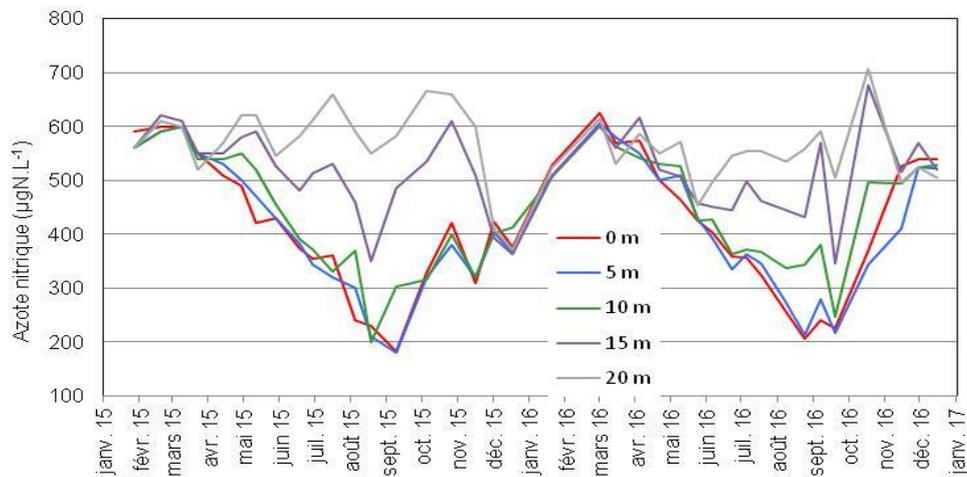


Figure 14 : Concentration en azote nitrique (N-NO_3^-) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 14: Concentration of nitrate (N-NO_3^-) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Le stock d'azote total et d'azote nitrique dans la couche 0 – 30 m lors du brassage hivernal de 1996 à 2016 est représenté sur la figure 15. On observe une relative stabilité du stock d'azote depuis 2013.

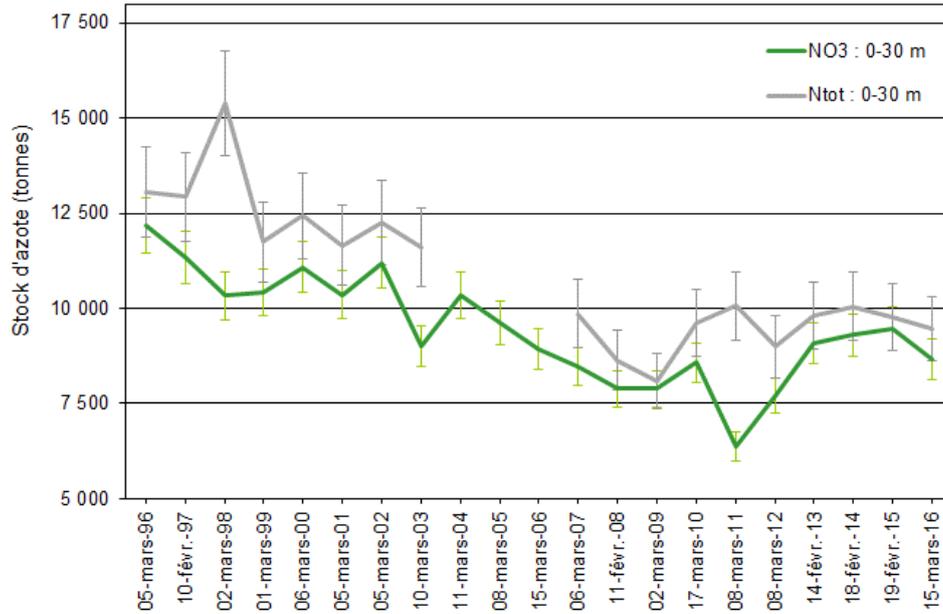


Figure 15 : Stock d'azote nitrique (N-NO₃⁻) et d'azote total dans les eaux de la couche 0 - 30 m (avec barres d'incertitudes) de 1996 à 2016 lors du brassage hivernal, Léman - Grand Lac (SHL 2)

Figure 15 : Stock of nitrate (N-NO₃⁻) and total nitrogen in the lake's water surface layer of 0 - 30 m (with error bars) from 1996 to 2016 during 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. Cette activité conduit à une concentration en azote ammoniacal du même ordre que celle de l'année dernière avec, sur la période de mai à juin 2016, des valeurs qui atteignent 41 µgN.L⁻¹ à 20 m le 6 juin 2016. En 2015, la valeur maximale était de 39 µgN.L⁻¹ à 15 m le 11 mai. (Figure 16). Ceci est à corréliser avec une activité zooplanctonique importante (ANNEVILLE, 2017) liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (RIMET, 2017).

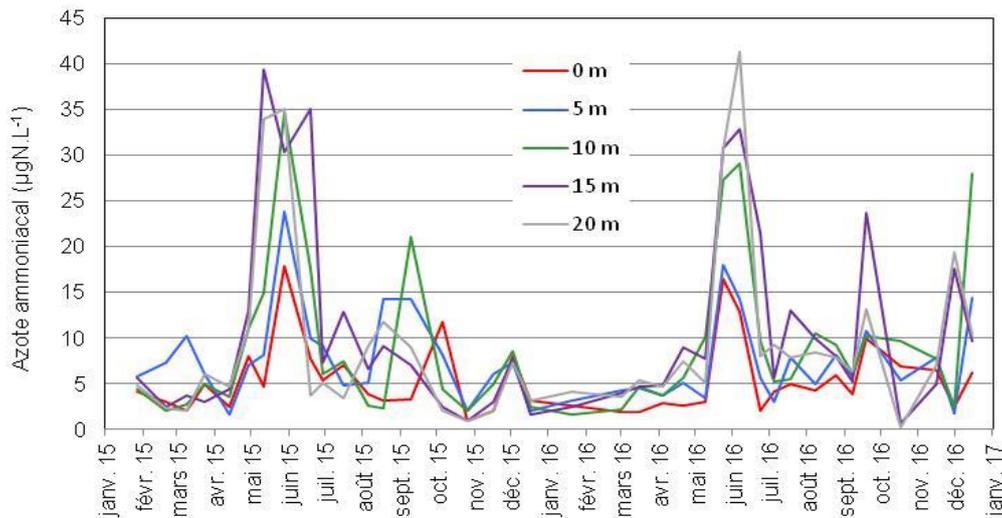


Figure 16 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH₄⁺) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 16: Concentration of ammoniacal nitrogen in lake's surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.3 SILICE

Le brassage partiel de l'hiver 2016, de même que lors des trois années précédentes, n'a pas permis de redistribuer la silice présente dans l'eau des couches profondes dans l'ensemble de la colonne d'eau comme cela avait été le cas en 2005, 2006 et 2012 lors de brassages complets (Figure 17). La plus forte concentration en silice dans les couches d'eau superficielles est observée le 15 mars 2016 à l'issue du brassage partiel maximal. La teneur moyenne en silice est alors égale à $0.71 \text{ mgSiO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ entre 0 et 20 m contre $1.03 \text{ mgSiO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ en 2015 à la même période de l'année (Figure 18).

La silice commence à être consommée par l'activité phytoplanctonique des algues diatomées (RIMET, 2017) dès la campagne suivante, le 4 avril 2016, pour atteindre le 24 mai 2016 des concentrations non détectables analytiquement de 0 à 10 m.

Les teneurs en silice dans la zone 0 - 10 m redeviennent détectables en juin 2016 jusqu'au 8 août où elles chutent de nouveau en dessous des seuils de détection suite à l'apparition du deuxième pic de biomasse phytoplanctonique de l'année dominé par une diatomée pennée (RIMET, 2017). La concentration en silice reste faible ensuite jusqu'au mois d'octobre 2016 où la consommation décroissante 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).

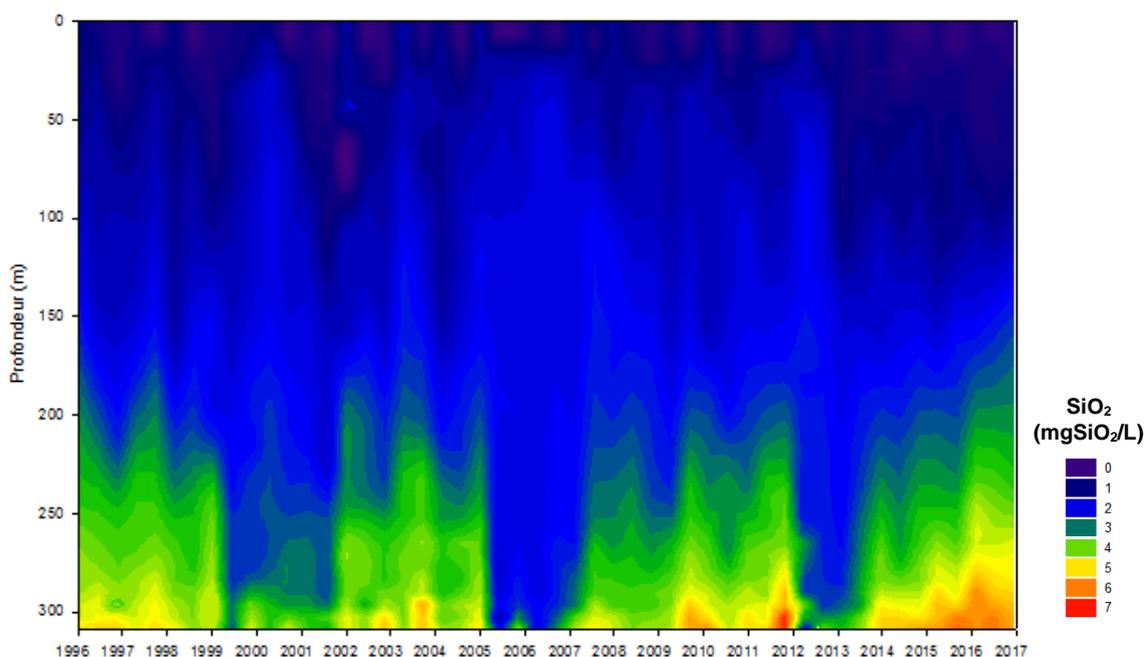


Figure 17 : Concentration en silice (SiO_2) dans les eaux du lac en fonction de la profondeur de 1996 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 17: Concentration of silica (SiO_2) in lake's water as a function of depth from 1996 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

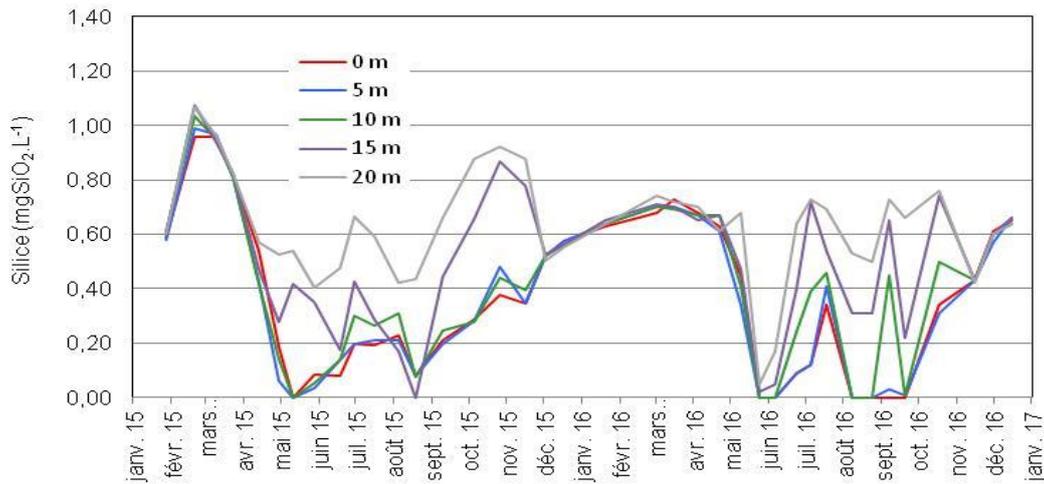


Figure 18 : Concentration en silice (SiO_2) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

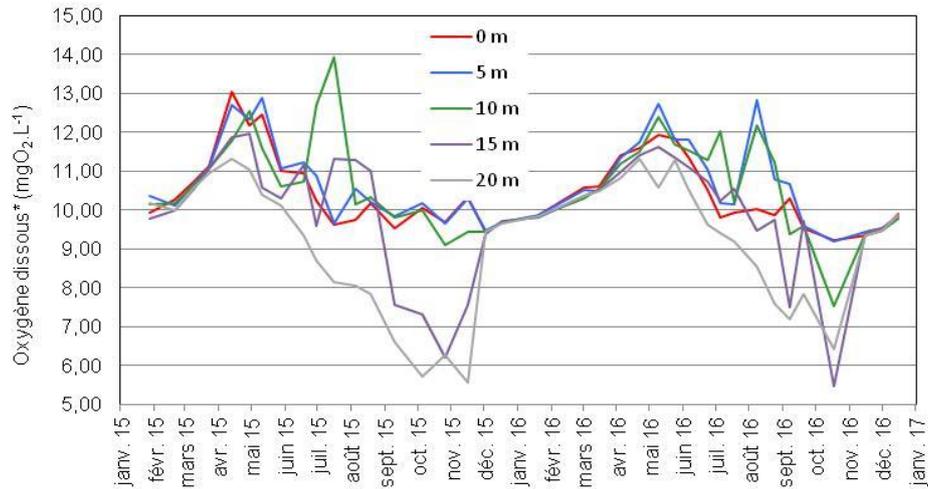
Figure 18: Concentration of silica (SiO_2) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.4 OXYGÈNE DISSOUS

La production d'oxygène par la photosynthèse dans les couches supérieures du lac au printemps est mise en évidence par les figures 19 et 25. Le pic printanier de sursaturation en oxygène des couches superficielles est observé le 9 mai 2016 avec $12.77 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ en surface, à 2.5 m.

