

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 2015

PAR

Christine BARBIER et Philippe QUETIN

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

RÉSUMÉ

L'année climatique 2015 sur les rives du Léman peut être considérée comme chaude et ensoleillée, faiblement venteuse, avec une pluviométrie de 808.7 mm de précipitations qui présente un déficit de 20 % par rapport à la moyenne 1981-2010. L'été a été très chaud et sec.

L'hiver 2015 a donné lieu à un brassage partiel de la colonne d'eau jusqu'à 140 m réduisant la réoxygénation des couches d'eau profondes du Léman et la distribution des nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau. Le relargage du phosphore à partir des sédiments ainsi que la réduction de l'azote nitrique en azote ammoniacal au fond du lac sont peu marqués en fin d'année 2015 tel qu'en 2014.

*La reprise précoce de l'activité phytoplanctonique en mars conduit à la diminution des nutriments conjointement à l'augmentation de la matière organique particulaire. Cette année a été marquée par la présence de biomasses importantes du fait de la présence marquée de *Mougeotia gracillima*.*

En 2015, le stock d'azote nitrique dans le lac est un peu plus élevé qu'en 2014, avec 49'880 tonnes de N.

La concentration moyenne en phosphore total semble poursuivre sa tendance générale à la baisse avec une valeur annuelle moyenne de 19.0 µgP.L⁻¹ (19.7 et 20.5 µgP.L⁻¹ en 2013 et 2014, respectivement) ;

Le stock de chlorure dans le Léman continue d'augmenter et atteint 894'400 tonnes en 2015.

ABSTRACT

The climate year 2015 on the banks of Lake Geneva can be seen to have been hot and sunny, slightly breezy, with rainfall of 808.7 mm precipitation, which is a deficit of 20% by comparison with the 1981-2010 average. The summer was very hot and dry.

Winter 2015 gave rise to a partial mixing in the water column down to a depth of 140 m reducing re-oxygenation of the deep layers of water in the lake and the distribution of nutrients in the entire water column. The release of phosphorus from the sediments as also the reduction in nitrate and ammoniac nitrogen at the bottom of the lake was not very significant for the end of year 2015 nor for the end of 2014.

*The early resumption of phytoplankton activity in March led to the diminution of nutrients at the same time as the increase in certain organic matter. This year was marked by the presence of considerable biomasses as a result of a significant presence of *Mougeotia gracillima*.*

In 2015, the quantity of nitrate nitrogen in the lake increased slightly by comparison with 2014, with 49,880 tonnes of N.

The average concentration of total phosphorus appears to continue the general tendency to decrease with an annual value of 19.0 µgP.L⁻¹ (19.7 and 20.5 µgP.L⁻¹ in 2013 and 2014 respectively).

The quantity of chlorine in Lake Geneva continues to increase and reached 894,400 tonnes in 2015.

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats du suivi physico-chimique du Léman en 2015, plus précisément du Grand Lac à la station SHL2. 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) est décrite.

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

L'ensemble des conditions météorologiques de l'année 2015 (température de l'air, pluviométrie, insolation, rayonnement global et vents) est intégrée 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.

2. METHODES

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

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

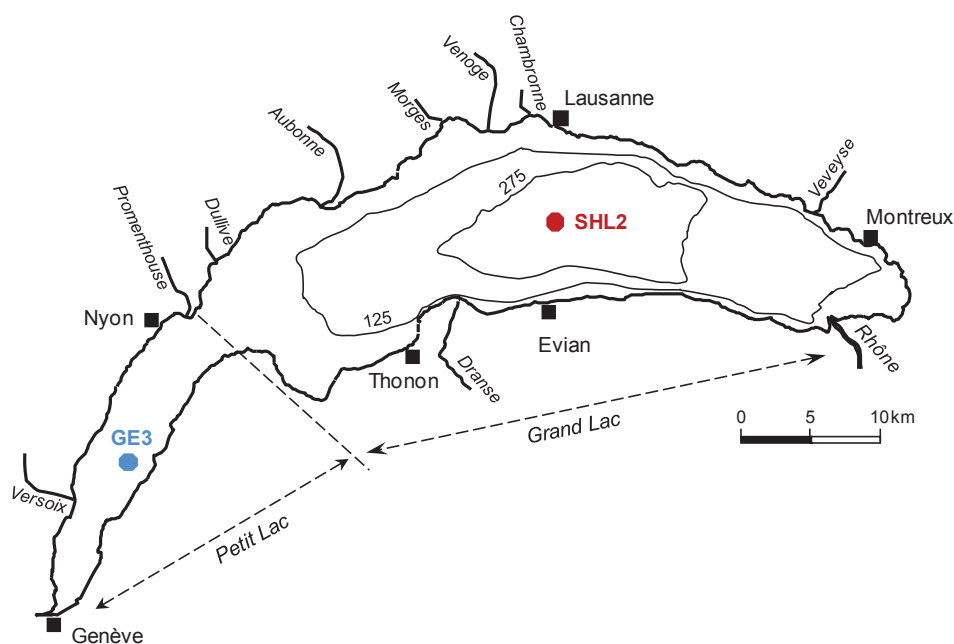


Figure 1 : Situation des points de prélèvement sur le Léman

Figure 1 : Location of the sampling stations in lake Geneva

La station SHL2 est admise comme représentative du Grand Lac au point de vue physico-chimique quant à l'évolution à long terme (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 : le suivi est réalisé à une fréquence mensuelle en hiver (de décembre à février) et bi-mensuelle en période d'activité phytoplanctonique (de mars à novembre).

Il y a eu 19 campagnes de prélèvements en 2015, 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	27.01.2015
2	19.02.2015
3	09.03.2015
4	23.03.2015
5	13.04.2015
6	29.04.2015
7	11.05.2015
8	28.05.2015
9	18.06.2015
10	29.06.2015
11	16.07.2015
12	05.08.2015
13	18.08.2015
14	09.09.2015
15	05.10.2015
16	26.10.2015
17	16.11.2015
18	02.12.2015
19	17.12.2015

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 des 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 des écarts toujours inférieurs à 2 m par rapport à la profondeur théorique et une variabilité allant de 0 à 4 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 deux fois par an par des analyses inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. Les résultats obtenus en 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 « INRA » (disque blanc d'un diamètre de 30 cm) et normalisé (disque noir et blanc, 20 cm). De 1957 à mi-2009, cette mesure était effectuée uniquement avec le disque de Secchi non-normalisé. Une comparaison de la transparence entre les deux types de disque de Secchi a été présentée dans les précédents rapports d'activité (SAVOYE et al., 2015). L'analyse par régression linéaire montre que les valeurs obtenues pour les deux types de disques sont significativement corrélées ($R^2 = 0,93$; $n > 100$).

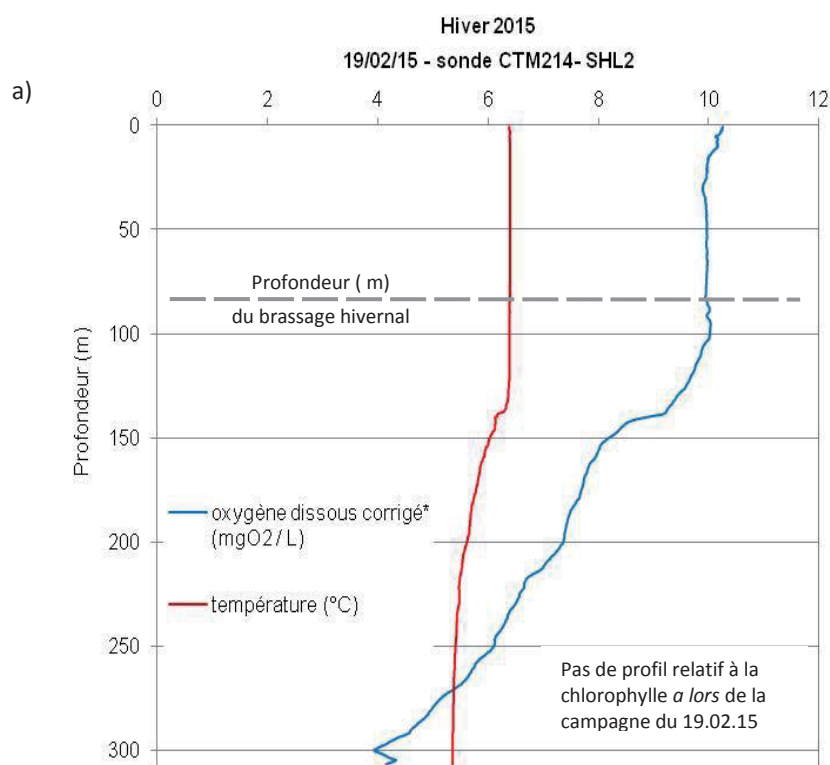
3. RÉGIME THERMIQUE : INFLUENCE SUR LA STRATIFICATION ET LE MÉLANGE DES EAUX

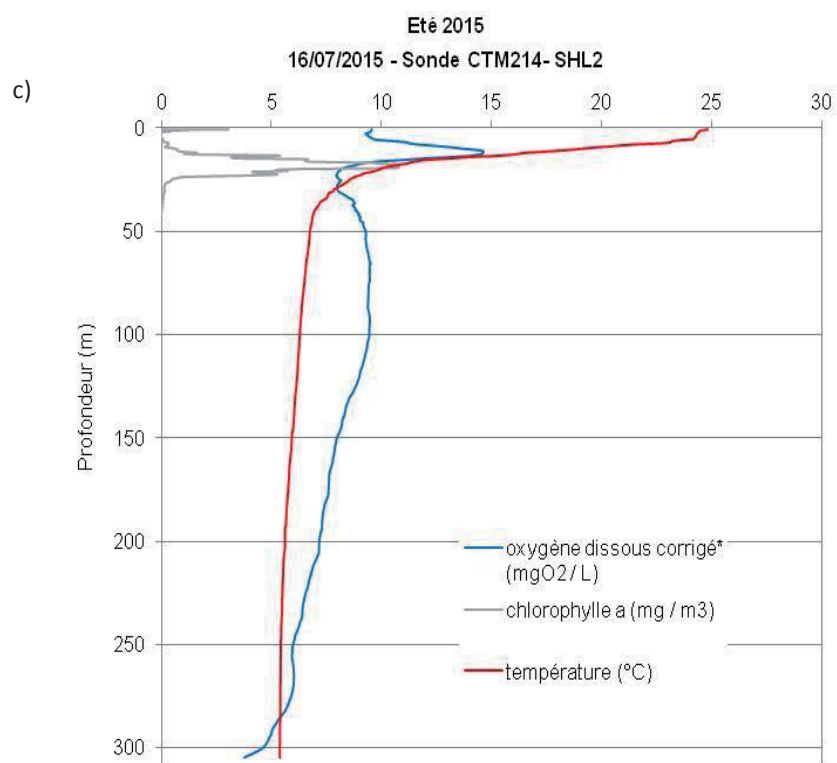
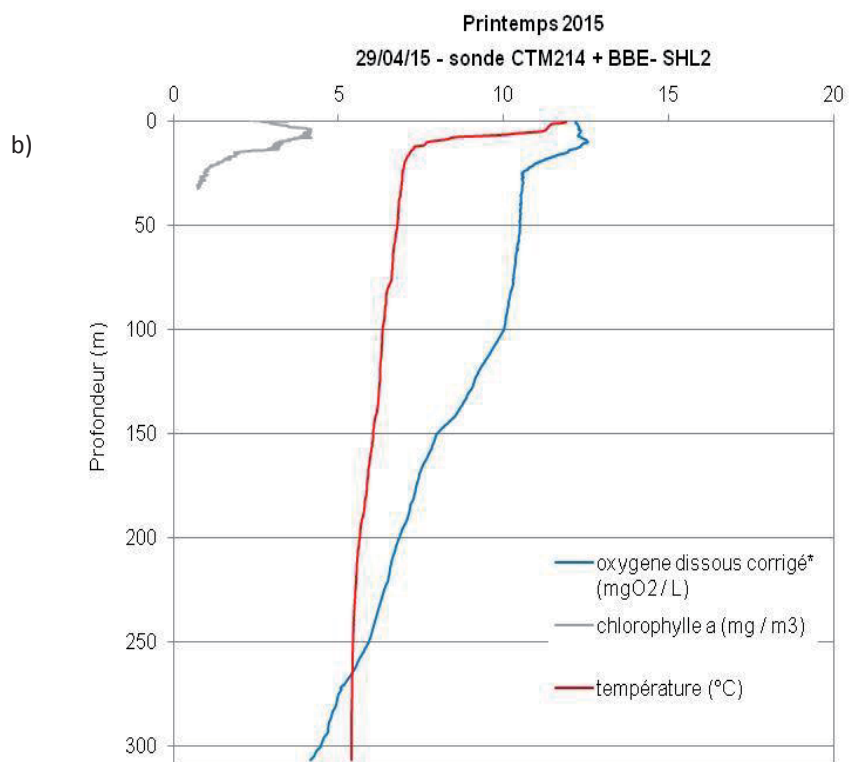
Les températures des mois d'été (juin, juillet, août) sont plus élevées que les moyennes inter-stations, l'été 2015 peut être considéré comme chaud (Annexe V).