A partir du milieu du mois de juin, la concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles diminue, principalement à cause d'une activité photosynthétique moins intense (PERGA, 2017) consécutive au fléchissement des diatomées (RIMET, 2017). D'autres facteurs expliquent également ce phénomène tels que la diffusion d'oxygène vers les couches d'eau inférieures qui sont désoxygénées du fait de l'activité bactérienne qui y règne et le dégazage vers l'atmosphère lors de la sursaturation en oxygène dissous de l'épilimnion.

Par la suite, on peut observer un second pic important d'oxygène dissous à 5 et 10 m le 8 août 2016, consécutif au second pic de biomasse phytoplanctonique de l'année, assez proche par son ampleur de celui du mois de mai 2016, et dominé par les diatomées. La désoxygénation de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers les couches plus profondes est relativement marquée en 2016. Les concentrations minimales sont alors, au mois d'octobre, égale à $5.46 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$. Ces valeurs sont du même niveau que l'année précédente avec $5.73 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ en octobre 2015.



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

Figure 19 : Concentration en oxygène dissous dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 19: Concentration of dissolved oxygen in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.5 TRANSPARENCE

La figure 20 représente la dynamique de la transparence en 2016. L'hiver a été caractérisé par une transparence importante jusqu'à 11.7 m le 15 mars 2016 lors du brassage hivernal qui reste néanmoins inférieure à 2015 où la transparence atteignait 14 m le 19 février 2015.

Par la suite, la reprise de l'activité photosynthétique, induit l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique, et provoque une diminution progressive de la transparence jusqu'à une valeur de 4.0 m le 21 avril 2016 lors de la présence d'une Xanthophycée filamenteuse tolérant les faibles intensités lumineuses. La transparence reste relativement faible avec des valeurs comprises entre 5.3 et 6.7 m du 9 mai au 23 juin 2016, pendant la phase où le phytoplancton printanier est le plus abondant et essentiellement constitué de diatomées et de *M. gracillima* (RIMET, 2017), qui consomme les nutriments présents en abondance mais n'est guère consommé.

On observe ensuite un pic de transparence à 9.4 m le 5 juillet 2016 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 (PERGA & PERNEY, 2017).

La transparence diminuera de nouveau les semaines suivantes suite à l'apparition du deuxième pic de biomasse de l'année 2016 qui s'étend de mi-juillet à mi-septembre 2016, et 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 10.2 m le 30 novembre 2016.

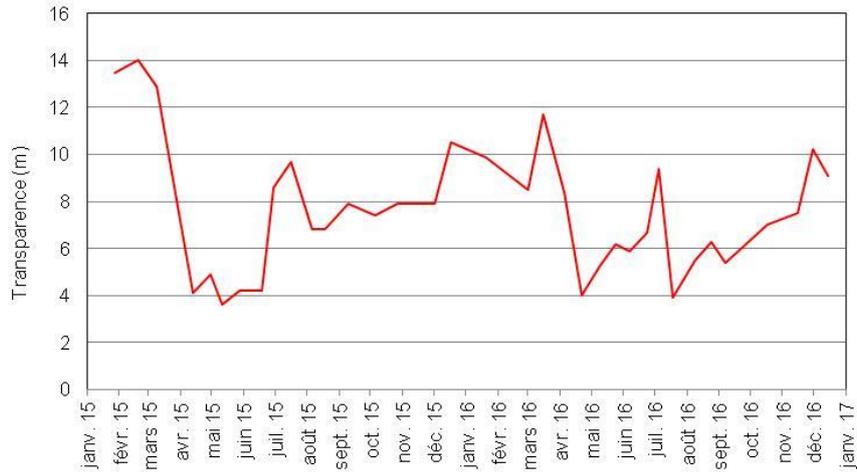
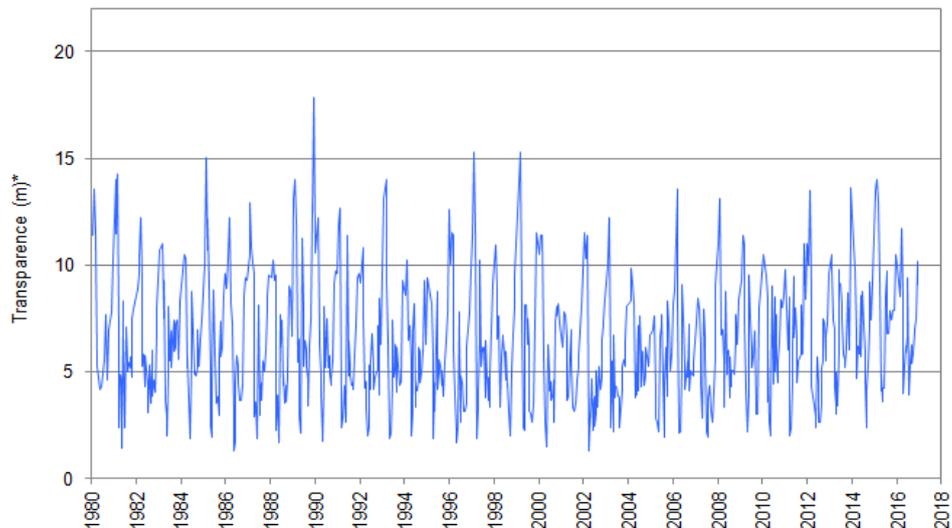


Figure 20 : Transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

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

La figure 21 permet d’observer l’historique de la transparence de 1980 à nos jours. L’année 2016 présente des valeurs de transparence du même ordre de grandeur que l’ensemble de la chronique.



*De 1980 à 2009, valeurs de transparence calculées par l’application d’un modèle aux valeurs de transparence du disque de Secchi 30 cm (Transparence disque normalisé = 0.8742 * transparence disque 30 cm)

Figure 21 : Evolution de la transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm) de 1980 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 21: Long-term changes in transparency using Secchi disk (black and white, 20 cm) from 1980 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.6 MATIÈRE PARTICULAIRE

La matière particulaire est un indicateur de l’abondance phytoplanctonique en suspension dans l’eau. Le carbone et l’azote organiques particuliers ainsi que le phosphore total particulier représentent plus précisément la fraction de nutriments en phase dissoute dans l’eau 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 (Figure 22).

Le premier pic observable de carbone organique particulaire de l'année 2016 s'étend de mi-avril à fin juin, avec une valeur de $404 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$ à 5 m, et correspondant au premier pic de la phase printanière de la biomasse phytoplantonique. S'ensuit un deuxième pic plus marqué de carbone organique particulaire qui s'étend de mi-juillet à mi-septembre, et est marqué par un maximum le 8 août 2016, avec $537 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$. Il est à corrélérer avec le pic maximal annuel de biomasse algale de l'année 2016 (RIMET, 2017).

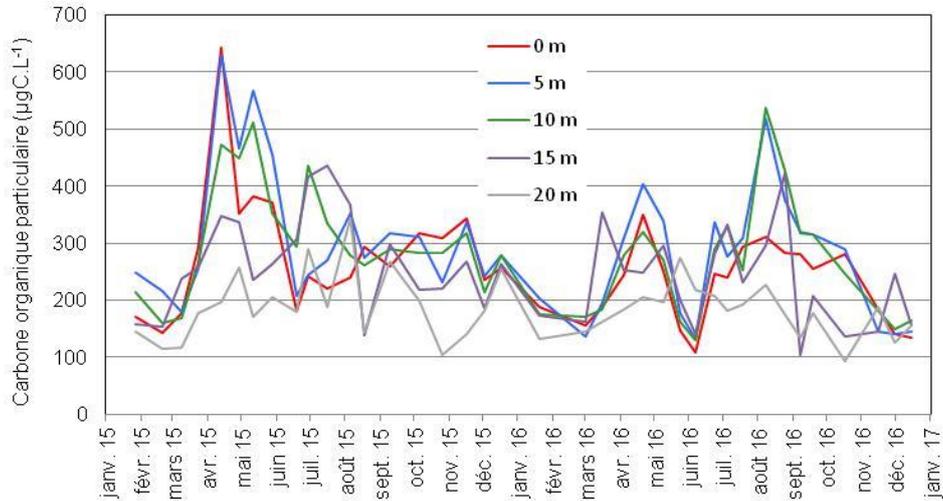
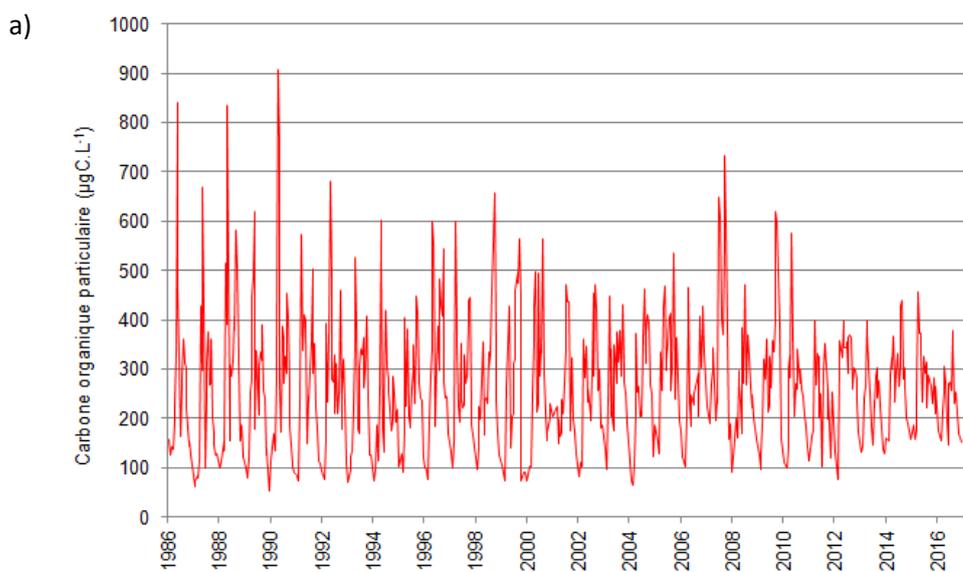


Figure 22 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 22: Concentration of particulate organic carbon in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 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 : carbone organique particulaire (COP), azote organique particulaire (NOP) et le phosphore particulaire (Ppart). Les concentrations en COP, NOP et Ppart en 2016 sont parmi les plus basses de la chronologie de 1986 à nos jours.



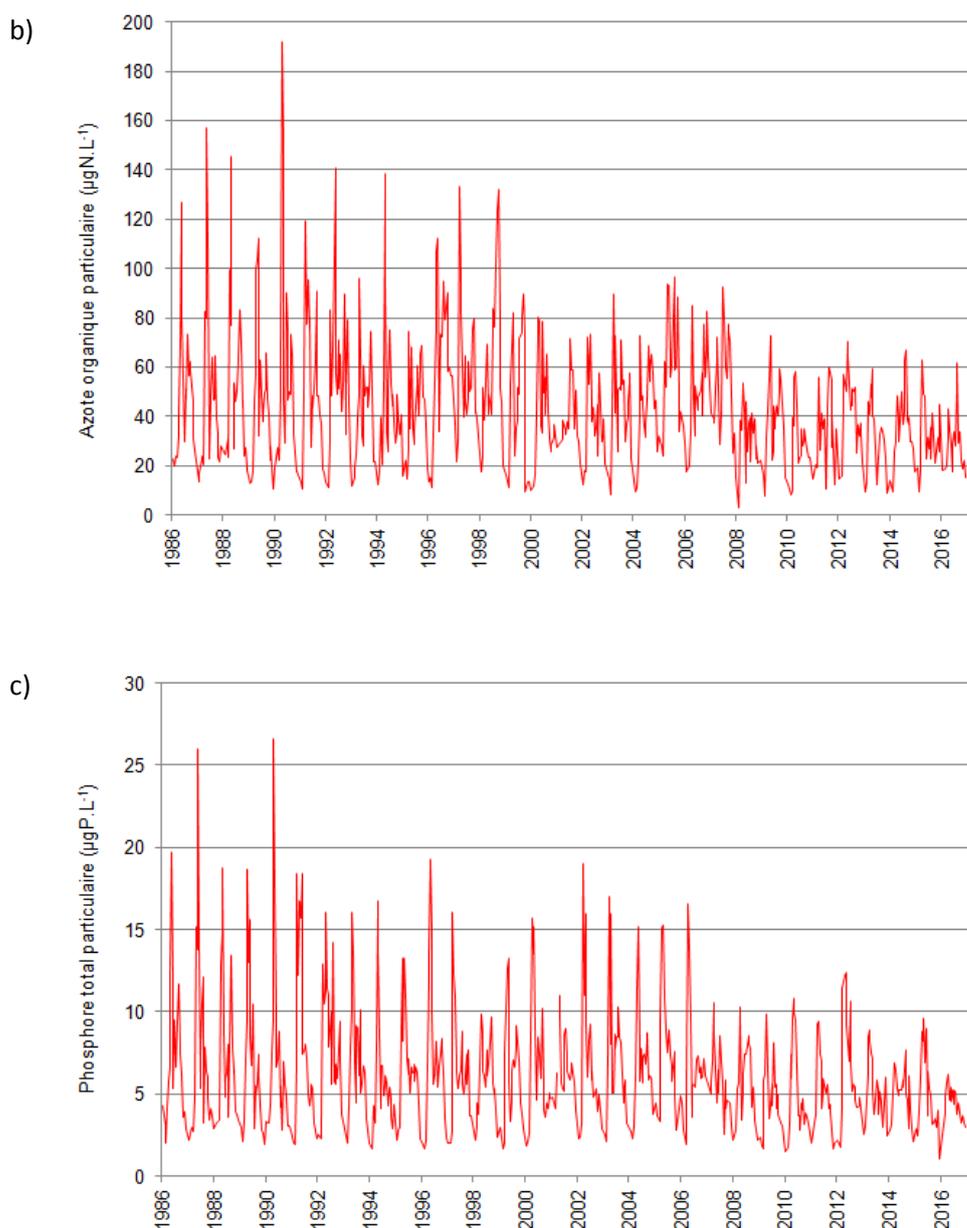


Figure 23 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- 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 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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

Si l'on se réfère à la stœchiométrie de la réaction globale de la photosynthèse, le phosphore est habituellement considéré comme limitant quand le rapport N/P est supérieur à 7. La figure 24 traduit une carence en phosphore disponible pour les cellules algales pendant la période estivale tout au long de la chronique.

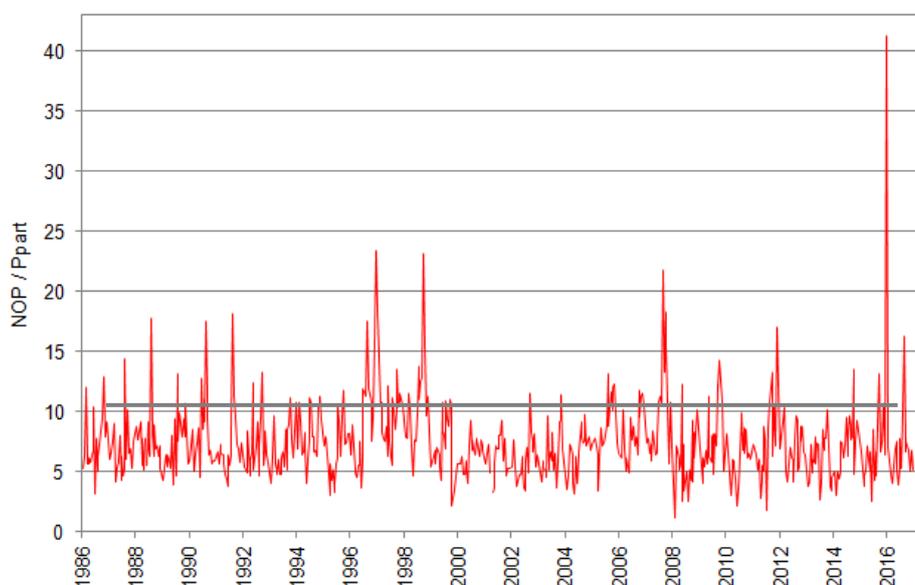
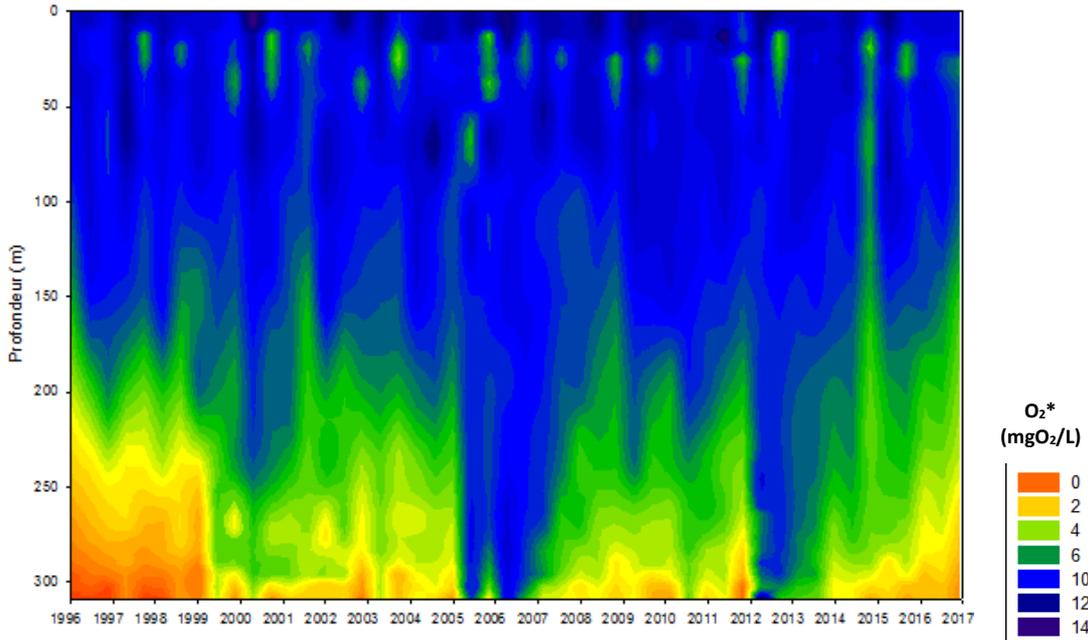


Figure 24 : Evolution du rapport NOP / Ppart dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

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

6. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

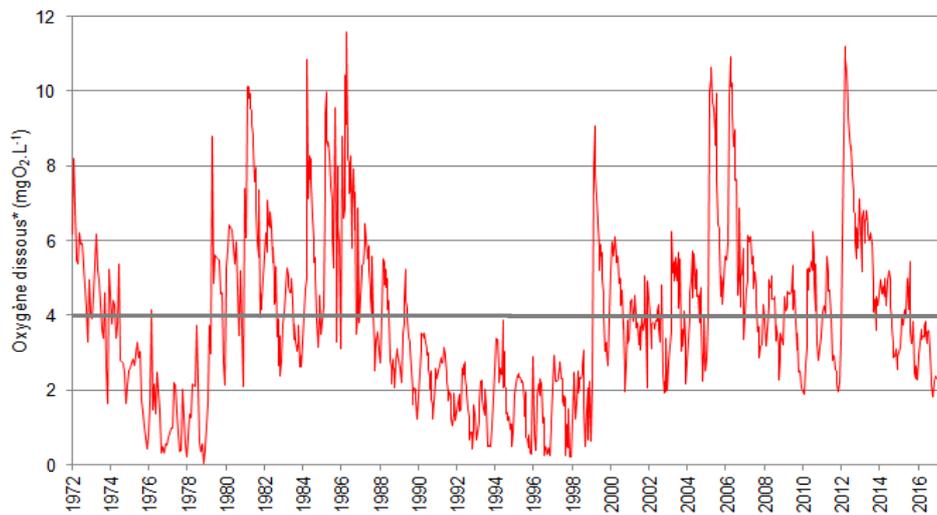
L'hiver 2016 n'a pas permis de ré-oxygéner l'ensemble de la colonne d'eau contrairement à l'année du dernier brassage complet en 2012 (Figure 25). Le 15 mars 2016, à l'issue du brassage partiel maximal, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à $3.37 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ (Figure 26). La teneur en oxygène dissous à 309 m diminue ensuite de manière progressive à partir du mois d'août 2016 et continue jusqu'à la fin de l'automne, principalement du fait de la minéralisation de la matière organique sédimentée. Le minima est observé le 17 octobre 2016 avec $1.81 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$, ce qui reste proche de la valeur minimale de 2015 de $2.29 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ mais inférieur à la valeur limite fixée par l'OEaux.



* 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 les eaux du lac en fonction de la profondeur de 1996 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

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



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

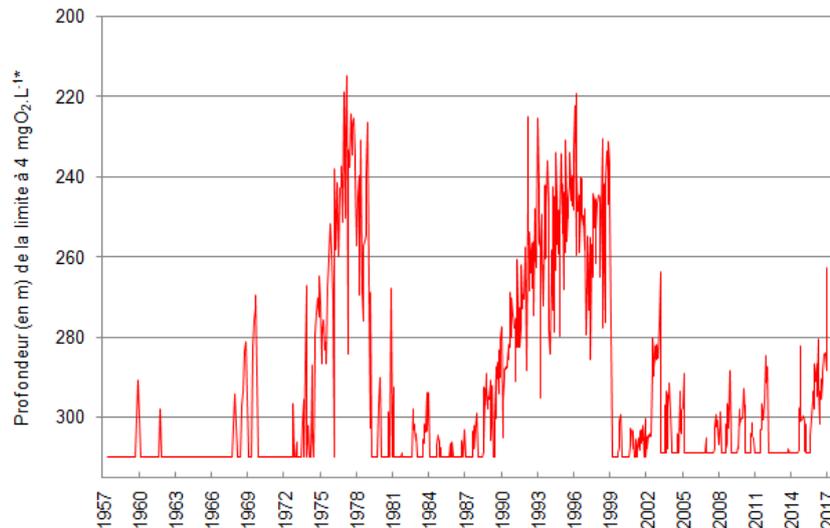
Figure 26 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

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

L'Annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 stipule : "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 $4 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$; 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". Ce seuil à $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ relative aux exigences sur la qualité des eaux en Suisse est indiqué par la ligne pointillée sur la figure 26.

L'évolution de la couche d'eau de concentration inférieure à $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ de 1957 à nos jours est représentée sur la figure 27. Depuis 1998, on constate une nette augmentation de la teneur en oxygène dissous dans les couches profondes du Léman. Toutefois, on peut noter que pour l'année 2016, la couche d'eau « désoxygénée » ($< 4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$), est plus importante qu'en 2015.



* 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 1957 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

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

La désoxygénation des couches profondes entraîne plusieurs phénomènes propres à ces conditions réductrices : la réduction de certains métaux comme le manganèse (RAMSEIER et al., 2015) et le fer, la formation d'azote ammoniacal, le relargage de phosphore à partir des sédiments et de leurs eaux interstitielles. Ces phénomènes engendrent indirectement la remise en suspension des sédiments, matérialisée par l'augmentation de la turbidité, et s'accompagnent d'une libération de la silice présente dans les eaux interstitielles et les sédiments.

Le brassage partiel de l'hiver 2016 n'a pas permis de réoxygéner l'ensemble de la colonne d'eau. Les figures 28 et 29 montrent que malgré l'anoxie estivale mise en évidence par l'évolution des valeurs de concentration du manganèse total dans la couche profonde (KLEIN, 2017), le relargage du phosphore semble faible comme en témoigne le maintien de basses concentrations dans cette partie de la colonne d'eau. La concentration maximale en orthophosphate est notée le 15 décembre 2016, lorsque la teneur en oxygène dissous est la plus basse, avec $59 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ contre $63 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ en 2015.

Le niveau relativement peu élevé de ces teneurs au fond du lac montre que les conditions favorisant le relargage du phosphore par les sédiments ne sont pas réunies. La possibilité d'une limitation des flux due à une couche superficielle de sédiment peu chargée est parfois évoquée : elle pourrait être liée à l'amélioration de l'état du lac ou de la charge externe. Quoi qu'il en soit, les informations issues de nos mesures ne nous permettent pas, à l'heure actuelle, de soutenir cette hypothèse. La question du relargage du phosphore nécessiterait une étude approfondie sur les conditions d'oxydo-réduction à l'interface eau-sédiment, associée à une modélisation des flux.