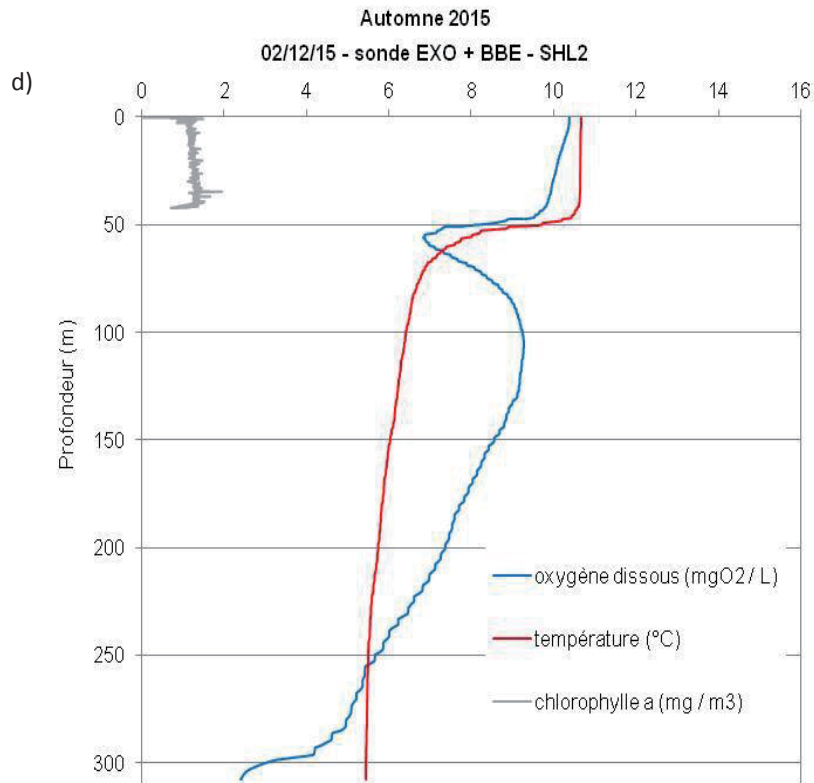
En 2015, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.7 °C, soit la même qu'en 2003.

Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 5.4 °C le 27 janvier 2015 soit 0.2 et 0.1 °C de plus qu'en 2013 et 2014, respectivement. Les conditions météorologiques de l'hiver 2015, n'ont pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. D'après les campagnes de suivi du Léman, un brassage partiel a eu lieu jusqu'à 140 m de profondeur à la date du 19 février 2015 (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 février lors du brassage partiel maximal est égale à 3.94 mgO₂·L⁻¹.

Au printemps, les couches superficielles se réchauffent rapidement. Une stratification thermique précoce (9 mars 2015) se met en place induisant une reprise avancée de l'activité phytoplanctonique (PERGA et al, 2016) qui permet une augmentation de l'abondance phytoplanctonique au cours du printemps et conduit au pic d'oxygène épilimnique (Figure 2b). La température maximale en surface est observée le 16 juillet 2015 avec 24.8 °C contre 21.8 °C à la même période de l'année précédente. Ces températures estivales élevées sont probablement dues à un été exceptionnellement chaud en 2015 (Figure 2c). L'arrivée de l'automne engendre une destratification thermique de la masse d'eau et (Figure 2d). La température de l'eau à la surface le 17 décembre 2015 est égale à 9.7 °C contre 10.5 °C en 2014.







** 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 (19.02.2015),
b) au printemps (29.04.2015),
c) en été (16.07.2015),
d) en automne (02.12.2015).

Figure 2 : Physico-chemical profile made using multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2) :
a) in winter after maximal water mixing (19.02.2015),
b) in spring (29.04.2015),
c) in summer (16.07.15),
d) in autumn (02.12.2015).

Les figures 3 à 5 représentent l'évolution saisonnière et interannuelle de la température des eaux du lac. La température annuelle moyenne à différentes profondeurs de la colonne d'eau en 2015 confirme globalement la tendance au réchauffement observée ces vingt dernières années (Figures 3 et 4). Les températures moyennes des eaux de la couche 0-20 mètres sont cohérentes avec les températures de l'air (Annexe V).

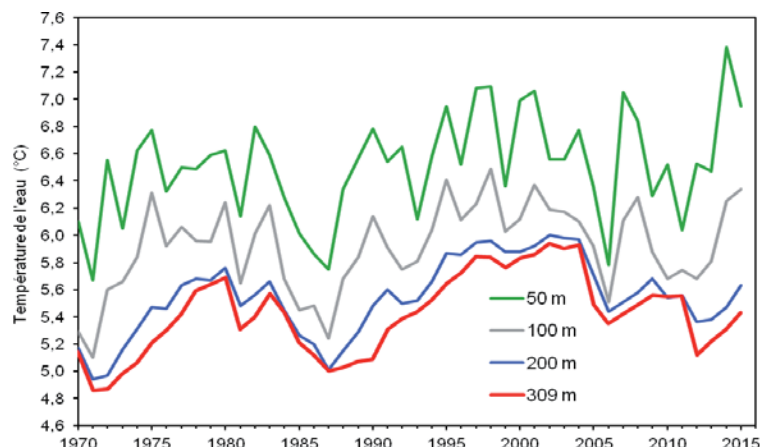


Figure 3 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1970 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2015, lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

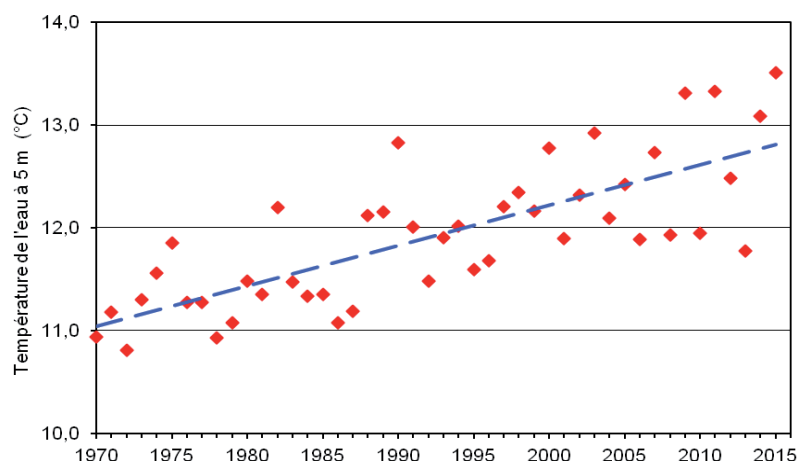


Figure 4 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du lac à 5 mètres de profondeur de 1970 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 4 : Inter-annual changes in the annual mean water temperature of the lake at a depth of 5 meters from 1970 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

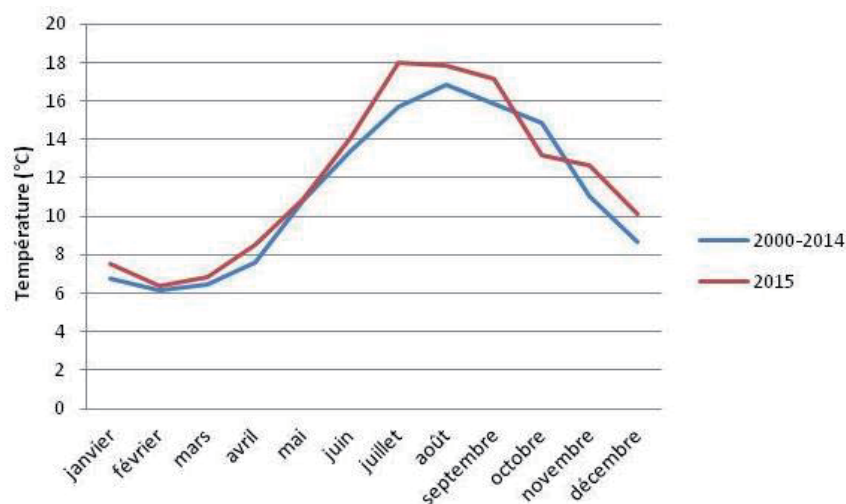


Figure 5 : Température moyenne mensuelle de l'eau du lac en 2015 et de 2000 à 2014 à entre 0 et 20 mètres de profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2)

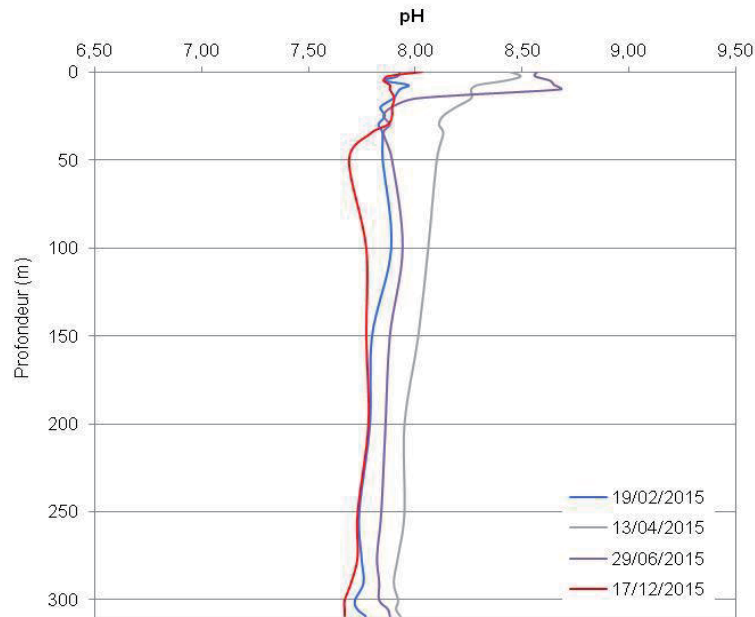
Figure 5 : Mean monthly water temperature in 2015 and from 2010 to 2014 at a depth of 0 et 20 meters, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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 140 m, le pH de la colonne d'eau oscille globalement entre 7.72 et 7.97, tel que l'on peut l'observer sur le profil du 19 février 2015 en bleu sur la figure 6. La reprise précoce de l'activité phytoplanctonique printanière conduit à une augmentation très marquée du pH dès le milieu du mois d'avril 2015. 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. Un pH maximum de 8.73 a été mesuré en surface le 29 avril 2015, beaucoup plus précocement qu'en 2014. Ceci est dû à la présence d'une biomasse phytoplanctonique importante consécutive notamment au développement de *Mougeotia gracillima*.



* 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 constate qu'il n'y pas de changement global de gamme de valeur du pH sur la chronique, même si la gamme de variabilité tend à se réduire.

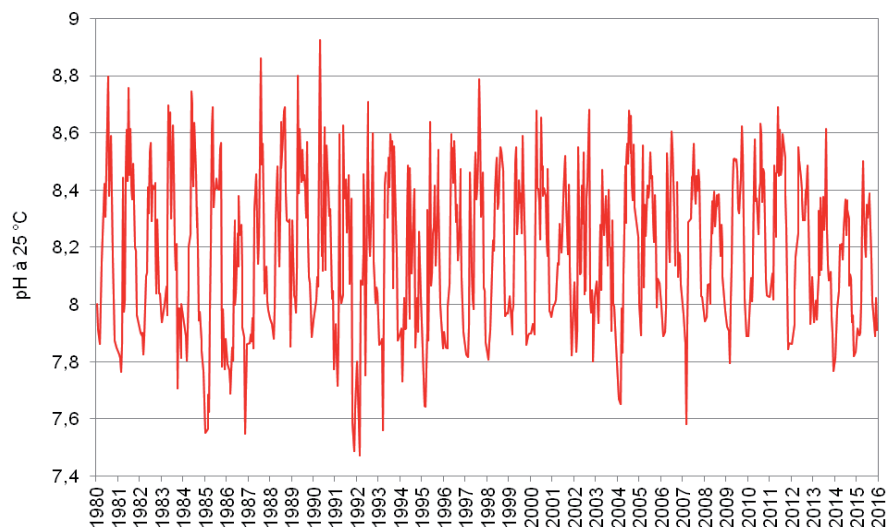


Figure 7 : Evolution du pH à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

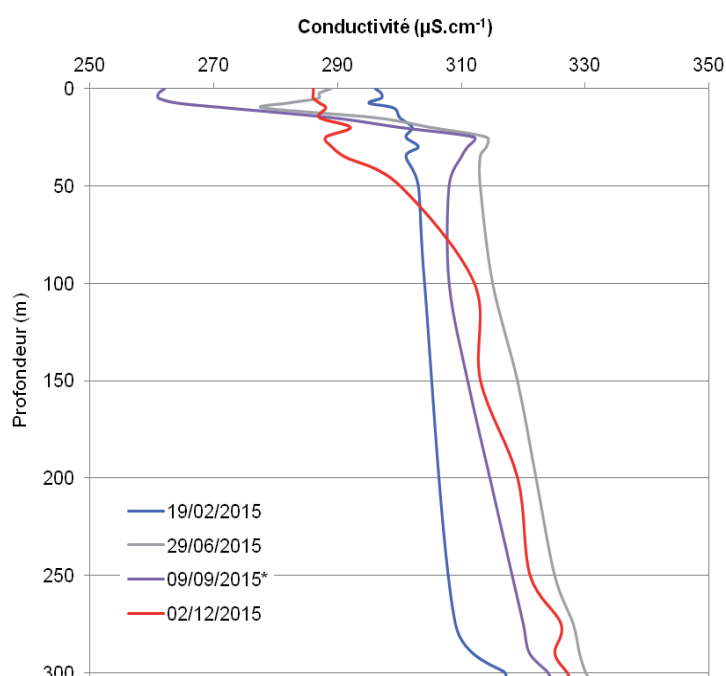
Figure 7 : Change in pH at 25°C in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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 8 représente l'évolution saisonnière de la conductivité dans la colonne d'eau du lac. On peut noter que la conductivité n'est pas homogène dans l'ensemble de la masse d'eau le 19 février 2015 au moment du brassage hivernal partiel et varie entre 304 et 324 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 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 septembre avec 262 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 0 m tel que cela est représenté en violet sur la figure 8.

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



*** valeurs à 200, 250 et 305 m interpolées.**

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

Figure 9 : 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 9 : 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 2015. De même que le pH, la conductivité ne reflète pas de modification temporelle sur le long terme.