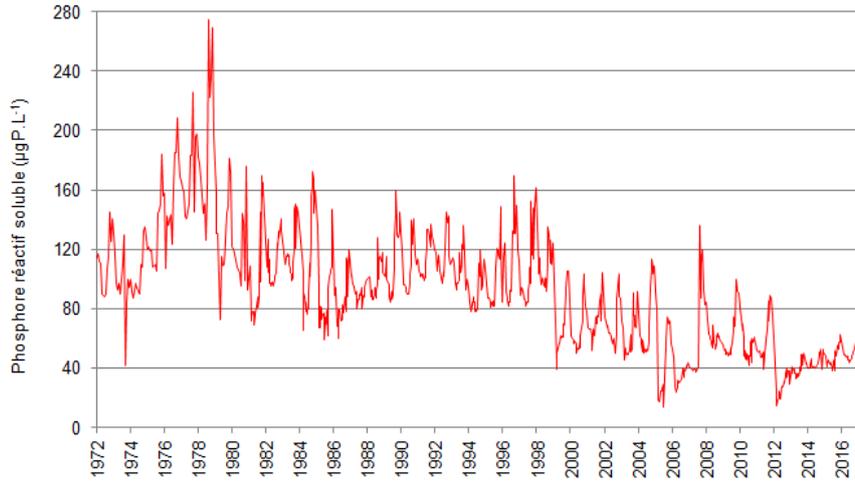


Figure 28 : Evolution de la concentration en phosphore réactif soluble (P-PO₄³⁻) dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 28: Change in the concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO₄³⁻) in the bottom of lake's water at 309 m from 1972 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

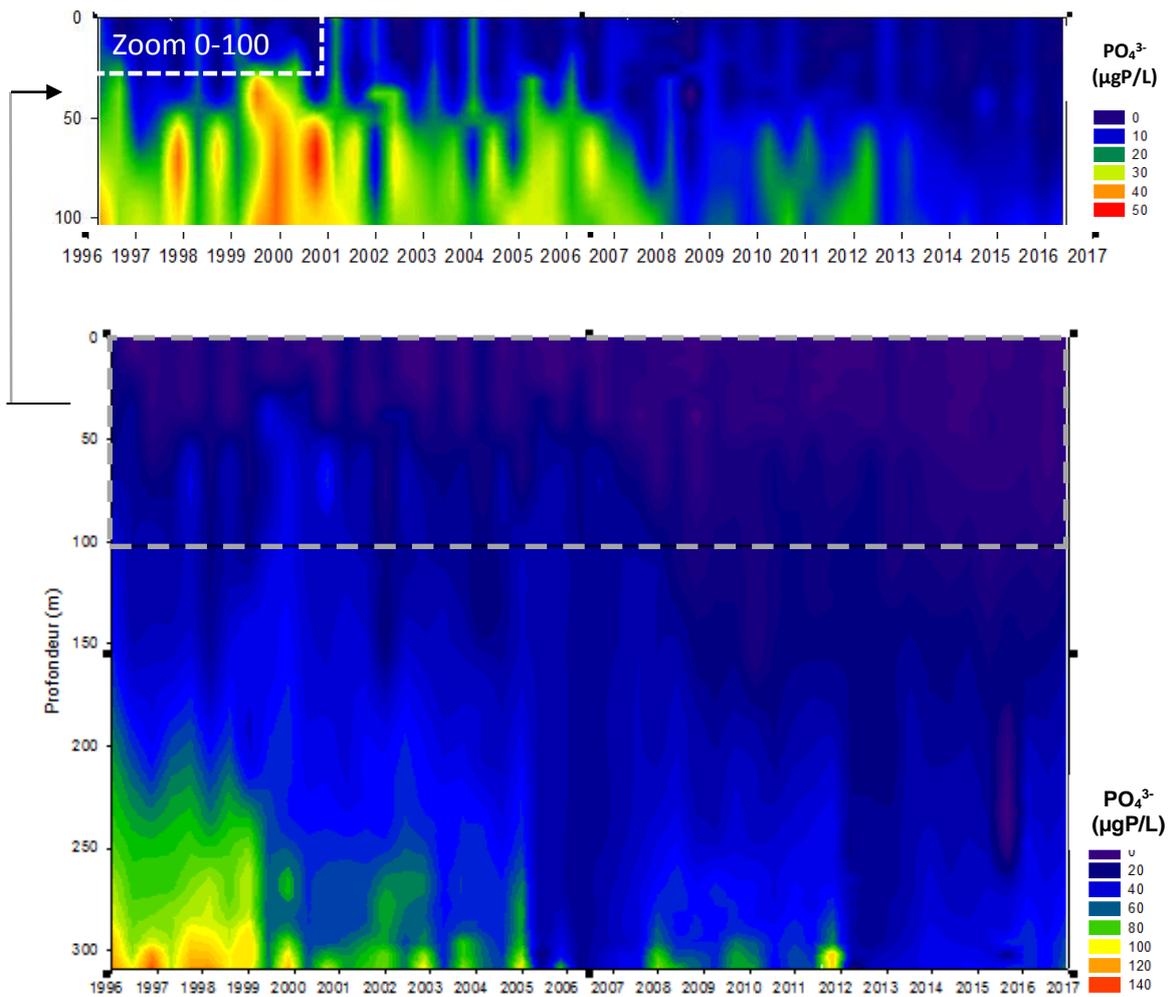


Figure 29 : Evolution de la concentration en phosphore réactif soluble (P-PO₄³⁻) en fonction de la profondeur de 1996 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 29: Change in the concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO₄³⁻) in lake's water as a function of depth from 1996 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La faible concentration en oxygène dissous dans les eaux profondes n'engendre pas d'augmentation significative de la concentration en azote ammoniacal au fond du lac en 2016 par rapport à l'année 2015 (Figure 30).

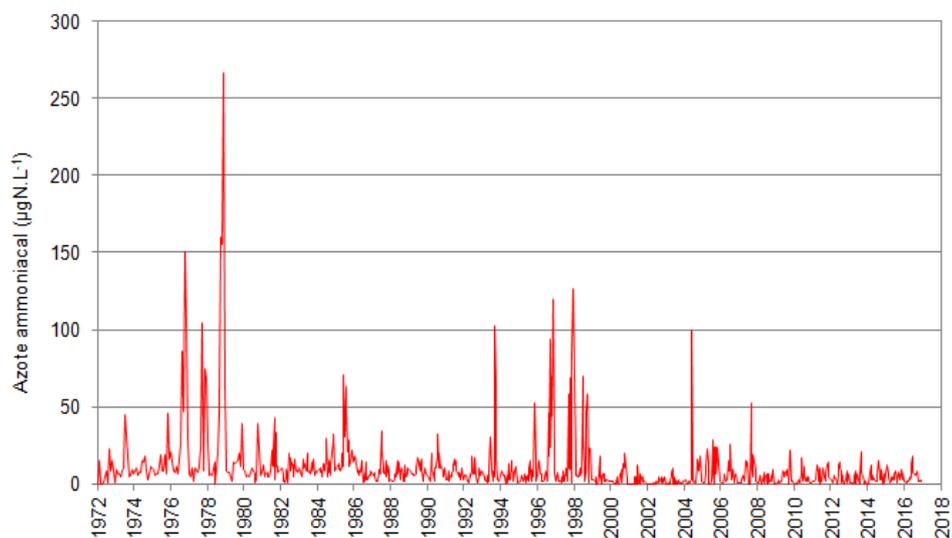


Figure 30 : Evolution de la concentration en azote ammoniacal (N-NH₄⁺) dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 30: Change in the concentration of ammoniacal nitrogen (N-NH₄⁺) in the bottom of lake's water at 309 m from 1972 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

7.1 PHOSPHORE RÉACTIF SOLUBLE ET PHOSPHORE TOTAL

Le stock moyen en phosphore total est stable en 2016 avec 1'643 tonnes de P contre respectivement 1'762 et 1'634 en 2014 et 2015 (Figure 31).

La concentration moyenne annuelle pondérée est égale à $19.1 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$

Le phosphore réactif soluble, c'est-à-dire l'orthophosphate, suit l'évolution du phosphore total entre 2015 et 2016. Le stock n'évolue guère en 2016 avec 1'367 tonnes de P contre 1'359 en 2015. Ainsi, la concentration moyenne annuelle pondérée est de $15.9 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

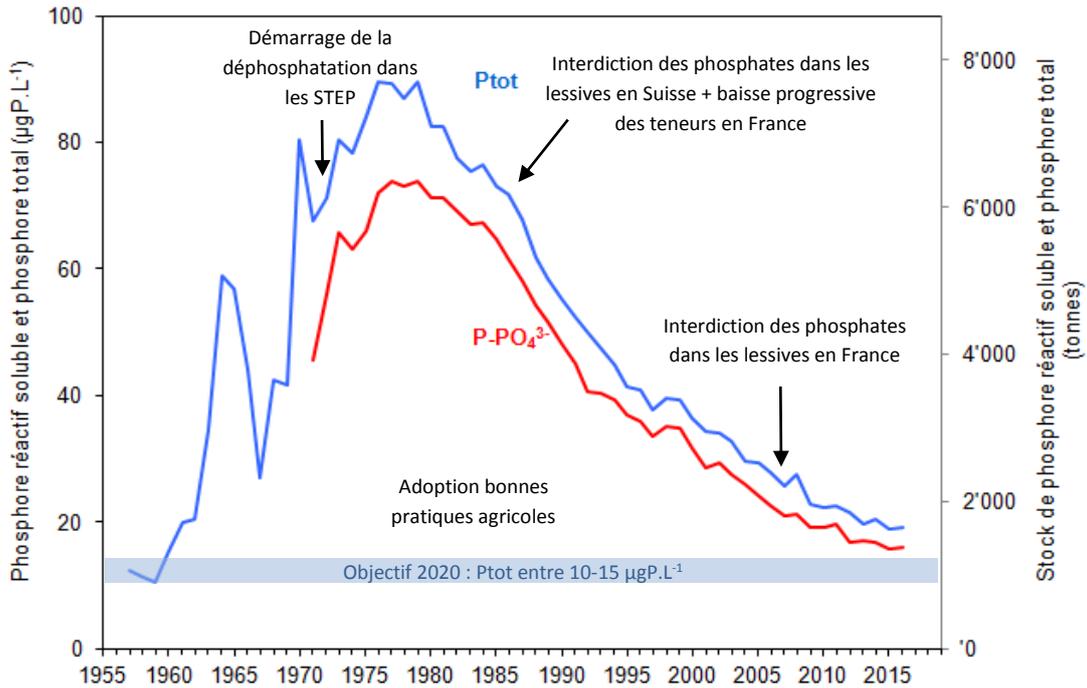


Figure 31 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore réactif soluble et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1957 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 31: 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 1957 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7.2 AZOTE NITRIQUE ET AZOTE TOTAL

En 2016, les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique sont du même ordre que celles de l'année précédente. La concentration moyenne en azote total est de $648 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$, soit un stock de 55'728 tonnes de N. La concentration moyenne annuelle en azote nitrique, quant à elle, est égale à $575 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$, ce qui représente un stock de 49'450 tonnes de N contre $574 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ et 49'364 tonnes en 2015 (Figure 32). Cette teneur en nitrates d'environ $0.58 \text{ mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ dans les eaux du Léman, soit $2.57 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, reste donc conforme à la norme d'eau de consommation en Suisse qui édicte une valeur de tolérance de $40 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ et à la norme française dont la limite de qualité est de $50 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$.

Depuis les années 80, l'évolution du stock d'azote total et nitrique dans le Léman est relativement stable.

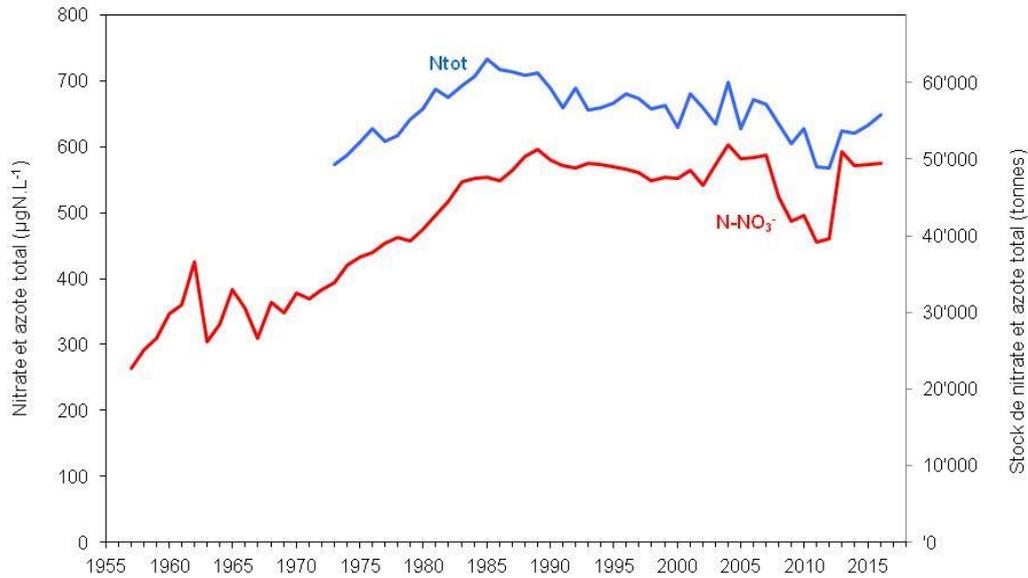


Figure 32 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1957 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 32: Change in the weighted mean annual total concentration and stock of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1957 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7.3 CHLORURE

La concentration des ions chlorures dans le Léman de 1971 à nos jours est en constante augmentation (Figure 33). En 2016, le stock de chlorure est égal à 901'280 tonnes soit une teneur moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.48 mgCl·L⁻¹ contre 894'400 tonnes et 10.40 mg Cl·L⁻¹ en 2015. 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).

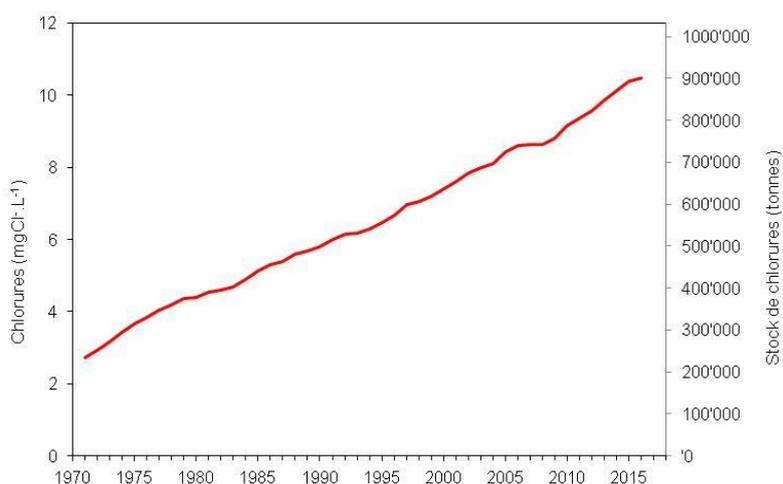


Figure 33 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 33: Change in the weighted mean annual concentration and stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1971 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

8. CONCLUSIONS

L'année climatique 2016 sur les rives du Léman peut être considérée comme relativement chaude avec une température moyenne annuelle de 11.2 °C, normalement venteuse et ensoleillée, et avec une pluviométrie qui présente un excédent de 10.5 % par rapport à la moyenne 1981-2010 avec 1115 mm de précipitations. L'été a été chaud, et les mois d'août et septembre furent particulièrement secs.

Les faits marquants de l'évolution physico-chimique des eaux du Léman en 2016 sont les suivants :

- Le brassage durant l'hiver 2016 a été partiel, jusqu'à environ 70 m, réduisant ainsi la réoxygénation des couches d'eau profondes du Léman et la distribution des nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau ;
- La consommation des nutriments débute en avril et se poursuit jusqu'à atteindre des concentrations en azote nitrique, phosphore et silice à l'état de traces dans les couches épilimniques.
- L'absence de brassage complet depuis 2012, et les mesures pour diminuer l'apport du phosphore au lac ont conduit à une baisse des concentrations de phosphore dans la zone d'activité phytoplanctonique. En revanche, la moyenne annuelle en phosphore total mesurée sur toute la colonne d'eau reste du même ordre que celle de 2015 avec 19.1 µgP.L⁻¹.
- Le relargage du phosphore à partir des sédiments ainsi que la réduction de l'azote nitrique en azote ammoniacal au fond du lac est faible en fin d'année 2016 comme en 2015 et ce malgré plusieurs années successives de brassage partiel qui ont occasionné une réoxygénation limitée des eaux profondes ; Les eaux du fond du lac contiennent néanmoins un stock de phosphore qui pourrait contribuer à un enrichissement ponctuel en cas de brassage total ;
- En 2016, le stock d'azote nitrique dans le lac est un peu plus élevé qu'en 2015, avec 49'450 tonnes de N. Quant au stock de chlorure dans le Léman, il continue d'augmenter mais de façon moins importante en 2016 pour atteindre 901'280 tonnes.

BIBLIOGRAPHIE

- ANNEVILLE, O., LAINE, L. (2017) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2016, 101-108.
- BARBIER, C. et QUETIN, P. (2016) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman (éléments majeurs) et données météorologiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 17-63.
- 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.
- GUMY, D. et DE ALENCASTRO, L.F. (2001) : Origine de la pollution du Léman par le chlorure. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2000, 261-278.
- KLEIN, A. (2017) : Métaux et micropolluants organiques dans les eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2016, 63-80.
- KLEIN, A. (2016) : Les apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève et leur qualité. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 108-114.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- PERGA, M., PERNEY, P. (2017) : Biomasse chlorophyllienne et production primaire dans le Léman, Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut. Campagne 2016, 93-100.
- RAMSEIER GENTILE, S., EDDER, P., KLEIN, A. et LODS-CROZET, B. (2015) : Métaux et micropolluants organiques dans les eaux, les moules et les truites lacustres du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 84-97.
- RIMET, F. (2017) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2016, 81-92.
- VARGAS, S. (2016) Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 217-224.

ANNEXES

Tableau 2A : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2016, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table 2A : Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2016, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Année	Oxygène mg·L ⁻¹	Ptot µgP·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ µgP·L ⁻¹	Ntot µgN·L ⁻¹	Σ Nmin µgN·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ µgN·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ µgN·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ µgN·L ⁻¹	Cl ⁻ mgCl·L ⁻¹	COP µgC·L ⁻¹	NOP µgN·L ⁻¹	Ppart µgP·L ⁻¹	Transparence a 12 mois mètre	Transparence a mai- septembre mètre
1955														
1956														
1957	9,66	12,4			266	0,3	1,0	265					10,80	6,74
1958	10,32	11,2			297	0,9	1,7	294					9,50	5,20
1959	9,59	10,4			312	0,3	1,1	311					9,70	6,74
1960	9,57	15,4			349	1,2	1,1	347					11,10	10,46
1961	9,36	20,0			366	3,4	0,9	362					9,50	8,06
1962	10,33	20,4			392	9,0	1,5	381					9,70	6,80
1963	10,3	34,7			314	6,0	1,5	306					9,80	6,26
1964	10,21	58,8			342	8,8	1,3	332					9,50	7,30
1965	10,25	56,8			391	4,4	1,3	385					9,50	7,10
1966	10,44	43,9			362	4,8	1,4	356					8,10	5,74
1967	9,72	27,0			314	2,1	1,0	311					9,80	6,30
1968	9,43	42,5			372	5,4	0,7	366					10,30	6,52
1969	9,01	41,7			354	4,2	1,1	349					9,60	7,24
1970	9,69	80,5	50,5		383	2,9	1,3	379					8,63	4,86
1971	9,69	67,6	45,6		382	9,0	1,6	371	2,73				9,49	6,02
1972	9,25	71,1	56,3		401	14,6	1,6	385	2,93				8,45	6,88
1973	9,36	80,5	66,1	574	412	13,8	2,4	396	3,16				9,33	5,48
1974	9,12	78,2	63,2	588	438	13,8	1,9	422	3,44				8,46	5,98
1975	8,96	84,0	66,1	606	447	10,6	1,9	434	3,66				7,30	3,78
1976	8,36	89,6	72,3	628	454	11,7	1,4	441	3,84				8,18	4,00
1977	8,31	89,4	74,0	608	468	11,2	1,8	455	4,05				7,95	5,18
1978	8,55	86,8	73,4	617	474	7,0	1,8	465	4,18				7,27	5,64
1979	8,93	89,5	74,0	641	466	5,5	1,5	459	4,35				10,42	5,86
1980	9,06	82,5	71,5	657	485	7,4	1,9	476	4,39				8,88	6,04
1981	9,32	82,6	71,6	688	507	8,0	1,1	498	4,53				8,10	5,80
1982	9,24	77,5	69,5	675	529	8,4	1,2	519	4,60				7,54	5,52
1983	9,19	75,4	67,3	693	560	10,2	1,2	549	4,70				8,23	6,04
1984	9,46	76,4	67,6	706	566	11,2	1,0	554	4,88				7,59	5,55
1985	9,54	73,1	65,0	734	571	14,0	0,6	556	5,12				8,44	4,94
1986	9,83	71,8	61,9	718	558	6,8	1,0	550	5,30	106,7	19,0	3,1	7,50	4,31
1987	9,62	67,7	58,3	713	573	6,6	0,8	566	5,40	72,9	14,0	2,9	8,00	4,70
1988	9,33	61,7	54,5	709	594	5,4	0,9	588	5,60	115,3	17,2	2,5	7,18	5,19
1989	8,65	58,3	51,7	712	605	5,6	0,9	598	5,68	93,3	14,2	2,1	8,85	6,22
1990	8,33	55,3	48,3	689	589	5,8	0,9	582	5,79	101,7	16,4	2,4	7,82	6,08

Année	Oxygène mg·L ⁻¹	Ptot µgP·L ⁻¹	PO43- µgP·L ⁻¹	Ntot µgN·L ⁻¹	Σ Nmin µgN·L ⁻¹	NH4+ µgN·L ⁻¹	NO2- µgN·L ⁻¹	NO3- µgN·L ⁻¹	Cl- mgCl·L ⁻¹	COP µgC·L ⁻¹	NOP µgN·L ⁻¹	Ppart µgP·L ⁻¹	Transparence a 12 mois mètre	Transparence a mai- septembre mètre
1991	8,49	52,3	45,3	660	580	5,9	0,9	572	6,00	91,5	15,1	2,5	7,79	5,86
1992	8,42	49,9	40,8	690	577	5,4	1,2	570	6,16	91,2	17,7	2,8	6,77	5,19
1993	8,29	47,3	40,4	656	581	3,2	0,9	577	6,18	88,1	13,3	2,3	8,24	5,42
1994	8,33	44,8	39,4	660	580	3,9	1,1	575	6,29	83,6	14,0	2,2	7,10	5,87
1995	8,22	41,3	37,0	667	576	3,5	1,2	571	6,47	90,1	13,1	2,3	7,47	5,89
1996	8,27	40,9	36,0	681	575	4,5	1,1	569	6,68	107,4	22,3	2,3	7,17	4,56
1997	8,41	37,7	33,7	673	568	4,2	1,1	563	6,96	107,4	23,1	2,2	8,82	6,73
1998	8,26	39,6	35,2	658	557	5,1	0,9	551	7,06	100,3	22,1	2,2	7,36	5,65
1999	8,79	39,2	34,9	662	560	3,3	0,8	556	7,19	92,3	13,2	2,3	8,99	5,72
2000	9,09	36,5	31,8	629	550	2,9	1,3	546	7,42	109,8	14,7	2,5	7,42	4,96
2001	8,48	34,2	28,8	680	570	1,8	0,8	567	7,60	94,1	12,9	2,3	6,29	5,06
2002	8,45	34,0	29,5	659	547	2,1	0,8	544	7,85	97,1	11,2	2,0	6,78	4,28
2003	8,60	32,8	27,7	634	579	2,4	1,3	575	7,98 ^b	93,8	14,1	2,3	6,70	4,86
2004	9,10	29,5	26,1	698	609	2,0	1,3	605	8,12	94,6	14,9	2,5	7,14	5,95
2005	9,28	29,4	24,1	628	589	2,4	1,6	585	8,44	138,2	22,0	3,0	6,17	5,39
2006	9,80	27,7	22,6	671	591	2,5	1,2	587	8,61	107,5	18,6	2,4	7,01	6,57
2007	8,99	25,7	20,9	665	594	2,7	1,0	590	8,63	114,7	17,6	2,3	6,23	5,11
2008	8,86	27,6	21,4	635	531	3,3	1,5	526	8,65	103,4	11,9	2,1	8,13	6,30
2009	9,30	22,8	19,3	605	492	3,1	1,1	488	8,81	113,9	10,9	1,8	7,90	6,41
2010	9,18	22,4	19,3	628	503	3,0	2,0	498	9,15	110	8,7	2,0	6,83	5,52
2011	8,96	22,6	19,7	570	463	4,1	1,4	457	9,37	86,6	9,7	2,1	6,84	6,42
2012	9,25	21,6	16,9	568	471	5,4	2,5	463	9,56	99,7	10,1	2,6	6,47	4,24
2013	9,20	19,7	17,1	625	597	3,1	1,5	592	9,86	92,5	9,4	2,2	7,98	7,63
2014	8,55	20,5	16,7	620	577	3,6	1,3	572	10,14	95,9	10,7	2,0	7,57	5,83
2015 ^b	8,58	19,0	15,8	633	580	4,6	1,7	574	10,40	101,3	9,0	2,2	8,50	6,83
2016	8,13	19,1	15,9	648	581	4,7	1,4	575	10,48	93,5	8,7	2,0	7,40	6,05

a : Disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm) depuis 2010

b : valeur interpolée

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

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

Année	Oxygène tonnes	Ptot tonnes	P-PO ₄ ³⁻ tonnes	Ntot tonnes	Nmin tonnes	N-NH ₄ ⁺ tonnes	N-NO ₂ ⁻ tonnes	N-NO ₃ ⁻ tonnes	Cl ⁻ tonnes	COP tonnes	Ppart tonnes	Npart tonnes
1955												
1956												
1957	827'900	1'150			22'824	25	109	22'690				
1958	883'900	'960			25'370	75	145	25'150				
1959	822'000	'890			26'733	30	93	26'610				
1960	819'800	1'320			29'931	105	96	29'730				
1961	802'000	1'720			31'370	290	80	31'000				
1962	885'200	1'750			37'527	770	127	36'630				
1963	883'100	2'970			26'839	510	129	26'200				
1964	874'900	5'050			29'275	750	115	28'410				
1965	878'500	4'870			33'459	375	114	32'970				
1966	894'400	3'760			31'071	415	116	30'540				
1967	823'700	2'320			26'887	180	87	26'620				
1968	808'300	3'640			31'888	465	63	31'360				
1969	772'100	3'580			30'403	360	93	29'950				
1970	830'600	6'920			32'804	245	109	32'450				
1971	830'500	5'790	3'910		32'668	770	138	31'760	237'000			
1972	792'400	6'090	4'830		34'426	1255	141	33'030	251'000			
1973	801'900	6'900	5'660	49'180	35'306	1185	201	33'920	271'000			
1974	781'700	6'700	5'420	50'350	37'544	1180	164	36'200	295'000			
1975	767'500	7'200	5'670	51'970	38'292	905	167	37'220	314'000			
1976	716'800	7'670	6'200	53'820	38'916	1000	116	37'800	329'000			
1977	712'100	7'660	6'340	52'140	40'115	960	155	39'000	347'000			
1978	732'300	7'440	6'290	52'860	40'558	595	153	39'810	358'000			
1979	765'500	7'670	6'340	54'970	39'929	470	129	39'330	372'000			
1980	776'200	7'070	6'130	56'270	41'574	635	159	40'780	376'000			
1981	798'600	7'080	6'130	58'970	43'490	680	90	42'720	388'000			
1982	791'600	6'640	5'950	57'830	45'274	720	104	44'450	394'000			
1983	787'600	6'460	5'760	59'360	48'000	875	105	47'020	403'000			
1984	810'200	6'550	5'790	60'500	48'488	965	83	47'440	418'000			
1985	817'600	6'260	5'570	62'970	48'855	1205	50	47'600	439'000			
1986	842'600	6'150	5'300	61'500	47'812	580	72	47'160	454'000	9'138	262	1'630
1987	824'200	5'800	5'000	61'130	49'169	570	69	48'530	462'000	6'247	249	1'203
1988	799'940	5'290	4'665	60'750	50'882	458	74	50'350	480'200	9'882	217	1'472
1989	741'520	4'995	4'430	61'020	51'776	482	74	51'220	486'300	7'993	179	1'220
1990	714'200	4'740	4'145	59'000	50'460	493	77	49'890	496'200	8'715	209	1'400
1991	727'600	4'480	3'880	56'540	49'670	509	81	49'080	514'000	7'840	218	1'292
1992	721'550	4'275	3'495	59'150	49'389	464	105	48'820	528'300	7'811	241	1'515
1993	710'190	4'050	3'460	56'210	49'814	274	80	49'460	529'700	7'548	197	1'142
1994	714'185	3'835	3'380	56'550	49'701	334	92	49'275	538'930	7'166	185	1'203
1995	704'075	3'535	3'170	57'140	49'348	302	101	48'945	554'670	7'722	193	1'123
1996	708'680	3'505	3'085	58'350	49'205	382	93	48'730	572'410	9'205	198	1'913