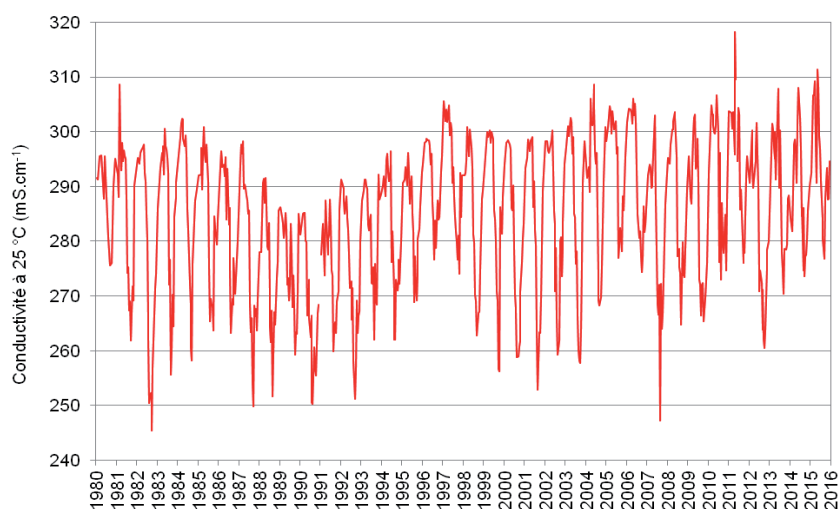


Figure 9 : Evolution de la conductivité à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 9 : Change in the conductivity at 25°C in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.3. TITRE ALCALIMÉTRIQUE COMPLET

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est la grandeur utilisée pour mesurer la teneur d'hydrogénocarbonate, de carbonates et d'hydroxydes. A l'issue du brassage partiel du lac durant l'hiver 2015, le TAC est hétérogène dans la colonne d'eau et fluctue entre 1.71 et 1.96 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$. A partir du mois de juin 2015, on peut observer que le TAC diminue dans les eaux superficielles (0 - 20 m) parallèlement à la baisse de la conductivité ce qui s'explique par la précipitation des ions carbonates avec le calcium (Figure 10). Le titre alcalimétrique complet minimum dans l'épilimnion est minimal en fin d'été avec environ 1.50 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2015.

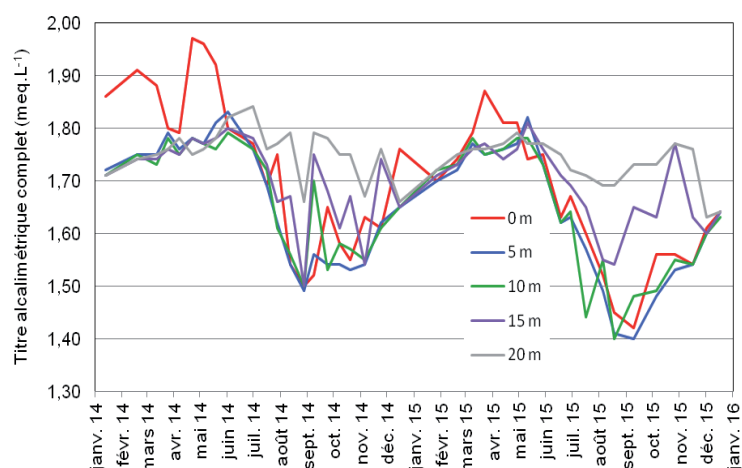


Figure 10 : Titre alcalimétrique complet dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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

La figure 11 représente l'évolution du titre alcalimétrique des eaux superficielles (0 - 20 m) de 1980 à 2015. La même observation que pour le pH et la conductivité peut être faite à savoir que ce paramètre ne présente pas de tendance évolutive globale au fil de la chronique.

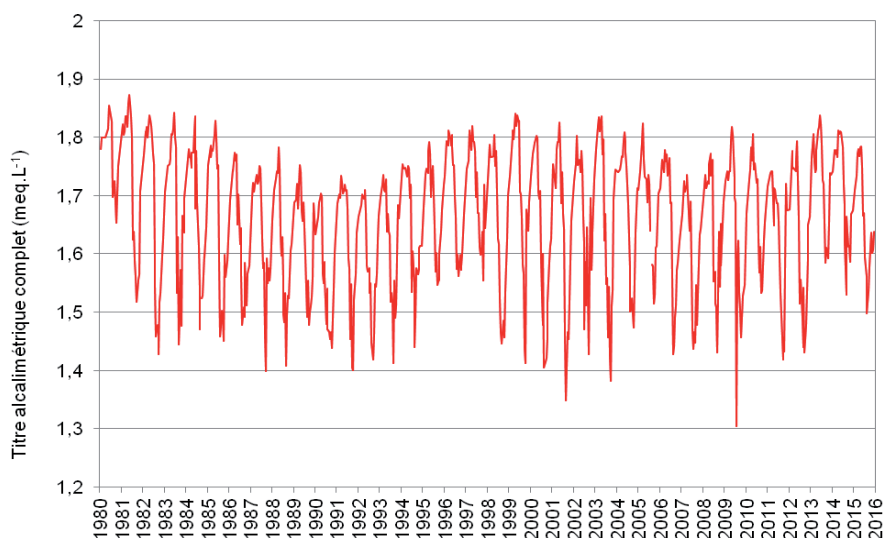


Figure 11 : Evolution du titre alcalimétrique complet dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11 : Change in total alkalinity in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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 2015 n'a pas permis un brassage complet, par conséquent les nutriments n'ont pas été redistribués de manière homogène tout le long de la colonne d'eau.

5.1. PHOSPHORE TOTAL ET ORTHOPHOSPHATE

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

A l'issue du brassage partiel du lac en 2015, une concentration moyenne maximale en phosphore réactif soluble de $7.2 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ est détectée le 19 février 2015 entre 0 et 20 m (Figure 12). Cette valeur est plus faible que celle observée l'année précédente, avec $11.9 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ à la suite d'une homogénéisation partielle de la colonne d'eau.

A la fin de l'été, les concentrations en orthophosphates sont minimales avec des valeurs de l'ordre de $1 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ à 5 et 10 m en raison du pic de biomasse phytoplanctonique.

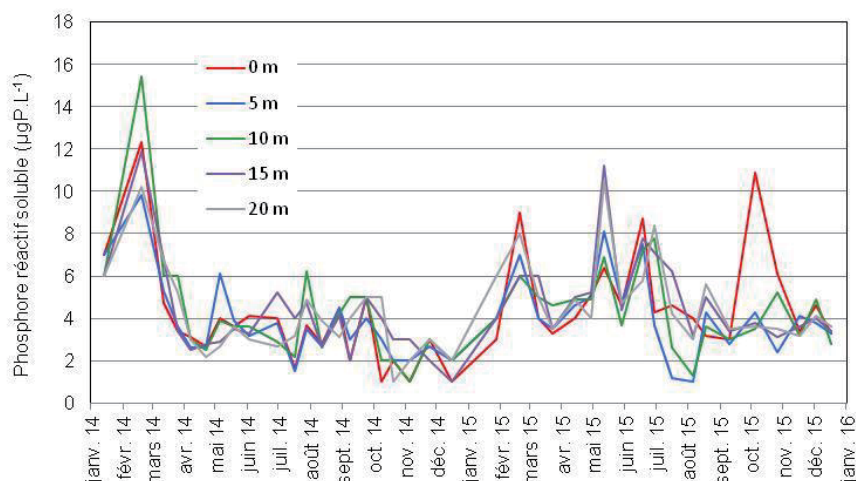


Figure 12 : Concentration en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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)

La figure 13 représente l'évolution depuis 1996 du stock en phosphore total et en orthophosphate dans la couche 0 - 30 m lors du brassage hivernal, soit dans la couche où il est disponible pour l'activité phytoplanctonique. Le stock en orthophosphate, directement biodisponible, est plus faible que l'année précédente du fait de trois 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.

On constate une tendance globale à la baisse du stock de phosphore sur cette chronique de 1996 à nos jours, qui se confirme aussi à travers l'évolution de la concentration en phosphore réactif soluble dans la couche d'eau de 0 à 100 m (figure 29). 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.

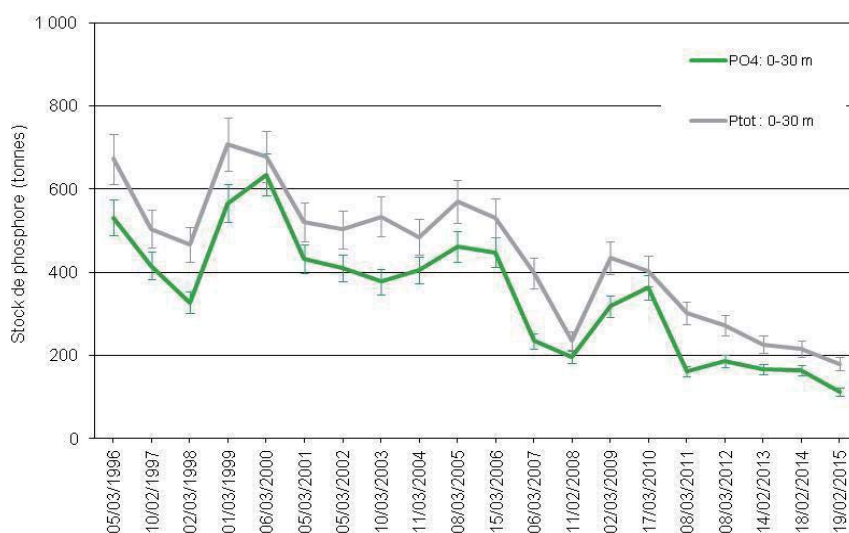


Figure 13 : Stock de phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) et phosphore total dans les eaux de la couche 0 - 30 m (avec barres d'incertitudes) de 1996 à 2015 à l'issue du brassage hivernal, Léman - Grand Lac (SHL 2)

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 (with error bars) from 1996 to 2015 after winter mixing, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.2. AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

La concentration en azote nitrique atteint son maximum à l'issue du brassage partiel, le 19 février 2015, avec en moyenne $602 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ entre 0 et 20 m ce qui est comparable à l'année antérieure avec environ $600 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figure 14).

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 14. Par la suite, la consommation de l'azote nitrique continue et la concentration de cet élément atteint un minimum le 09 septembre 2015 avec $180 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ à la surface du lac. L'azote nitrique est consommé de manière significative jusqu'à 15 m.

L'abaissement de la concentration de l'azote nitrique est plus important qu'en 2014 où des concentrations de l'ordre de $250 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$, étaient mesurées à 0 et 5 m au mois d'août. Cette différence peut s'expliquer en partie par la présence d'une biomasse importante due à *Mougeotia gracillima*.

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.

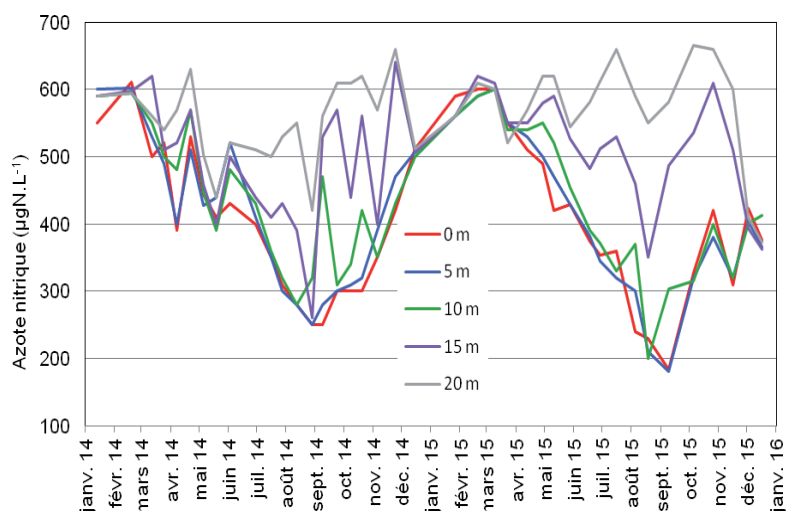


Figure 14 : Concentration en azote nitrique (N-NO_3^-) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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)

La figure 15 représente l'évolution du stock d'azote total et d'azote nitrique dans la couche 0 - 30 m lors du brassage hivernal de 1996 à 2015. On observe une relative stabilité du stock d'azote sur cette chronique de 1996 à nos jours.

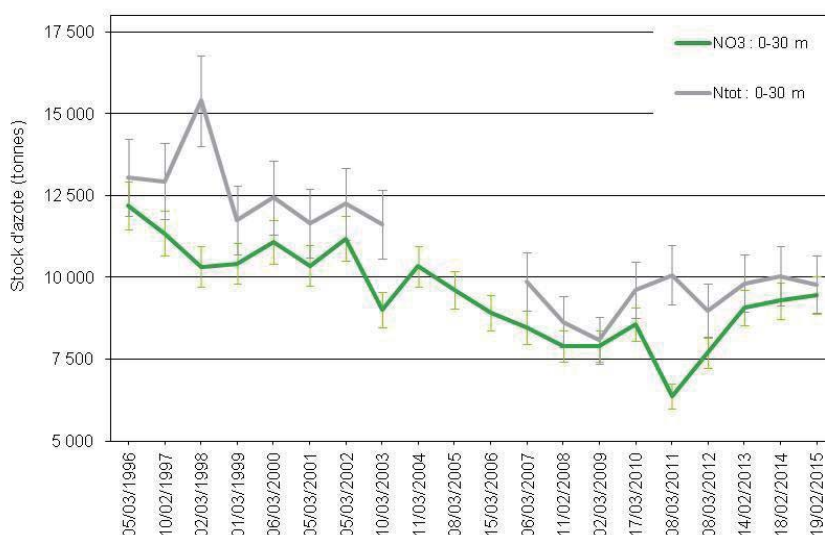


Figure 15 : Stock d'azote nitrique (N-NO_3^-) et d'azote total dans les eaux de la couche 0 - 30 m (avec barres d'incertitudes) de 1996 à 2015 lors du brassage hivernal, Léman - Grand Lac (SHL 2)

Figure 15 : Stock of nitrate (N-NO_3^-) and total nitrogen in the lake's water surface layer of 0 - 30 m (with error bars) from 1996 to 2015 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 (LAINE et PERGA, 2016). Cette activité printanière est supérieure à celle observée l'année précédente sur la même période mi-avril mi-juin 2015 : les valeurs atteignent $39 \mu\text{gN.L}^{-1}$ à 15 m le 11 mai 2015 alors qu'à la même période en 2014, la valeur maximale était de $22 \mu\text{gN.L}^{-1}$ à 15 et 20 m le 5 mai 2014. (figure 16). Ceci est probablement dû à une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période.