Année	Oxygène tonnes	Ptot tonnes	P-PO ₄ ³⁻ tonnes	Σ Ntot tonnes	Nmin tonnes	N-NH ₄ ⁺ tonnes	N-NO ₂ ⁻ tonnes	N-NO ₃ ⁻ tonnes	Cl ⁻ tonnes	COP tonnes	Ppart tonnes	Npart tonnes
1997	721'005	3'230	2'885	57'690	48'701	357	94	48'250	596'140	9'207	185	1'981
1998	707'750	3'395	3'020	56'430	47'764	434	80	47'250	604'630	8'596	186	1'897
1999	753'185	3'360	2'990	56'780	48'002	283	64	47'655	615'910	7'905	193	1'134
2000	778'880	3'130	2'725	53'910	47'815	250	115	47'450	635'650	9'413	212	1'263
2001	726'525	2'930	2'465	58'270	48'818	152	66	48'600	651'600	8'065	197	1'105
2002	724'005	2'915	2'530	56'460	46'875	178	67	46'630	672'320	8'322	172	'962
2003	737'325	2'805	2'370	54'310	49'550	206	114	49'230	684'220 ^b	8'034	200	1'205
2004	779'535	2'530	2'235	59'790	52'161	174	107	51'880	696'130	8'108	217	1'280
2005	795'590	2'520	2'065	53'820	50'453	210	133	50'110	722'920	11'840	253	1'888
2006	839'395	2'370	1'940	57'460	50'589	211	98	50'280	738'040	9'210	204	1'594
2007	770'580	2'205	1'795	57'010	50'890	232	88	50'570	739'090	9'826	198	1'506
2008	759'470	2'370	1'835	54'420	45'464	285	129	45'050	740'860	8'864	177	1'018
2009	797'005	1'955	1'650	51'860	42'189	262	97	41'830	754'990	9'761	154	935
2010	787'035	1'915	1'650	53'710	43'143	258	175	42'710	784'240	9'429	175	749
2011	767'596	1'938	1'684	48'805	39'667	355	116	39'196	802'776	7'424	176	832
2012	792'869	1'853	1'445	48'710	40330	463	212	39'655	819'208	8'575	224	868
2013	790'941	1'696	1'467	53'708	51'342	270	133	50'939	848'029	7'952	191	808
2014	735'593	1'762	1'438	53'299	49'603	309	114	49'180	872'189	8'248	173	916
2015 ^b	737'880	1'634	1'359	54'438	49'880	396	146	49'364	894'400	8'712	189	774
2016	699'180	1'643	1367	55'728	49'966	404	120	49'450	901'280	8'041	172	748

b : valeurs interpolées

Tableau 4A : Incertitudes élargies des principales analyses physico-chimiques

Table 4A : Expanded uncertainties of main physico-chemical analysis

Paramètre	Unité	Incertitude élargie * U (%)
pH		0.5
TAC	meq·L ⁻¹	4
χ	S·cm ⁻¹	4
NO ₃ ⁻	µgN·L ⁻¹	8
NO ₂ ⁻	µgN·L ⁻¹	3
NH ₄ ⁺	µgN·L ⁻¹	8
Ntot	µgN·L ⁻¹	9
NOP	µgN·L ⁻¹	6
PO ₄ ³⁻	µgP·L ⁻¹	9
Ptot	µgP·L ⁻¹	8
Ppart	µgP·L ⁻¹	8
COP	µgC·L ⁻¹	3
Cl ⁻	mgCl ⁻ ·L ⁻¹	5
SiO ₂	mgSiO ₂ ·L ⁻¹	6

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

ANNEXE SUITE

MÉTÉOROLOGIE

WEATHER

1. INTRODUCTION

Le réseau de mesure est constitué des stations climatiques de l'Institut suisse de Météorologie de Genève-Cointrin, Changins, Pully et du laboratoire de l'INRA de Thonon-les-Bains. Les paramètres climatiques examinés sont : la température de l'air, la pluviométrie, le rayonnement global, le vent et la Rose des vents à Changins (calculée par Météo Suisse). Depuis 2003, les unités du rayonnement global et de la vitesse du vent ont été conservées afin de faciliter les comparaisons avec les rapports des campagnes précédentes. Conformément aux recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui considère les moyennes sur trente ans comme étant les valeurs « Normales », les paramètres seront comparés à leurs moyennes inter-stations sur la période 1981 - 2010.

2. TEMPÉRATURE DE L'AIR

En 2016, les températures des mois de janvier et février ainsi que celles d'août et septembre peuvent être classifiées comme chaudes. Octobre, décembre et dans une moindre mesure mars, avril et mai furent inférieurs à leur moyenne inter-stations sur la période 1981 - 2010. (tableau 1.1, figure 1.1).

Tableau 1.1 : Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2016 (°C).

Table 1.1 : Mean monthly air temperature for each station in 2016 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	4.2	4	4.7	4.7	2.2
Février	5.0	4.7	5.1	5.3	2.9
Mars	5.7	5.8	6.1	5.9	6.5
Avril	10.0	9.6	9.9	9.8	9.9
Mai	13.3	13.0	13.5	13.2	14.4
Juin	17.7	17.3	17.6	17.7	17.7
Juillet	20.8	20.7	20.9	21.0	20.1
Août	20.4	20.5	20.7	20.5	19.7
Septembre	18.0	18.0	18.3	18.1	15.8
Octobre	9.9	10.0	10.4	10.6	11.5
Novembre	6.2	6.0	6.8	6.8	6.0
Décembre	1.4	1.5	2.8	2.8	3.3
Moyenne annuelle	11.1	10.9	11.4	11.4	10.8

En 2016, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.2 °C. Avec cette température, l'année 2016 se classe au 12^e rang (la plus chaude étant 1994 avec 11.9 °C et la plus fraîche 1985 avec 9.4 °C) de la période 1980 - 2016. (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	1999	11.0
1982	10.6	2000	11.6
1983	10.4	2001	11.0
1984	9.7	2002	11.5
1985	9.4	2003	11.7
1986	10.0	2004	11.0
1987	10.1	2005	10.6
1988	10.9	2006	11.3
1989	11.0	2007	11.4
1990	11.2	2008	10.9
1991	10.4	2009	11.3
1992	10.9	2010	10.3
1993	10.4	2011	11.8
1994	11.9	2012	11.1
1995	10.9	2013	10.3
1996	10.2	2014	11.7
1997	11.1	2015	11.7
1998	11.0	2016	11.2

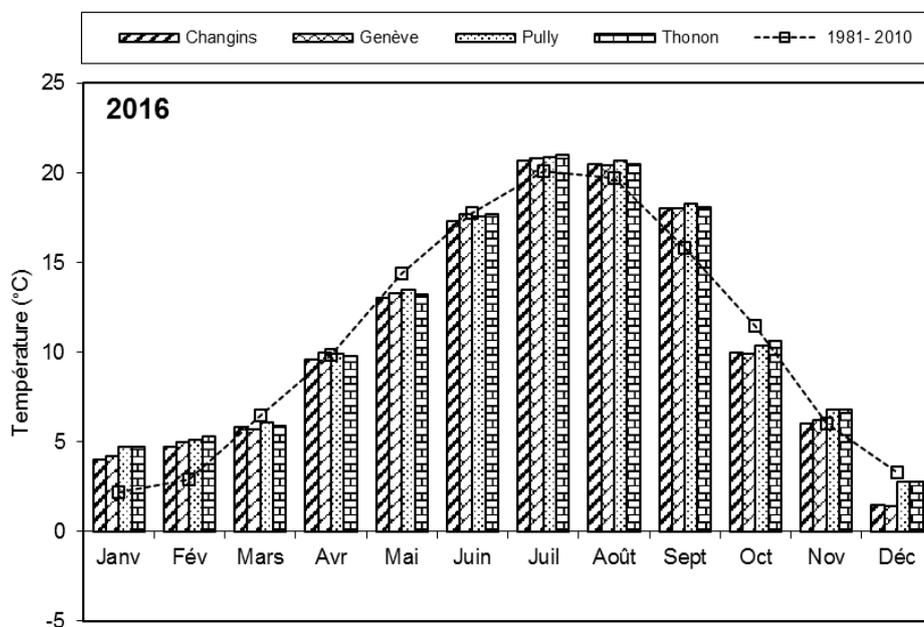


Figure 1.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2016 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1.1 : Mean monthly air temperature at each station in 2016 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

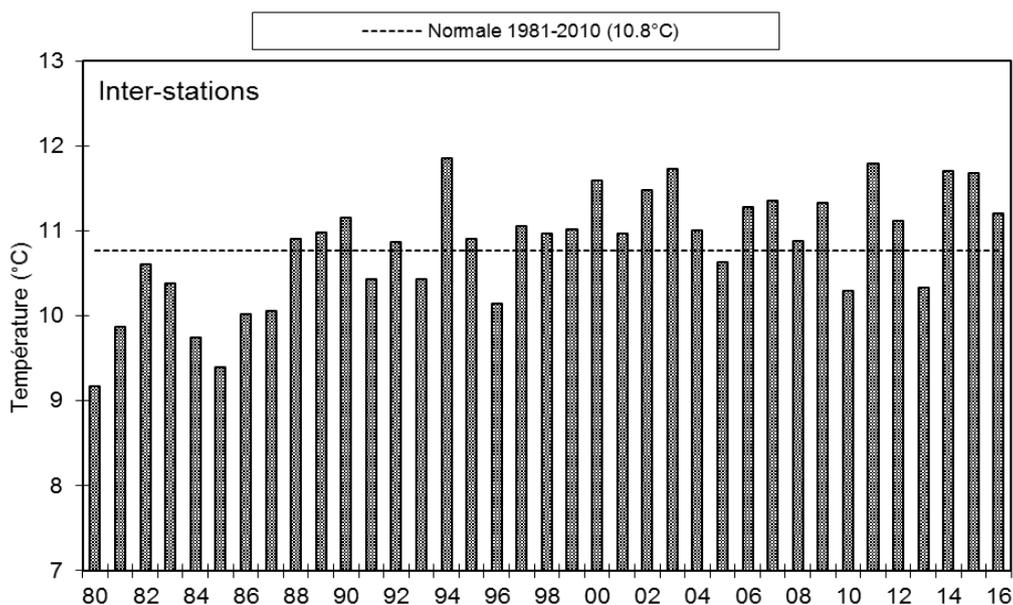


Figure 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

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

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2016 sur le bassin lémanique est de 1'115 mm, soit 100 mm supérieur à la normale inter-stations (1'008.9 mm) relevée sur les 4 stations entre 1981 et 2010. Ce qui donne pour l'année 2016 un excédent de 10.5 % par rapport à la normale 1981 - 2010. Pully est la station la plus arrosée avec 1'364.1 mm, Genève avec 885.4 mm à les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Les mois d'août, septembre et décembre furent particulièrement secs.

Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2016.

Table 2.1 : Monthly rainfall (mm) at each station in 2016.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	165.5	185.2	183.3	148	72.9
Février	81.7	116.5	104.2	102	60.8
Mars	38.9	41.3	70.6	60.5	68.5
Avril	93.5	110.4	134.8	136.5	73.5
Mai	76.7	114.8	152.5	112.5	92.8
Juin	132.6	129	141.6	135	94.3
Juillet	63.3	75.8	177	125.5	83.8
Août	21.1	22.4	66.8	34	86.6
Septembre	33.2	40.2	74.4	67	99.0
Octobre	89.7	94.3	125.7	112	102.5
Novembre	89	128.5	133.2	119	83.0
Décembre	0.2	0.1	0	0	88.9
Total annuel	885.4	1058.4	1364.1	1152.0	1'008.9

En inter-stations, l'année 2016 se classe au 8e rang (sur 36) de la chronologie pluviométrique 1980 - 2016 (le 1er étant 2001 avec 1'298 mm, le dernier étant 1989 avec 661 mm) (tableau 2.2, figure 2.2).

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

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

Années	Pluviométrie total annuel	Années	Pluviométrie total annuel
1981	1'082.8	1999	1'266.0
1982	1'037.5	2000	1'028.2
1983	1'022.3	2001	1'298.7
1984	911.8	2002	1'169.5
1985	957.1	2003	760.6
1986	964.2	2004	980.0
1987	1'044.8	2005	775.1
1988	1'078.0	2006	1'069.2
1989	660.7	2007	1'135.7
1990	1'093.9	2008	1'047.8
1991	860.3	2009	849.9
1992	1'057.8	2010	815.5
1993	1'060.5	2011	750.1
1994	1'124.1	2012	1'092.3
1995	1'194.7	2013	1'219.0
1996	972.8	2014	1'068.1
1997	1'022.9	2015	808.7
1998	924.6	2016	1115.0

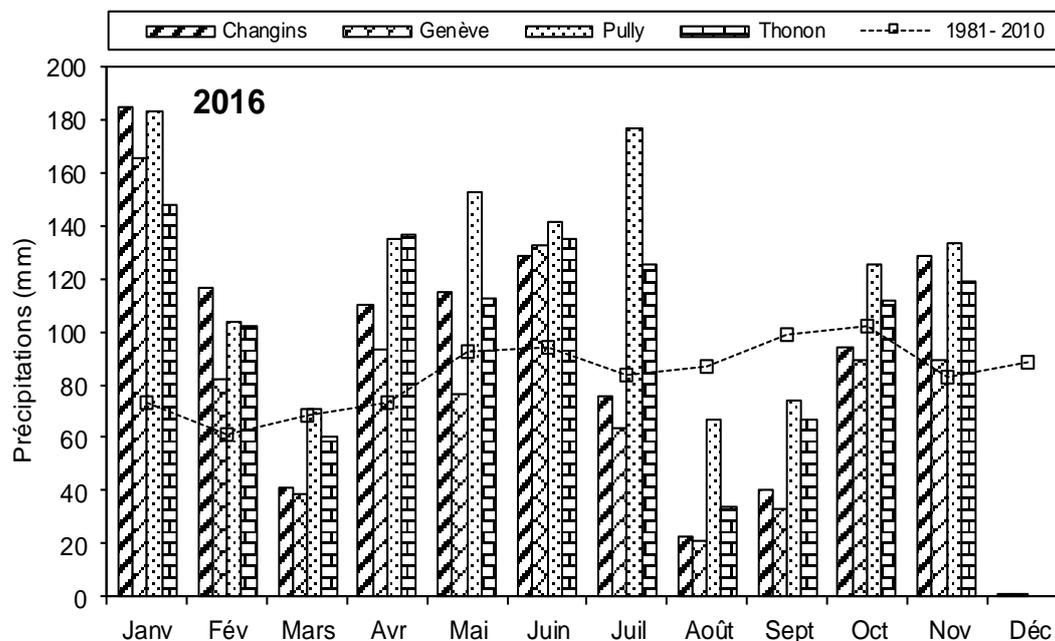


Figure 2.1 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2016 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 2.1 : Monthly rainfall at each station in 2016 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

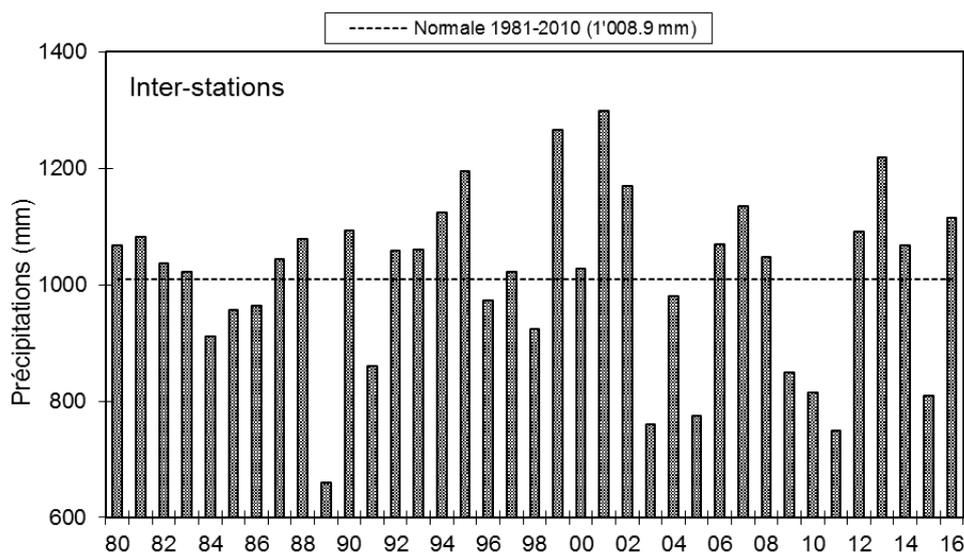


Figure 2.2 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

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

4. INSOLATION

Le deuxième semestre de l'année 2016 fut particulièrement ensoleillé, surtout les mois de juillet, aout et septembre (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Insolation mensuelle à chaque station en 2016 (h).

Table 3.1 : Monthly insolation at each station in 2016 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	56	63	59	55	62.4
Février	43	48	42	46	90.7
Mars	156	164	163	159	156.4
Avril	131	142	136	145	182.1
Mai	188	186	196	226	208.1
Juin	191	180	180	232	236.7
Juillet	301	297	287	304	258.6
Août	287	287	284	271	236.8
Septembre	228	234	218	204	183.6
Octobre	122	138	137	107	120.0
Novembre	72	79	65	56	69.2
Décembre	44	70	78	36	49.8
Total annuel	1'821	1'887	1'844	1'839	1'841.5

L'année 2016 avec une moyenne inter-stations de 1'848 heures est une année moyennement ensoleillée. Elle se classe 19^e sur la période 1980 - 2016 (la 1^e étant 2003 avec 2'290 h, la dernière étant 1987 avec 1'442 h) (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	1999	1'770.1
1982	1'730.8	2000	1'998.9
1983	1'635.7	2001	1'837.6
1984	1'713.3	2002	1'828.6
1985	1'829.2	2003	2'290.5
1986	1'611.0	2004	2'000.1
1987	1'442.5	2005	2'138.4
1988	1'652.7	2006	1'992.4
1989	1'864.4	2007	2'096.7
1990	1'973.2	2008	1'961.9
1991	1'870.0	2009	2'028.4
1992	1'676.1	2010	1'817.3
1993	1'669.2	2011	2'203.0
1994	1'707.5	2012	2'008.4
1995	1'896.5	2013	1'813.2
1996	1'769.3	2014	1'902.8
1997	1'948.4	2015	2'028.6
1998	1'981.7	2016	1'847.7

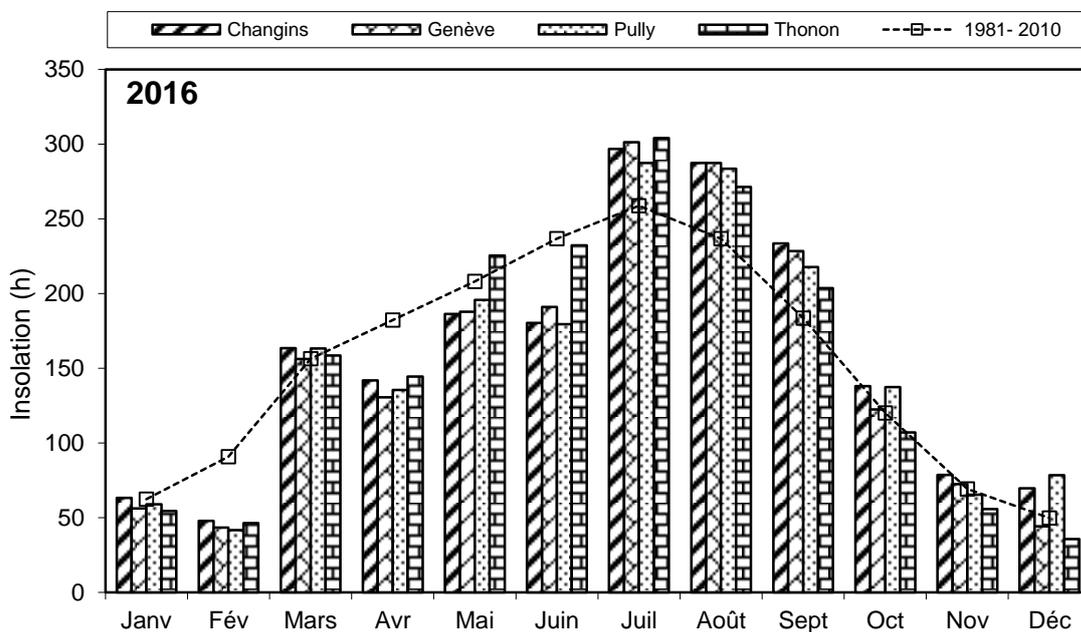


Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2016 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3.1 : Monthly insolation at each station in 2016 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

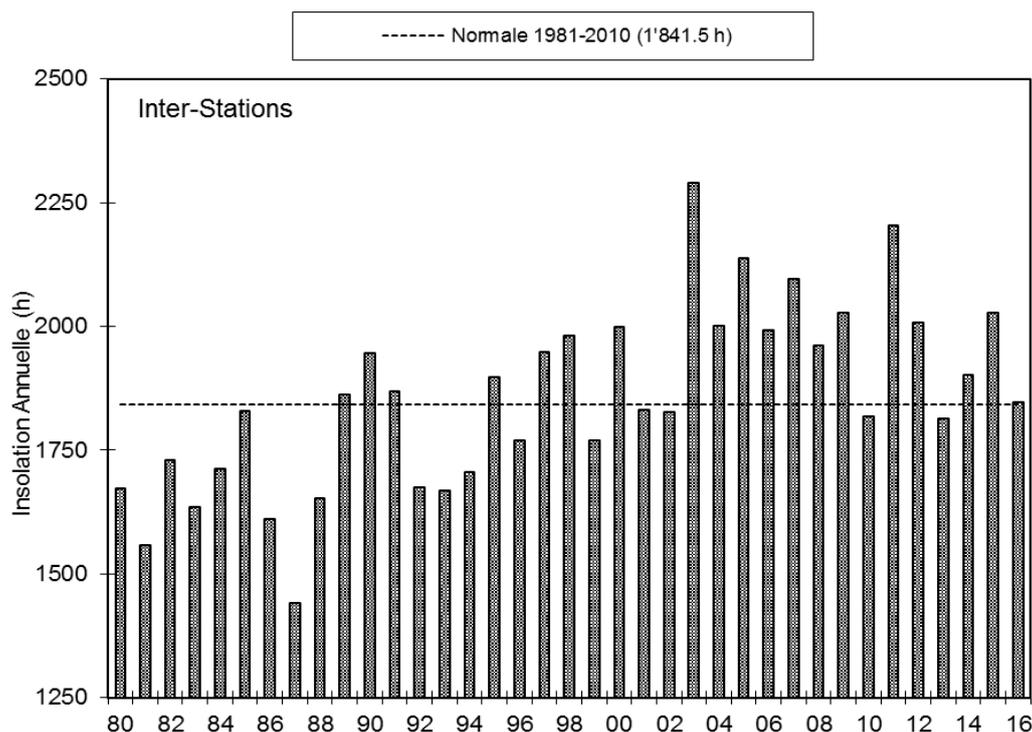


Figure 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations.

Figure 3.2 : Annual insolation at the inter-stations.

5. RAYONNEMENT

Les stations de Genève, Changins, Pully et Thonon sont équipées pour la mesure du rayonnement global (tableau 4.1, figure 4.1).