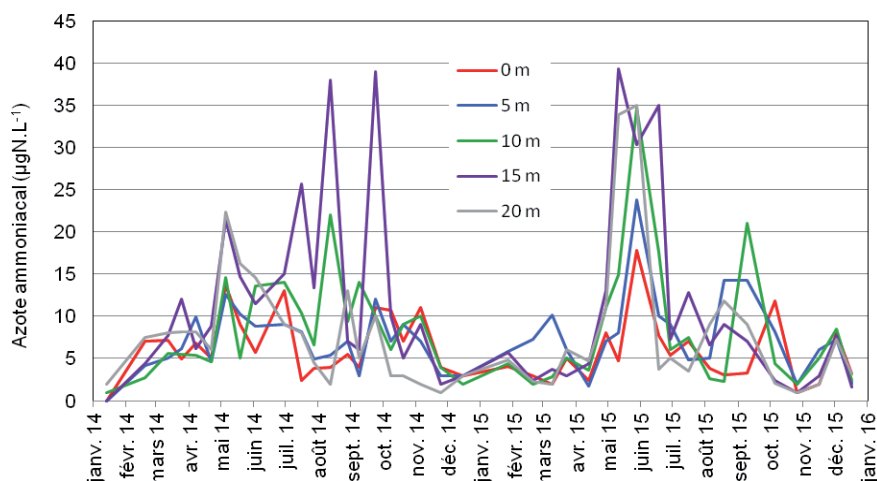


Figure 16 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH_4^+) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 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

L'homogénéisation partielle de l'hiver 2015, telle qu'en 2013 et 2014, 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 tout de même observée le 19 février 2015 à l'issue du brassage partiel maximal. La teneur moyenne en silice est alors égale à $1.03 \text{ mgSiO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ entre 0 et 20 m contre $1.14 \text{ mgSiO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ en 2014 à la même période de l'année (Figure 18).

Dès la campagne suivante, le 9 mars 2015, la silice commence à être consommée par l'activité phytoplanctonique précoce des algues diatomées (RIMET, 2016) pour atteindre au milieu du mois de mai des concentrations non détectables analytiquement de 0 à 10 m.

La concentration en silice reste faible ensuite jusqu'au début du mois de septembre 2015 du fait de la présence de diatomées. Finalement, avec la consommation décroissante et l'enfoncement de la thermocline qui s'accompagne d'une remobilisation des concentrations en silice du métalimnion, on constate dès mi-octobre, une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac.

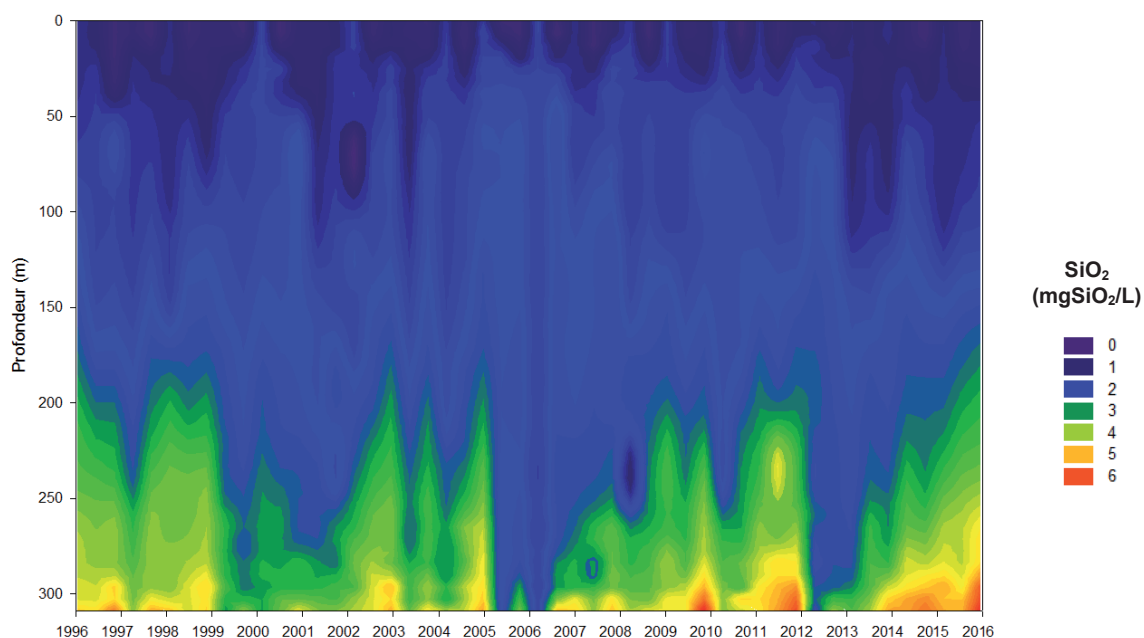


Figure 17 : Concentration en silice (SiO_2) dans les eaux du lac en fonction de la profondeur de 1996 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 17 : Concentration of silica (SiO_2) in lake's water as a function of depth from 1996 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

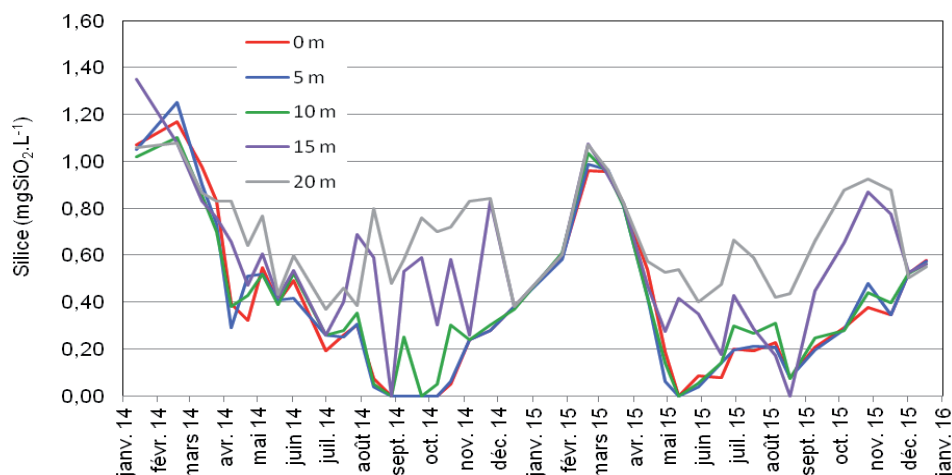


Figure 18 : Concentration en silice (SiO_2) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

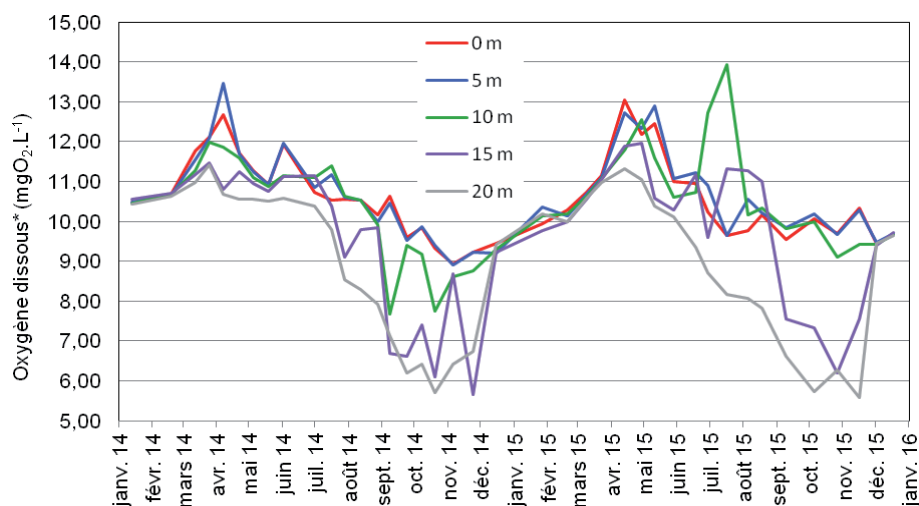
Figure 18 : Concentration of silica (SiO_2) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.4. OXYGÈNE DISSOUS

Les figures 19 et 25 mettent en évidence la production d'oxygène par la photosynthèse dans les couches supérieures du lac au printemps. Ce phénomène entraîne une sursaturation en oxygène des couches superficielles, dont le pic printanier est observé le 13 avril 2015 avec $13.04 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ en surface.

La concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles diminue ensuite à partir du milieu du mois de mai, principalement à cause d'une activité photosynthétique moins intense liée au fléchissement des diatomées (RIMET, 2016).

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. Par la suite, on peut observer un second pic important d'oxygène dissous à 10 m le 16 juillet 2015, probablement consécutif à la présence importante de *Mougeotia gracillima*. La désoxygénation de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers les couches plus profondes est relativement marquée en 2015. Les concentrations minimales sont alors, au mois d'octobre, égale à $5.73 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$. Ces valeurs sont du même niveau que l'année précédente avec $5.71 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ en octobre 2014.



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

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

Figure 20 : 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 dynamique de transparence pour l'année 2015 est représentée sur la figure 20. L'hiver 2015 entraîne une transparence importante jusqu'à 14 m le 19 février 2015 lors du brassage hivernal (12.2 m le 13 janvier 2014). Par la suite, la reprise avancée de l'activité photosynthétique, qui induit l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique, provoque une diminution progressive de la transparence jusqu'à une valeur de 3.6 m le 11 mai 2015 qui perdure jusqu'au 18 juin 2015. Ce phytoplancton printanier est essentiellement constitué de diatomées et de *M. gracillima* (RIMET, 2016), qui consomme les nutriments présents en abondance mais n'est guère consommé.

De la fin juin à la mi-juillet, on observe une augmentation de la transparence avec un pic à 9.7 m le 16 juillet 2015. Ce phénomène est dû à la raréfaction des nutriments et l'accroissement de l'activité des organismes brouteurs qui engendrent un abattement drastique des formes consommables du phytoplancton.

Puis, la transparence diminue pour atteindre 6.8 m début août 2015, ce qui est très différent des valeurs basses de l'année précédente avec 2.4 m le 28 août 2014. La biomasse de phytoplancton en général, et de *M. gracillima* en particulier, diminue fortement de mi-août à mi-septembre (RIMET 2016) conduisant à une augmentation de la transparence.

Puis la destratification, qui débute significativement en novembre, fait remonter des nutriments vers les eaux de surface. Etant donné que les conditions lumineuses sont encore favorables à l'activité photosynthétique, le phytoplancton croît à nouveau mais comme les températures encore élevées stimulent le broutage, ce sont des espèces résistantes à la prédation qui vont se développer. La transparence atteint 10.5 m le 17 décembre 2015.

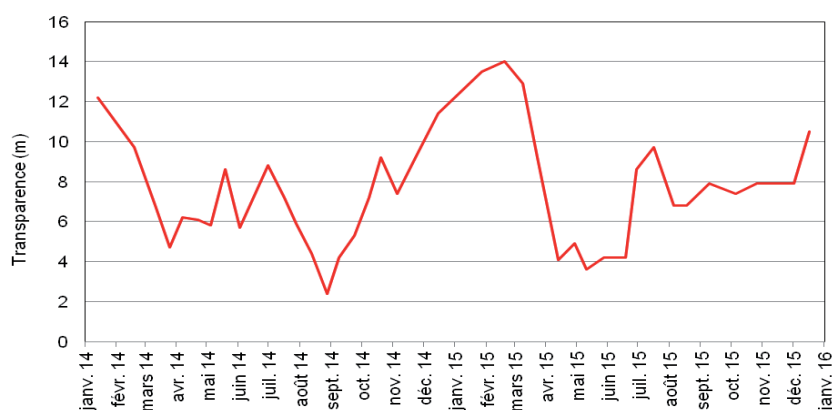
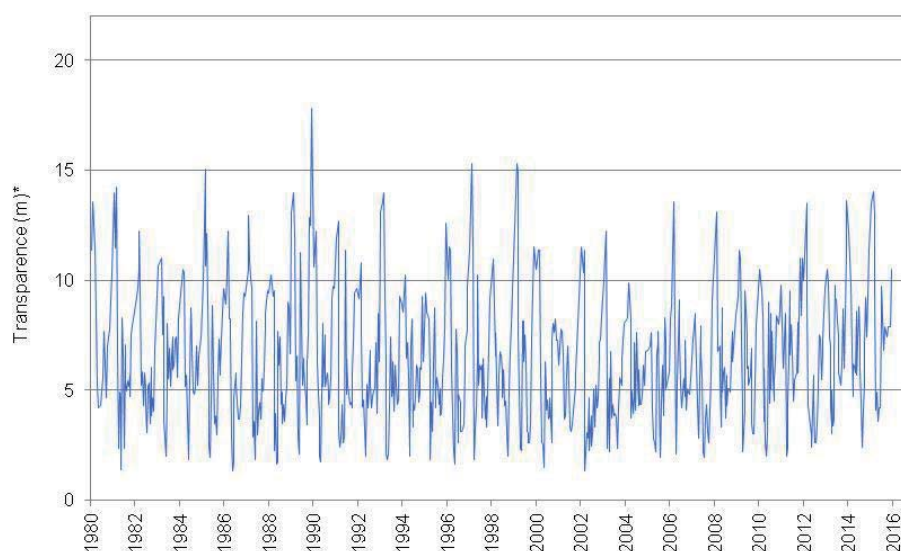


Figure 20 : Transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2015 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 = $0.8742 \times \text{transparence disque 30 cm}$)

Figure 21 : Evolution de la transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm) de 1980 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 21 : Long-term changes in transparency using Secchi disk (black and white, 20 cm) from 1980 to 2015, 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 organique particulaires ainsi que le phosphore total particulaire 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).

Ainsi, le pic le plus marqué de carbone organique particulaire de l'année 2015 est le pic printanier qui apparaît au mois de mars jusqu'à fin mai 2015 et est marqué par un maximum le 13 avril 2015 en surface avec $643 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$. Il est à corrélérer avec une diminution de la transparence. Par la suite, un deuxième pic moins marqué est observable de fin juin à mi-juillet 2015 avec une concentration de $435 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$ à 10 et 15 m correspondant à la période de biomasse phytoplanctonique maximale, dominée par *Mougeotia gracillima* (RIMET, 2016).

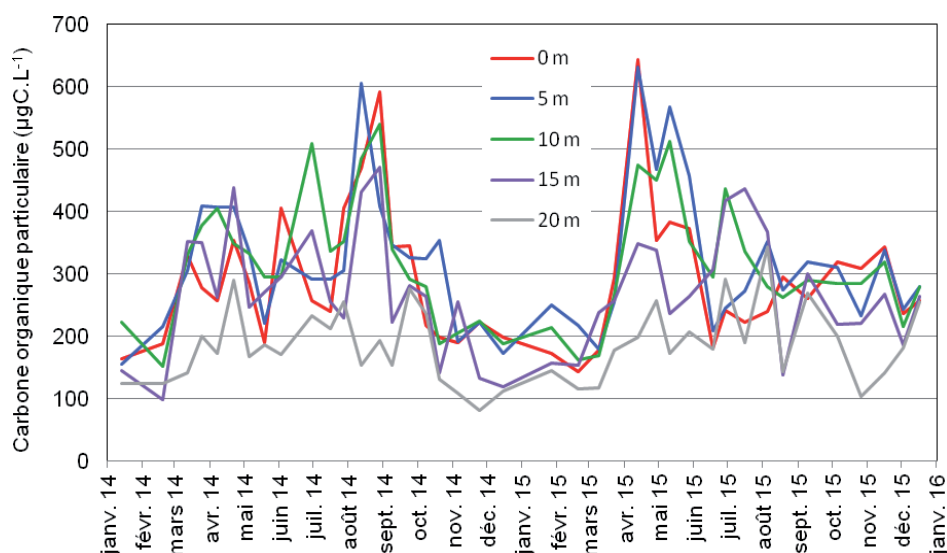
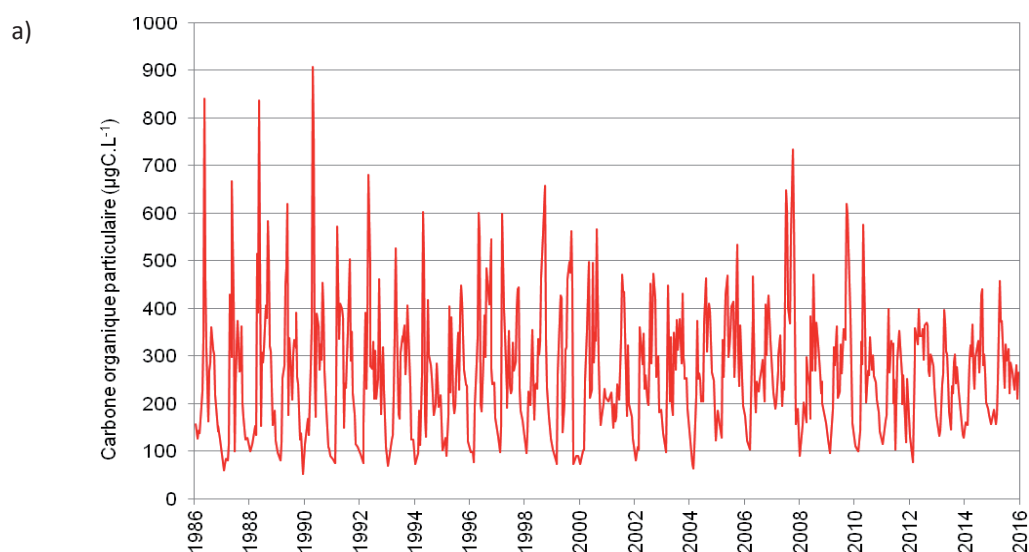


Figure 22 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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 23a, b et c mettent respectivement en évidence la dynamique annuelle de la matière particulaire : COP, azote organique particulaire (NOP) et le phosphore particulaire (Ppart). Les concentrations en COP, NOP et Ppart en 2015 sont parmi les plus basses de la chronologie de 1986 à nos jours.



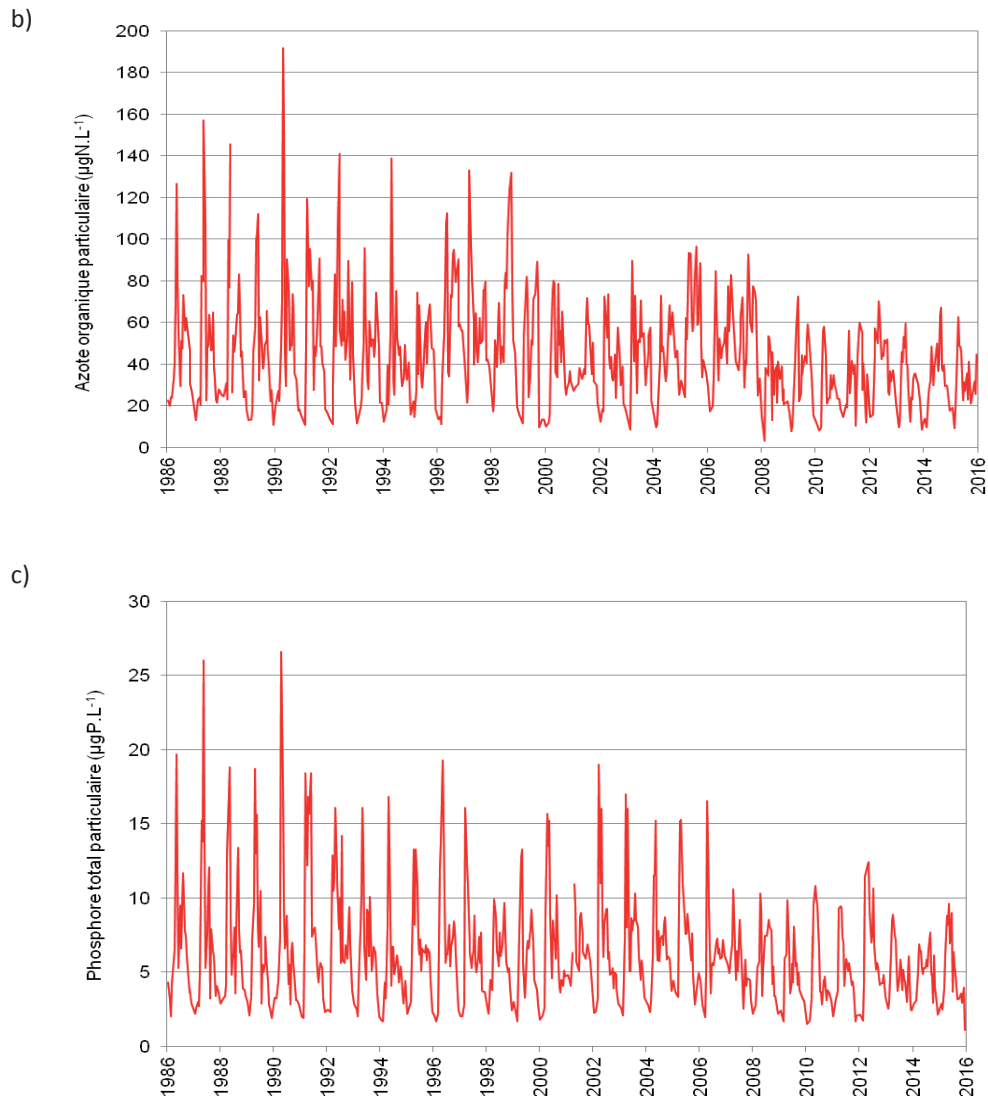


Figure 23 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- 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 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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

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

A noter une valeur du rapport de 41 le 17 décembre 2015 du fait de valeurs très basses de phosphore particulaire.

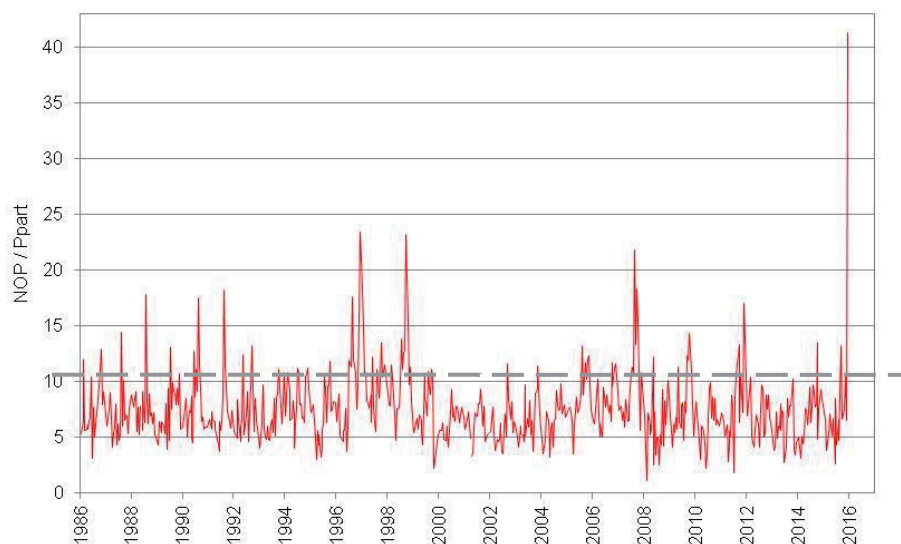
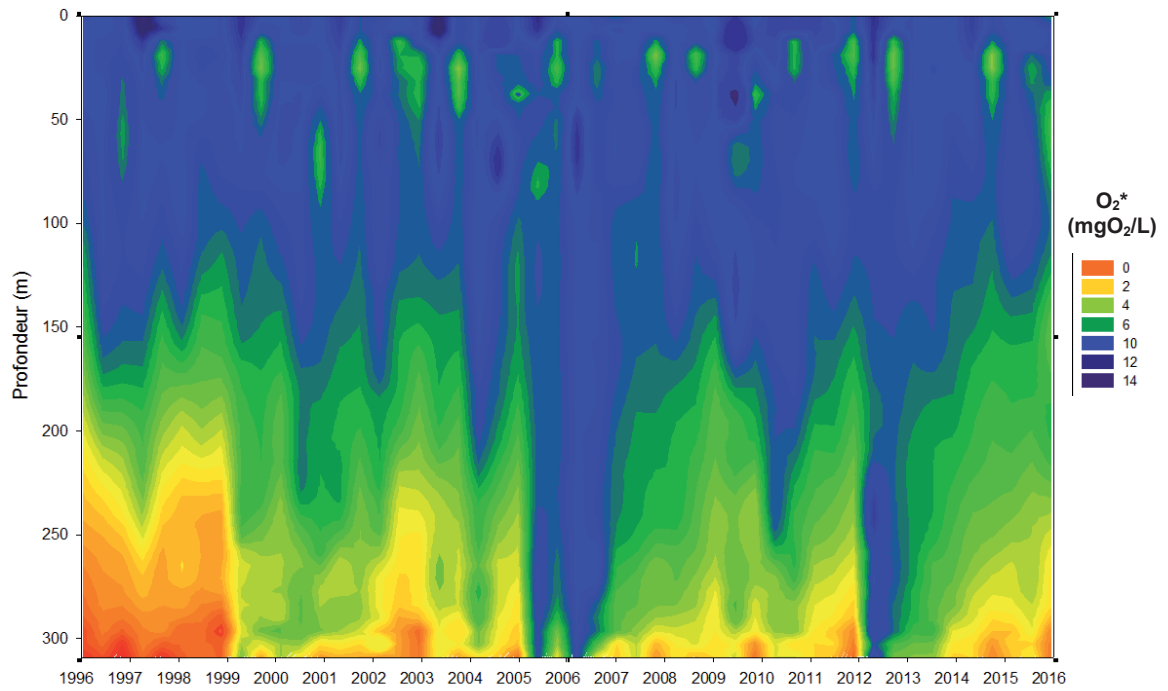


Figure 25 : Evolution du rapport NOP / Ppart dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 25 : Change in PON / Ppart ratio in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1986 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

6. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

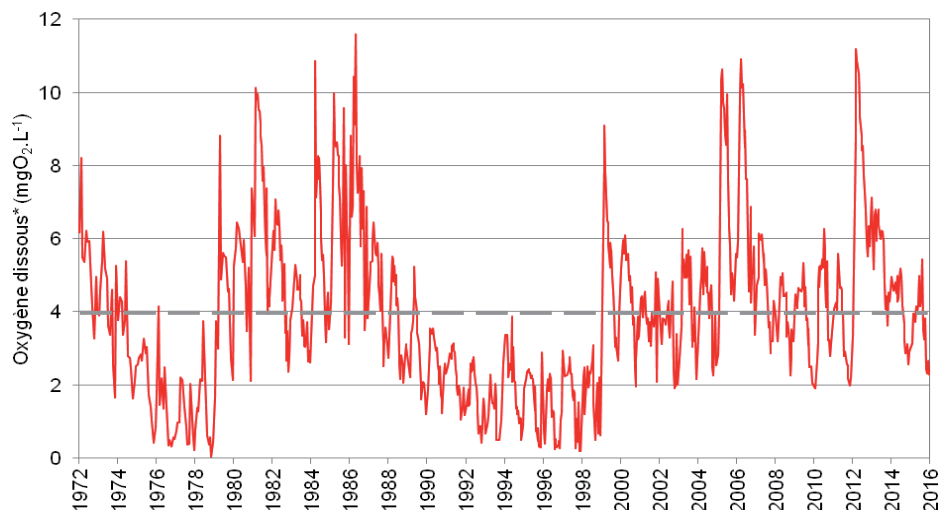
L'hiver 2015 n'a pas permis de ré-oxygéner l'ensemble de la colonne d'eau contrairement à l'année 2012 (Figure 25). A l'issue du brassage partiel maximal, le 19 février 2015, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à $3.94 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ (Figure 26). La teneur en oxygène dissous à 309 m diminue ensuite de manière progressive à partir du mois d'août 2015 et continue jusqu'à la fin de l'année, principalement du fait de la minéralisation de la matière organique sédimentée. Le minima est observé le 17 décembre 2015 avec $2.29 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$, ce qui est peu différent de la valeur minimale de 2014 de $2.56 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$.