La moyenne inter-stations pour l'année 2016 est de $12.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Tableau 4.1 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2016 (moyenne journalière en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

Table 4.1 : Global monthly solar irradiation at each station in 2016 (mean daily irradiation in $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	3.9	3.9	4.0	3.3	3.6
Février	5.4	5.4	4.9	4.4	6.5
Mars	12.4	12.4	12.4	11.3	11.2
Avril	14.7	14.6	14.0	13.2	15.6
Mai	19.9	19.0	18.8	19.0	18.8
Juin	21.3	20.5	19.7	20.4	21.3
Juillet	24.4	23.9	22.8	23.4	21.3
Août	21.6	20.9	20.6	20.0	18.2
Septembre	16.3	16.0	14.7	14.4	13.4
Octobre	8.4	8.6	8.8	7.1	7.9
Novembre	4.7	4.8	4.5	3.8	4.3
Décembre	2.9	3.5	4.3	2.5	2.9
Moyenne Annuelle	13.0	12.8	12.5	11.9	12.04

Pour l'inter-stations en 2016, le rayonnement global annuel obtenu est de 4'584. MJ·m⁻², ce qui classe l'année, 11^e sur la période 1981 - 2016 (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	1999	4'188
1982	4'391	2000	4'488
1983	4'239	2001	4'310
1984	4'274	2002	4'337
1985	4'485	2003	4'894
1986	4'178	2004	4'858
1987	3'956	2005	4'712
1988	4'139	2006	4'593
1989	4'325	2007	4'671
1990	4'401	2008	4'486
1991	4'415	2009	4'837
1992	4'219	2010	4'575
1993	4'126	2011	5'000
1994	4'100	2012	4'747
1995	4'339	2013	4'547
1996	4'310	2014	4'653
1997	4'405	2015	4'869
1998	4'378	2016	4'584

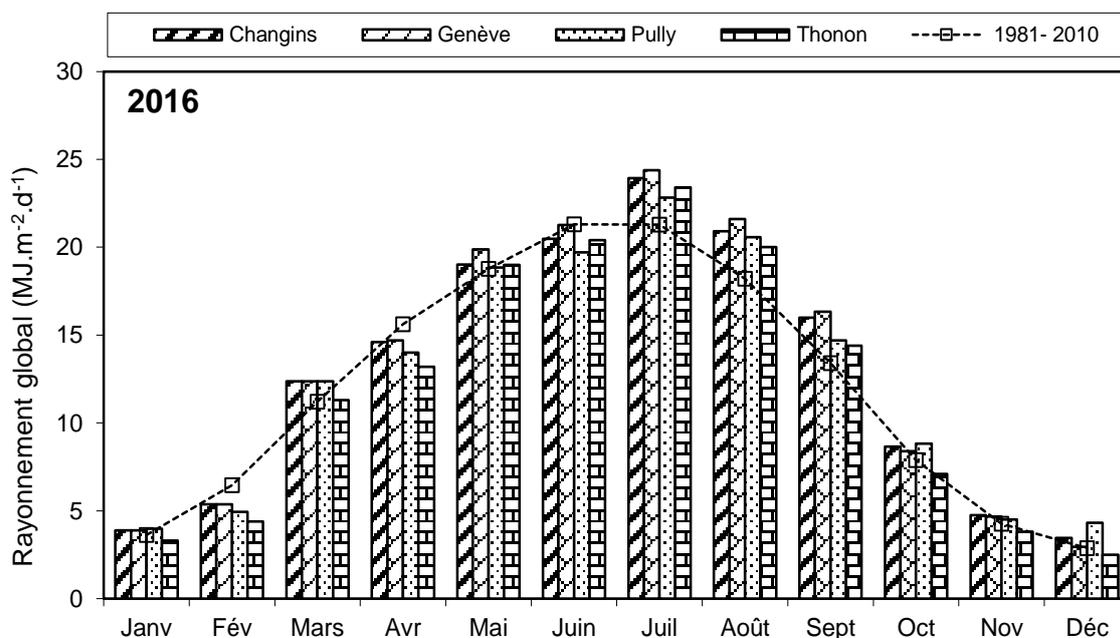


Figure 4.1 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2016 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 4.1: Mean monthly global solar irradiation at each station in 2016 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

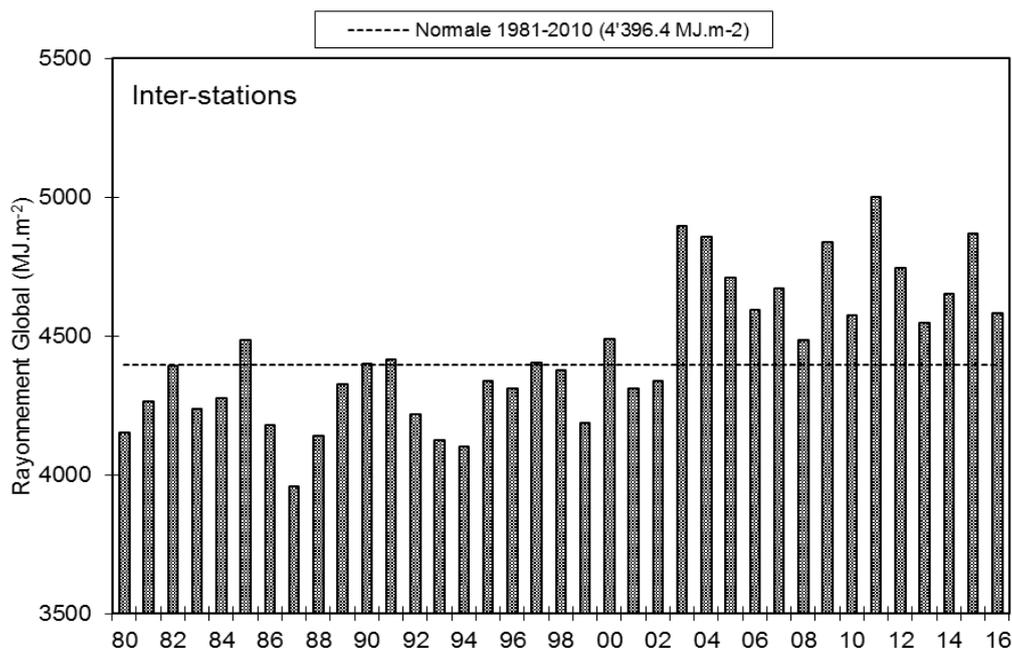


Figure 4.2 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ·m⁻²).

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

6. VENT

6.1 VITESSE DU VENT

En 2016 à Changins, station de référence, le 1^{er} trimestre fut venteux, par contre le mois de décembre fut plutôt calme. Le reste de l'année la vitesse du vent est dans la moyenne de la période 1981-2010. (Tableau 5.1, figure 5.1 et tableau 5.2).

Tableau 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2014 (m·s⁻¹)

Table 5.1 : Mean monthly wind speeds in 2014 (m·s⁻¹).

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

Pour l'année 2016 à Changins, il a été enregistré 21 jours de vent fort ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) dont 14 (+1) jours durant le 1^{er} trimestre (figure 5.2). Le maximum de vent moyen journalier a été relevé pour l'année 2016 le 23 mars (avec 9.42 m.s^{-1}). De plus, il y a eu en 2016, 3 jours où la vitesse du vent a été enregistrée à 4.99 m.s^{-1} (que l'on peut intégrer au nombre de jours à vent fort, car les données de vent sont fournies arrondies et en km/h).

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

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

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

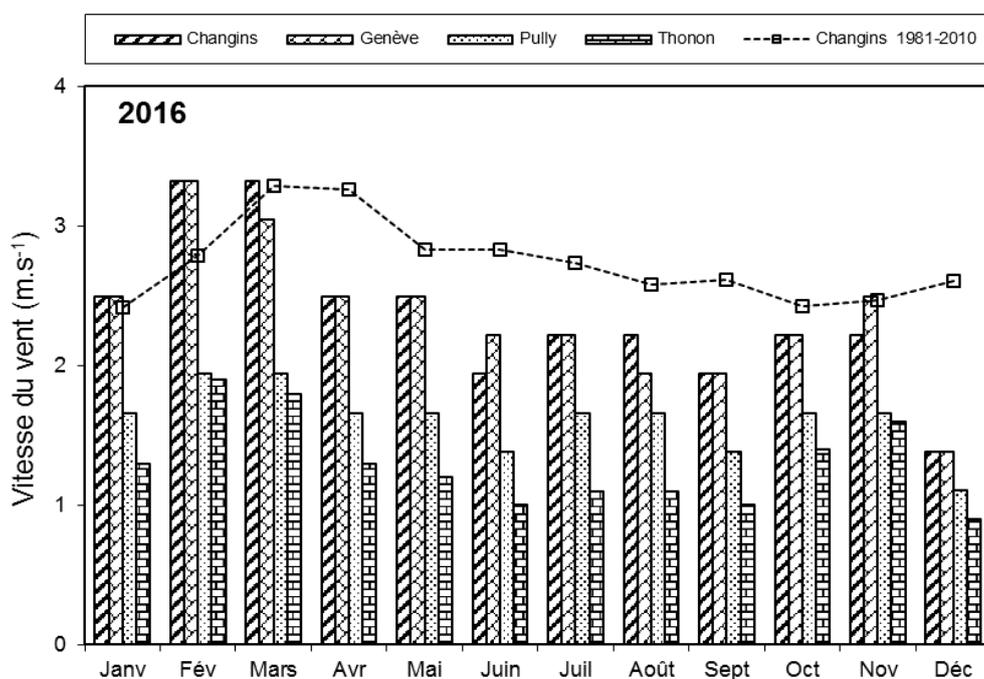


Figure 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2016 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5.1 : Mean monthly wind speeds at each station in 2016 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

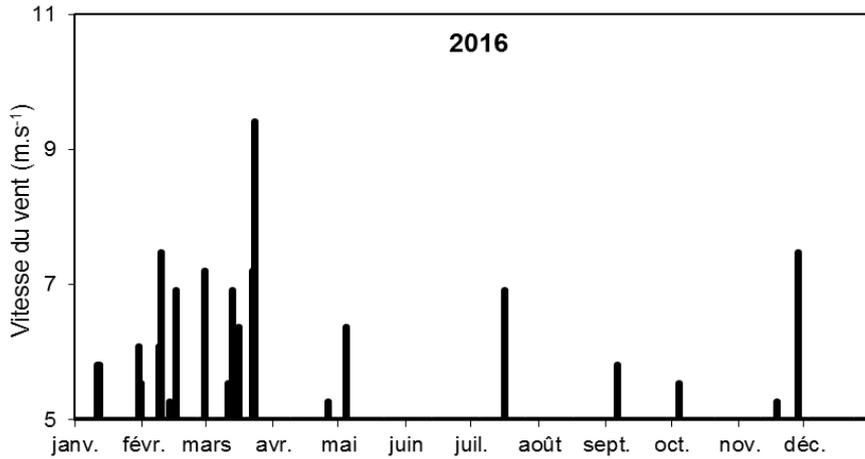


Figure 5.2 : Répartition annuelle (en 2016) des vents forts (> 5 m·s-1) à Changins.

Figure 5.2: Annual distribution (in 2016) of strong winds (> 5 m·s-1) at Changins.

6.2 ROSE DES VENTS

Pour l'année 2016 à Changins, 60 % des vents (figure 5.3) se répartissent principalement selon le demi-cercle S-O-N. Les vents qui sont supérieurs à 5 m·s⁻¹ représentent 12.4% des vents totaux, 52.4 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 31.5 % sont d'origine opposée S-O.

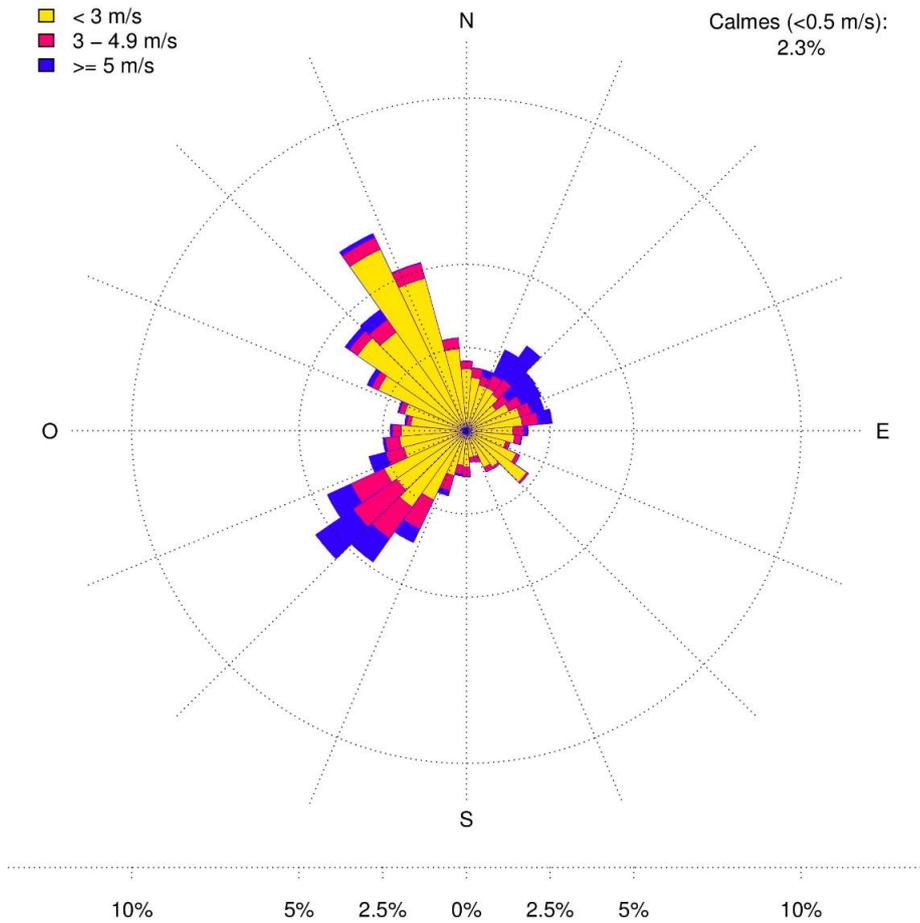


Figure 5.3 : Rose des vents moyens à Changins en 2016 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle : % d'occurrence).

Figure 5.3: Wind directions at Changins in 2016 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).