* 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 2015, 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 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)



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

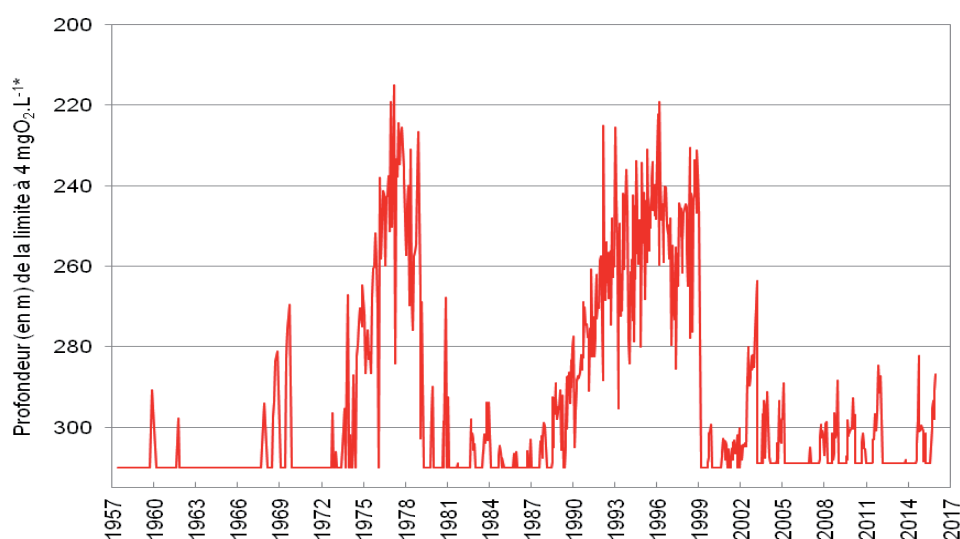
Figure 26 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 26 : Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2015, 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 $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$; 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".

La ligne pointillée sur la figure 26 indique le seuil à $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ relative aux exigences sur la qualité des eaux en Suisse.

La figure 27 indique l'évolution de la couche d'eau de concentration inférieure à $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ de 1957 à nos jours. Depuis 1998, il y a une nette augmentation de la teneur en oxygène dissous dans les couches profondes du Léman. On peut noter qu'à l'identique de l'année 2014, pour l'année 2015, la couche d'eau « désoxygénée » ($< 4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$), s'accroît progressivement de mi-août jusqu'à la fin de l'année.



* 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 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 27 : Change in threshold's depth at 4 mg of dissolved oxygen per liter from 1957 to 2015, 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. Etant donné qu'il y a eu uniquement un brassage partiel de la colonne d'eau et par conséquent une réoxygénation faible des couches d'eau profondes en 2015, il devrait y avoir un relargage de phosphore au fond du lac. Les figures 28 et 29 montrent des teneurs en orthophosphates dans le fond du lac qui restent modérées, même si elle sont un peu plus élevées qu'en 2005, 2006 et 2012 après des brassages complets de la colonne d'eau. Il est possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle, la concentration en phosphore dans les sédiments à l'interface avec l'eau est relativement faible, ce qui limite le relargage de cet élément. La concentration maximale de phosphore réactif soluble est notée le 2 décembre 2015, lorsque la teneur en oxygène dissous est la plus faible, avec $63 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ contre $53 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ en 2014. Les valeurs de concentration du manganèse total analysé dans la couche profonde du lac restent également faibles (KLEIN, 2016).

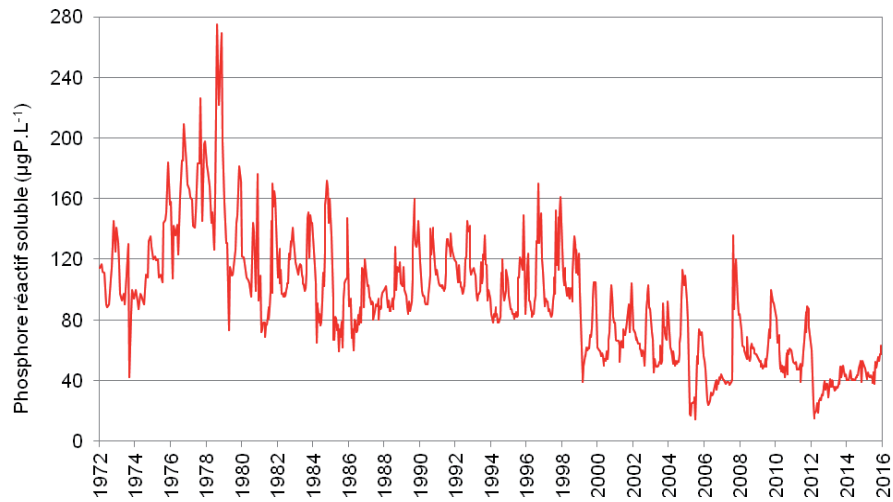


Figure 28 : Evolution de la concentration en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 28 : Change in the concentration of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) in the bottom of lake's water at 309 m from 1972 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

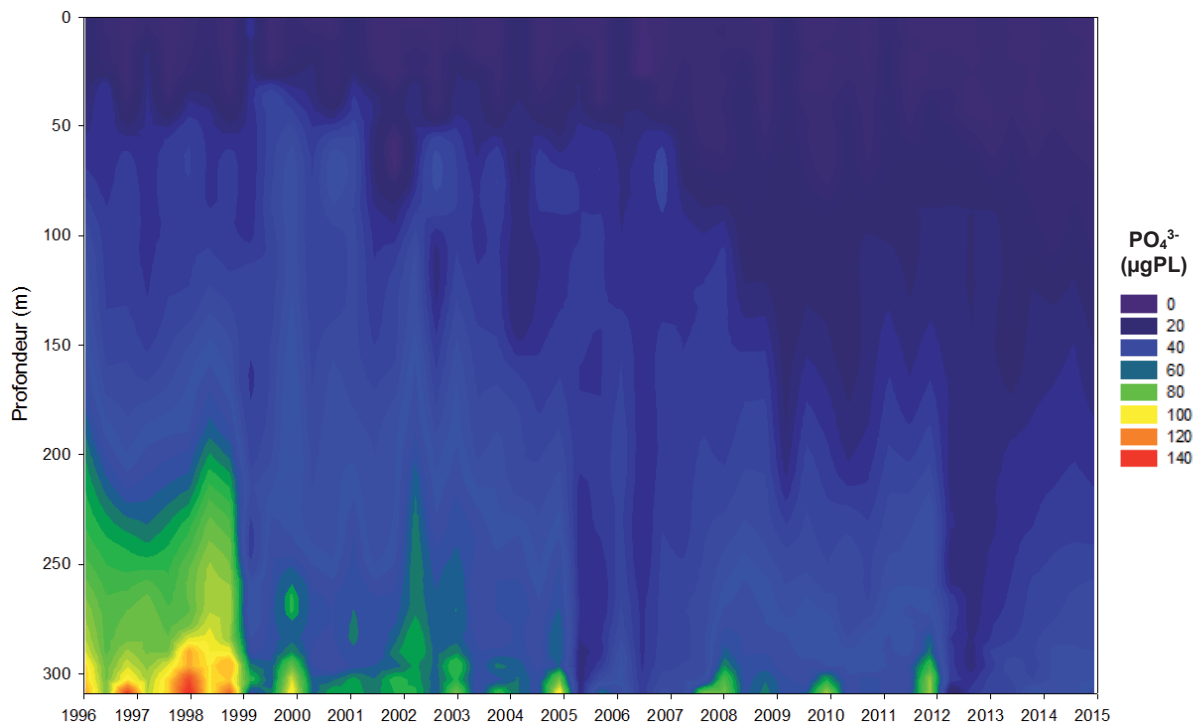


Figure 29 : Evolution de la concentration en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) en fonction de la profondeur de 1996 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 29 : Change in the concentration of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) in lake's water as a function of depth from 1996 to 2015, 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 2015 par rapport à l'année 2014 (Figure 30).

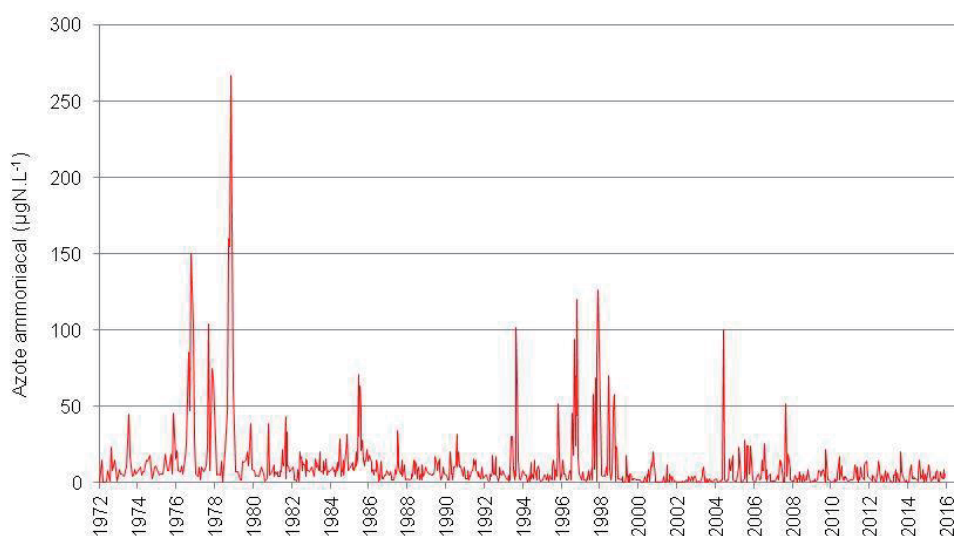


Figure 30 : Evolution de la concentration en azote ammoniacal (N-NH_4^+) dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 30 : Change in the concentration of ammoniacal nitrogen (N-NH_4^+) in the bottom of lake's water at 309 m from 1972 to 2015, 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 en baisse en 2015 avec 1'634 tonnes de P contre respectivement 1'696 et 1'762 en 2013 et 2014 (Figure 31). La concentration moyenne annuelle pondérée est égale à $19.0 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

En ce qui concerne le phosphore réactif soluble, c'est-à-dire l'orthophosphate, le stock n'évolue guère en 2015 avec 1'359 tonnes de P contre 1'438 en 2014. Ainsi, la concentration moyenne annuelle pondérée est de $15.8 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

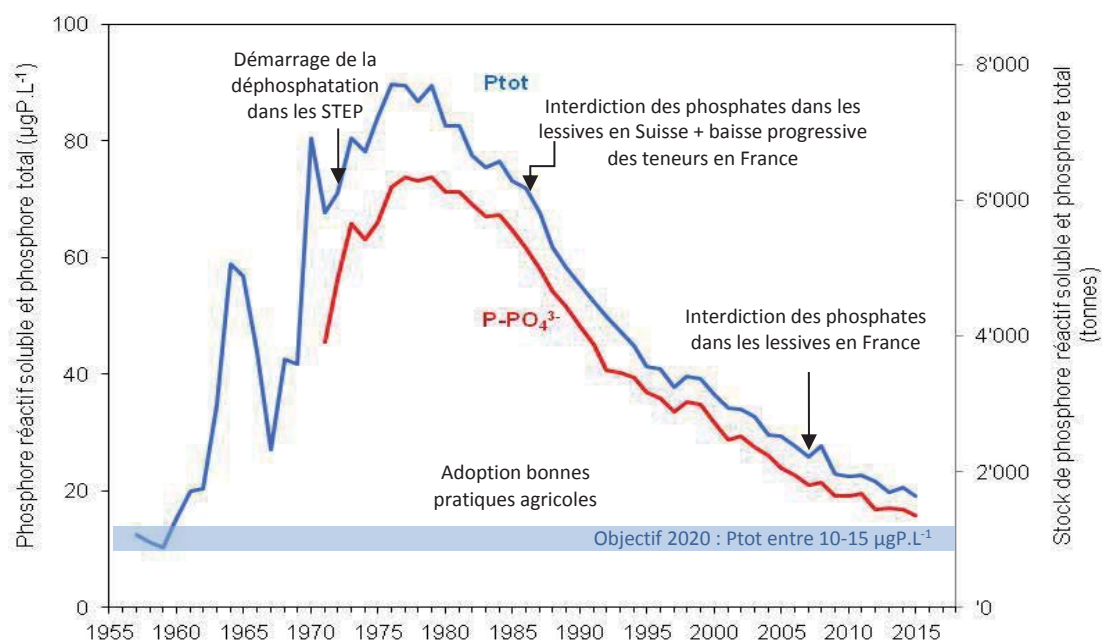


Figure 31 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore réactif soluble et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1957 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7.2. AZOTE NITRIQUE ET AZOTE TOTAL

Les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique sont du même ordre que celles de l'année précédente. En 2015, la concentration moyenne en azote total est de 633 µgN.L⁻¹, soit un stock de 54'438 tonnes de N. La concentration moyenne annuelle en azote nitrique, quant à elle, est égale à 574 µgN.L⁻¹, ce qui représente un stock de 49'364 tonnes de N contre 572 µgN.L⁻¹ et 49'180 tonnes en 2014 (Figure 32). Cette teneur en nitrates d'environ 0.57 mgN.L⁻¹ dans les eaux du Léman, soit 2.53 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.

L'évolution du stock d'azote total et nitrique dans le Léman est relativement stable depuis les années 80.

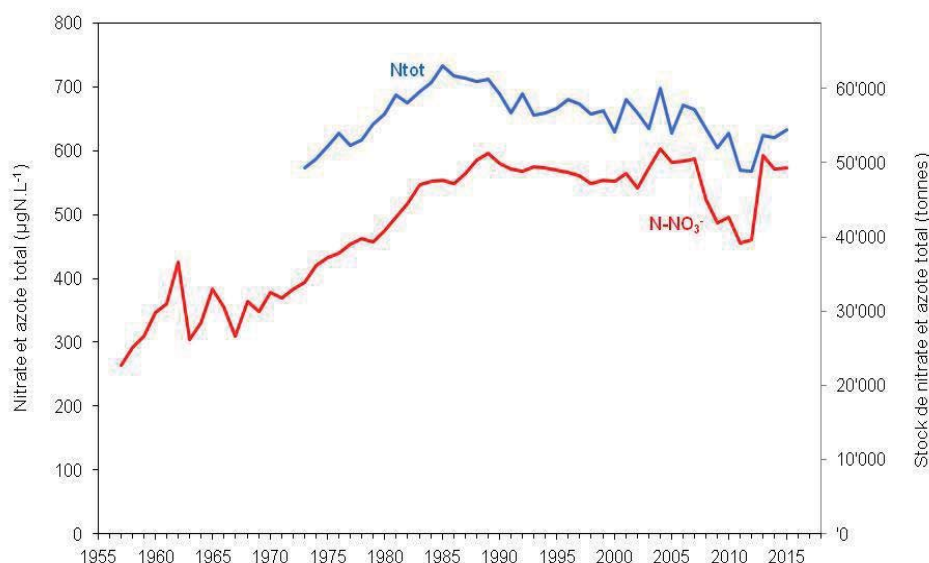


Figure 32 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1957 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7.3. CHLORURE

Le suivi des ions chlorures dans le Léman de 1971 à nos jours montre une constante augmentation de la concentration de ce paramètre dans le Grand Lac (Figure 33). En 2015, le stock de chlorure est égal à 894'400 tonnes soit une teneur moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.40 mgCl·L⁻¹ contre 872189 tonnes et 10.14 mg Cl·L⁻¹ en 2014. Ce phénomène s'explique en majeure partie par les apports via les affluents du Léman (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).

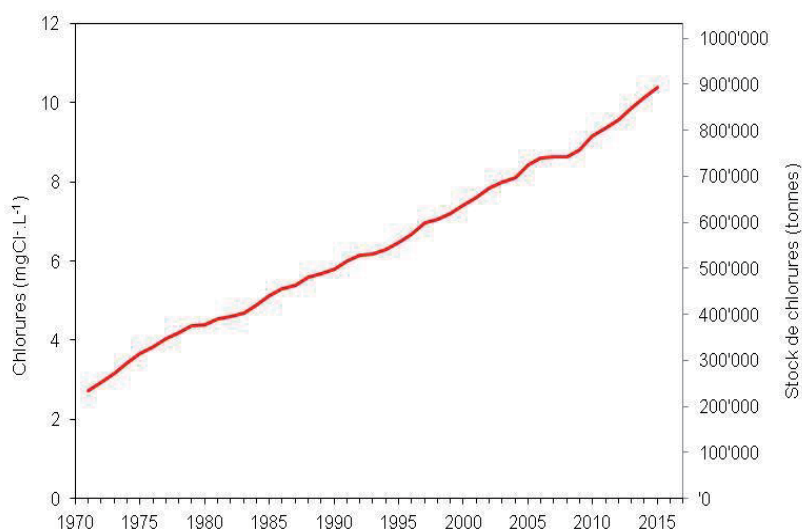


Figure 33 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 33 : Change in the weighted mean annual concentration and stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1971 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

8. CONCLUSIONS

L'année climatique 2015 sur les rives du Léman peut être considérée comme chaude et ensoleillée avec une température moyenne annuelle de 11.7 °C, faiblement venteuse, avec une pluviométrie qui présente un déficit de 20 % par rapport à la moyenne 1981-2010 avec 808.7 mm de précipitations. L'été a été très chaud et sec.

Les faits marquants de l'évolution physico-chimique des eaux du Léman en 2015 sont les suivants :

- L'hiver 2015 a donné lieu à un brassage partiel de la colonne d'eau jusqu'à 140 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 débute au printemps et se poursuit jusqu'à atteindre des concentrations en phosphore réactif soluble et silice à l'état de trace dans les couches épilimniques. Par opposition, l'azote nitrique n'est pas un facteur limitant du développement du phytoplancton ;
- 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 2015 tel qu'en 2014 et ce malgré deux années successives de brassage partiel qui ont occasionné une réoxygénation limitée des eaux profondes ;
- En 2015, le stock d'azote nitrique dans le lac est un peu plus élevé qu'en 2014, avec 49'880 tonnes de N ;
- La concentration moyenne en phosphore total semble poursuivre sa tendance générale à la baisse avec une valeur annuelle moyenne de 19.0 µgP.L⁻¹ (19.7 et 20.5 µgP.L⁻¹ en 2013 et 2014, respectivement) ;
- Le stock de chlorure dans le Léman continue d'augmenter et atteint 894'400 tonnes en 2015.

BIBLIOGRAPHIE

- 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. (2016) : Métaux et micropolluants organiques dans les eaux du Léman. Campagne 2015, 67-80.
- LAINE, L. et PERGA, M. (2016) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 101-106.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- PERGA, M., LEBERRE, B., PERNEY, P. (2016) : Biomasse chlorophyllienne et production primaire dans le Léman, Campagne 2015, 93-100.
- RIMET, F. (2016) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 81-92.
- SAVOYE, L., QUETIN, P. et KLEIN, A. (2015), Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. Int. Prot. Eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 19-67.
- VARGAS, S. (2015) Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 165-176.

ANNEXE I

Tableau I : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table I : Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2015, 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
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
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

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
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

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

b : valeur interpolée

ANNEXE II

Tableau II : Stocks annuels en tonnes de 1955 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table II : Annual total content in metric tons from 1955 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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
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

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
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
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	40'330	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

b : valeur interpolée

ANNEXE III

Tableau III : Incertitudes élargies des principales analyses physico-chimiques

Table III : Expanded uncertainties of main physico-chemical analysis

Paramètre	Unité	Incertitude élargie * U (%)
pH		0.5
TAC	meq·L ⁻¹	4
χ	S·cm ⁻¹	2
NO ₃ ⁻	µgN·L ⁻¹	6
NO ₂ ⁻	µgN·L ⁻¹	3
NH ₄ ⁺	µgN·L ⁻¹	6
N _{tot}	µgN·L ⁻¹	9
NOP	µgN·L ⁻¹	4
PO ₄ ³⁻	µgP·L ⁻¹	8
P _{tot}	µgP·L ⁻¹	9
P _{part}	µgP·L ⁻¹	9
COP	µgC·L ⁻¹	5
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 IV

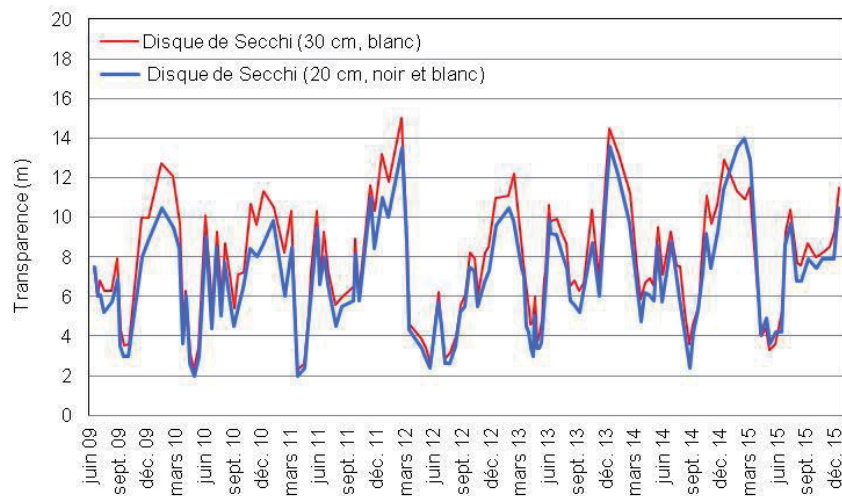


Figure IV.1 : Représentation graphique de la comparaison entre la mesure de la transparence avec le disque de Secchi « INRA » (disque blanc d'un diamètre de 30 cm) et normalisé (disque noir et blanc, 20 cm) de mi-2009 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure IV.1 : Graph of comparison between transparency measurement with « INRA » Secchi disk (white disk at 30 cm of diameter) and normalized (black and white, 20 cm) from 2009 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

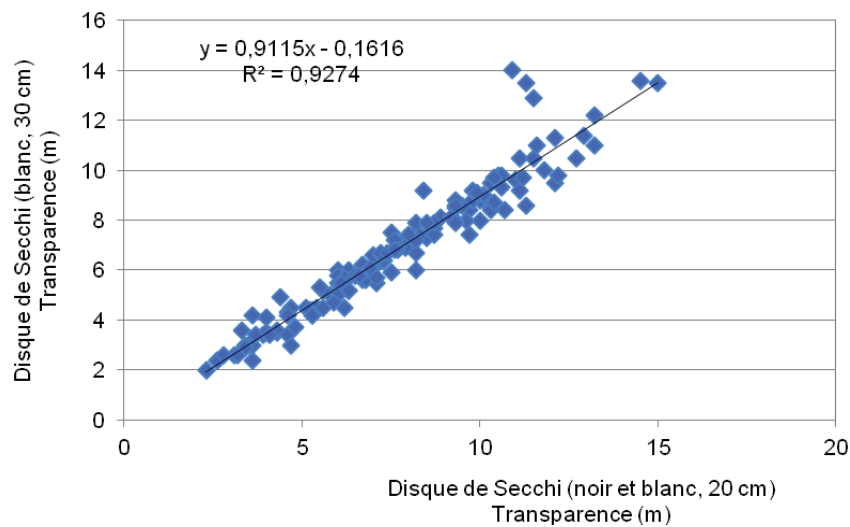


Figure IV.2 : Régression linéaire entre la mesure de la transparence avec le disque de Secchi « INRA » (disque blanc d'un diamètre de 30 cm) et normalisé (disque noir et blanc, 20 cm) de mi-2009 à 2015, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure IV.2 : Linear regression between the transparency measurement with « INRA » Secchi disk (white disk at 30 cm of diameter) and normalized (black and white, 20 cm) from 2009 to 2015, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

ANNEXE V

DONNEES MÉTÉOROLOGIQUES

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 2015, les températures des mois de février, et dans une moindre mesure septembre et octobre, furent inférieures à leur moyenne inter-stations sur la période 1981 - 2010. Les températures des mois d'été (juin, juillet, août) peuvent être classifiées comme chaudes. (tableau 1.1, figure 1.1).

Tableau 1.1 : Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2015 (°C).

Table 1.1 : Monthly mean air temperature for each station in 2015 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	2.6	2.6	3.5	3.7	2.2
Février	1.7	1.3	1.9	2.3	2.9
Mars	7.3	7.5	7.6	7.3	6.5
Avril	11.2	10.9	11.3	10.7	9.9
Mai	15.3	14.9	15.2	14.6	14.4
Juin	19.9	19.4	19.8	18.8	17.7
Juillet	24.2	23.7	24.0	23.0	20.1
Août	20.8	20.4	21.0	20.6	19.7
Septembre	14.8	14.7	15.0	15.0	15.8
Octobre	10.1	10.2	10.7	10.9	11.5
Novembre	7.1	7.5	8.4	8.1	6.0
Décembre	3.9	4.1	5.7	5.0	3.3
Moyenne annuelle	11.6	11.4	12.0	11.7	10.8

En 2015, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.7 °C, soit la même qu'en 2003 et 2014. Avec cette température, l'année 2015 se classe au 3^e rang (la plus chaude étant 1994 avec 11.9 °C) de la période 1980 - 2015. (tableau 1.2, figure 1.2).

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

Table 1.2 : Annual mean air temperature at the inter-stations (°C).

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1980	9.2	1998	11.0
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

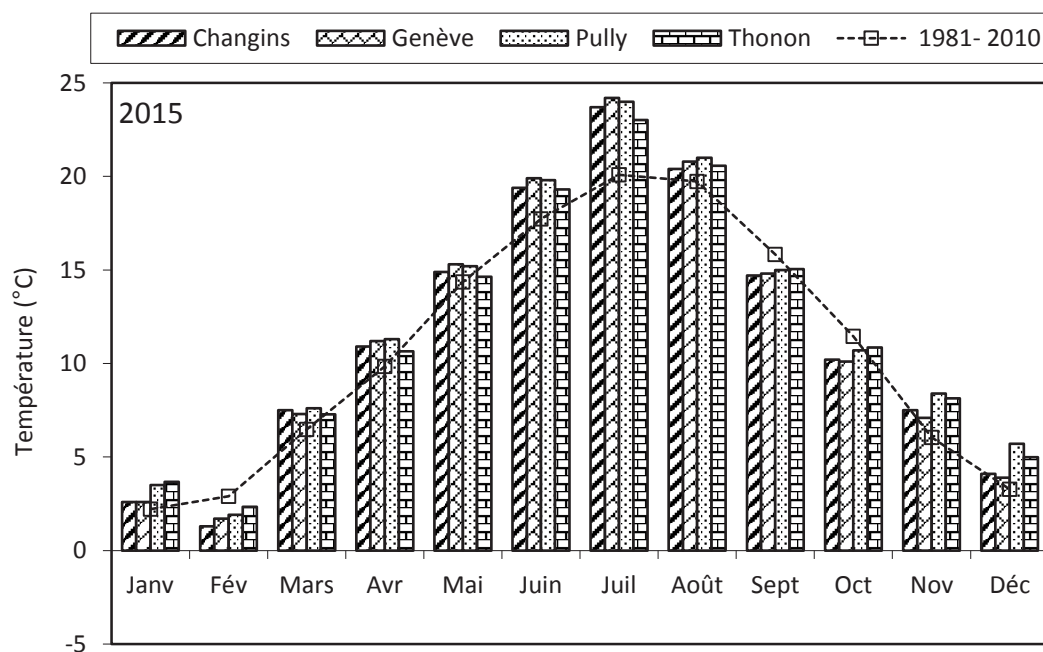


Figure 1.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2015 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1.1 : Mean monthly air temperature at each station in 2015 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

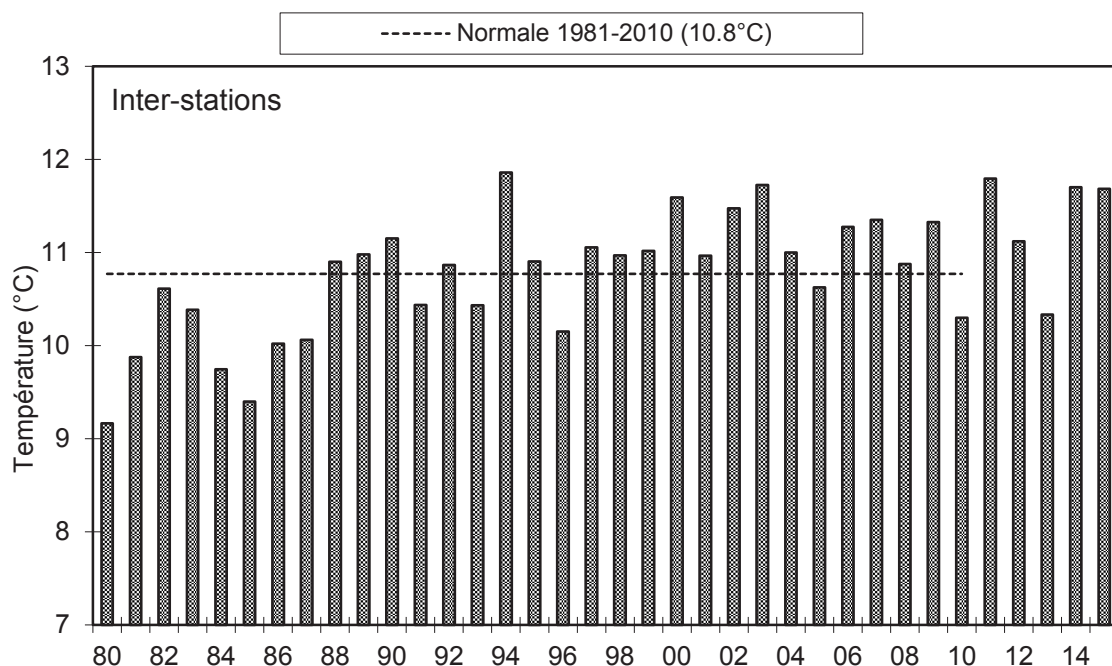


Figure 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

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

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2015 sur le bassin lémanique est de 808.7 mm, très inférieure à la normale inter-stations (1'008.9 mm) relevée sur les 4 stations entre 1981 et 2010. Changins est la station la plus arrosée avec 876.6 mm. Genève avec 685.5 mm a les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Les mois d'été (juin, juillet, août) et le dernier trimestre furent particulièrement secs. Par contre les mois de janvier, avril, mai, et septembre furent eux excédentaires. Ce qui donne pour l'année 2015 un déficit de 19.6 % par rapport à la normale 1981 - 2010.

Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2015.

Table 2.1 : Monthly rainfall (mm) at each station in 2015.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	80.6	92.9	94	96.5	72.9
Février	52.2	59.4	55.9	45.5	60.8
Mars	52.0	66.6	51.5	45.0	68.5
Avril	63.5	69.4	102.0	97.0	73.5
Mai	96.1	106.8	142.7	110.0	92.8
Juin	44.9	54.5	36.7	62.5	94.3
Juillet	28.7	66.6	30.9	41.0	83.8
Août	63.4	94.2	74.1	63.5	86.6
Septembre	117.8	132.1	121.1	149.0	99.0
Octobre	35.6	40.9	59.0	56.0	102.5
Novembre	37.9	70.6	67.8	38.5	83.0
Décembre	13.4	17.6	20.9	16.5	88.9
Total Annuel	685.5	876.6	856.6	821.0	1'008.9

En inter-stations, l'année 2015 se classe au 32^e rang (sur 36) de la chronologie pluviométrique 1980 - 2015 (le 1^{er} étant 2001 avec 1'298 mm, le dernier étant 1989 avec 661 mm) (tableau 2.2, figure 2.2).

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

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

Années	Pluviométrie total annuel	Années	Pluviométrie total annuel
1980	1'067.1	1998	924.6
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

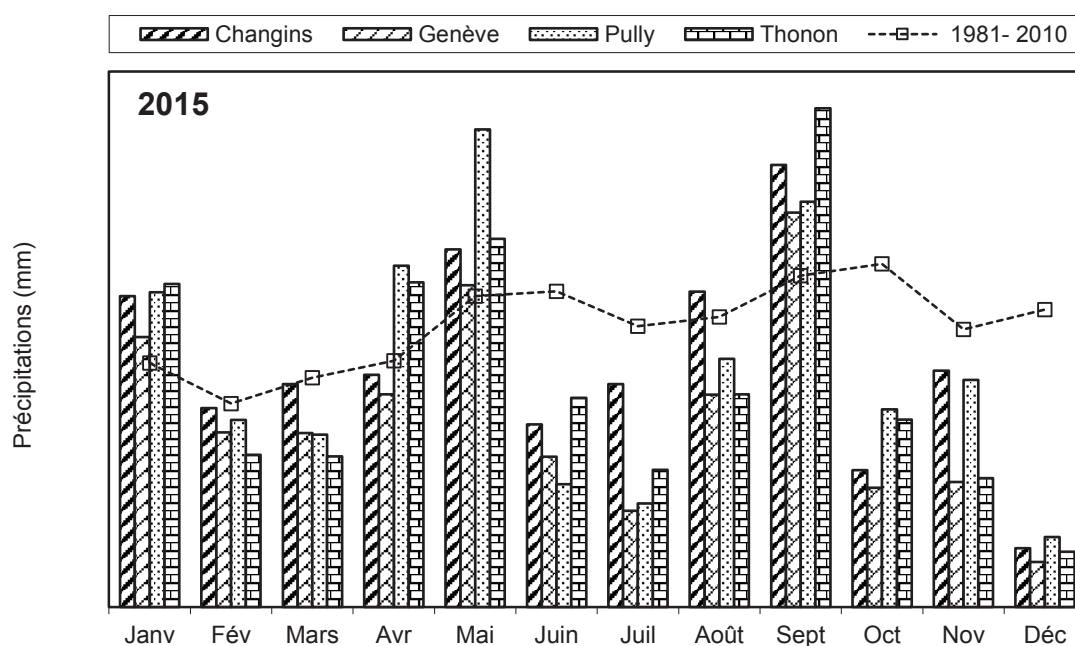


Figure 2.1 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2015 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 2.1 : Monthly rainfall at each station in 2015 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

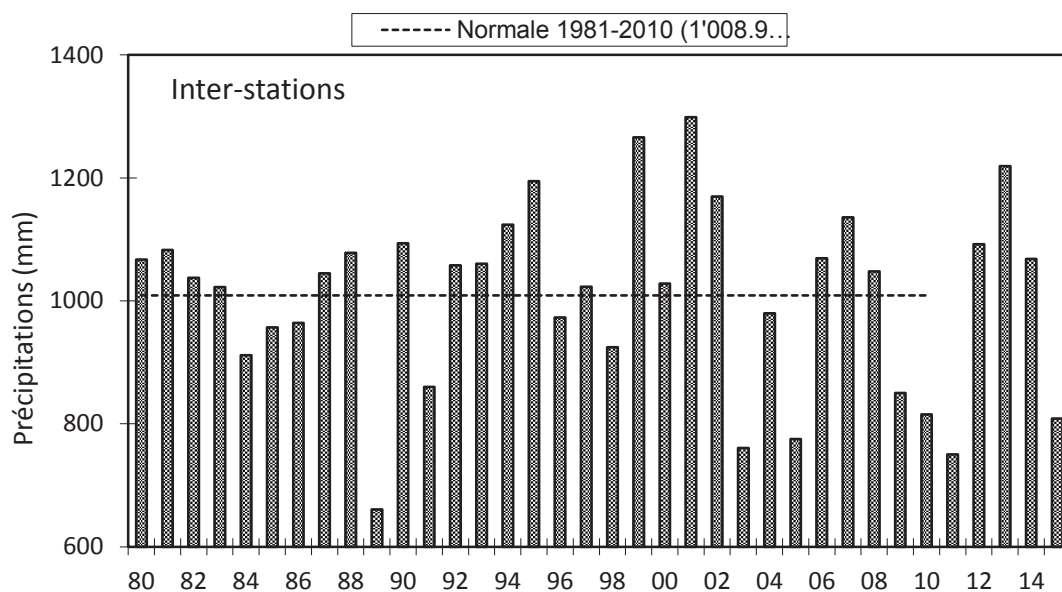


Figure 2.2 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

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

4. INSOLATION

A part le mois d'octobre et dans une moindre mesure ceux de janvier et février, l'année 2015 fut ensoleillée (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Insolation mensuelle à chaque station en 2015 (h).

Table 3.1 : Monthly insolation at each station in 2015 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	54	62	74	51	62.4
Février	82	90	100	85	90.7
Mars	161	184	175	166	156.4
Avril	209	223	222	212	182.1
Mai	235	246	220	228	208.1
Juin	263	265	256	293	236.7
Juillet	332	338	320	323	258.6
Août	230	236	229	229	236.8
Septembre	166	181	176	174	183.6
Octobre	90	109	106	98	120.0
Novembre	113	123	120	87	69.2
Décembre	61	65	90	47	49.8
Total annuel	1'996	2'122	2'087	1'992	1'841.5

L'année 2015 avec une moyenne inter-stations de 2'029 heures est une année ensoleillée. Elle se classe 5^e sur la période 1980 - 2015 (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
1980	1'672.3	1998	1'981.7
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	2'051.5

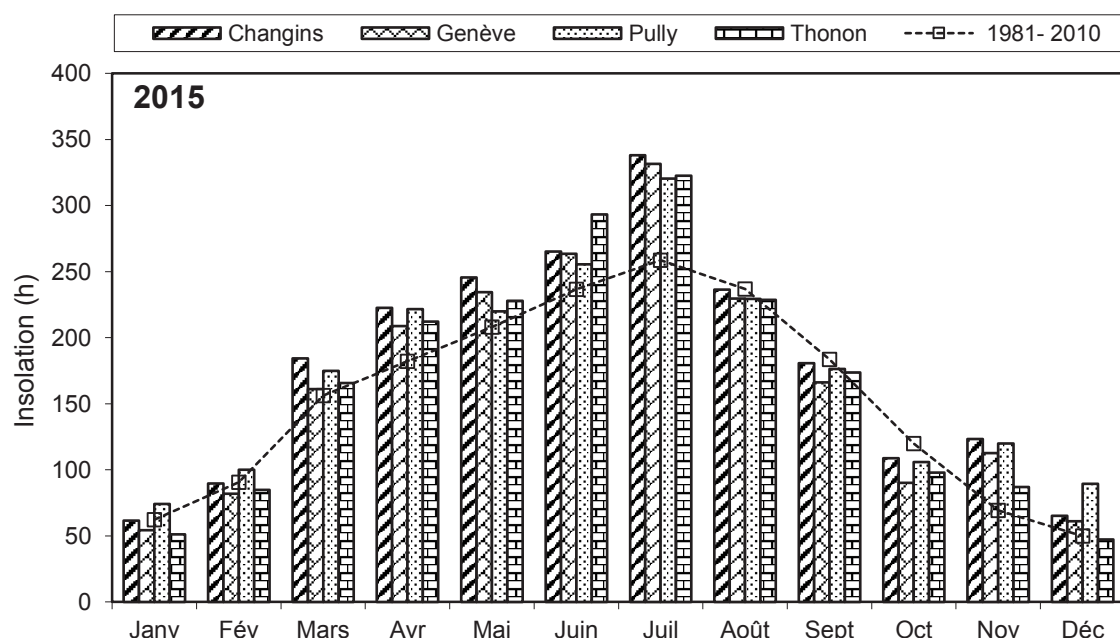


Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2015 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3.1 : Monthly insolation at each station in 2015 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

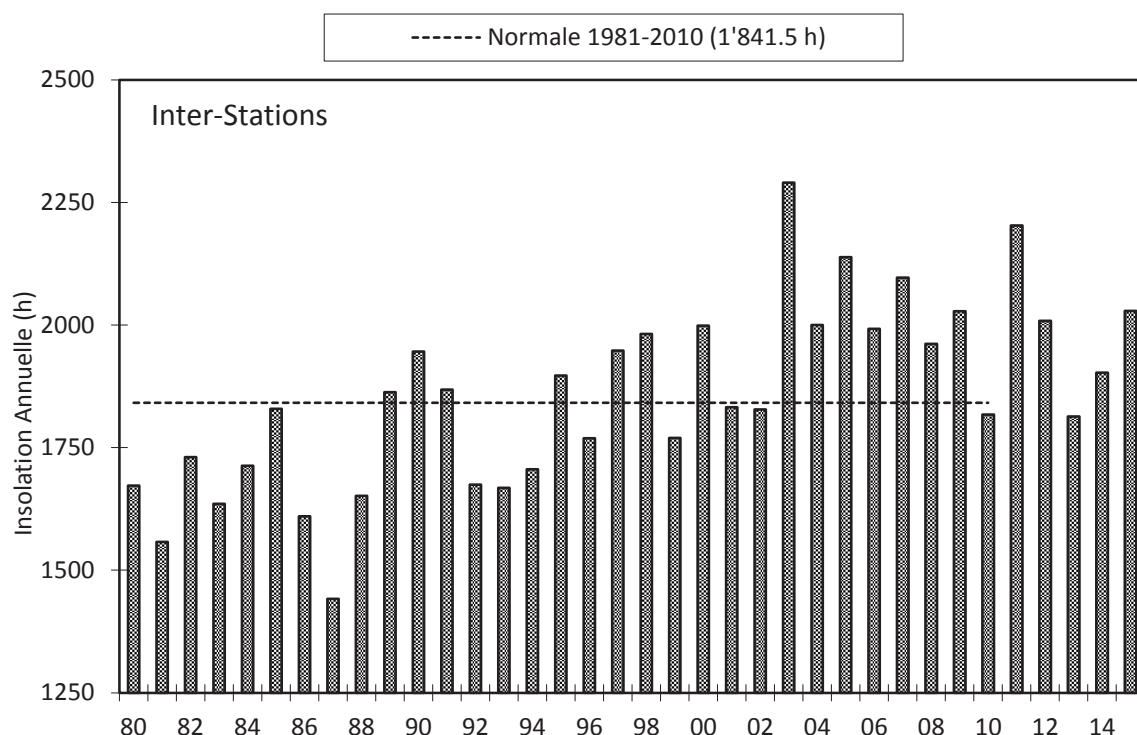


Figure 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations.

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 2015 est de $13.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

Tableau 4.1 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2015 (moyenne journalière en $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

Table 4.1 : Global monthly solar radiation at each station in 2015 (daily mean radiation in $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	3.6	3.8	4.2	3.2	3.6
Février	6.7	7.3	7.7	5.7	6.5
Mars	12.2	12.7	12.0	11.3	11.2
Avril	18.5	18.5	17.9	16.8	15.6
Mai	21.0	21.3	19.4	18.8	18.8
Juin	25.0	24.8	24.0	23.9	21.3
Juillet	25.9	26.2	24.8	24.5	21.3
Août	19.3	19.1	17.8	17.8	18.2
Septembre	14.6	14.6	13.7	13.2	13.4
Octobre	8.0	8.5	8.6	7.0	7.9
Novembre	5.7	5.9	6.0	4.8	4.3
Décembre	3.2	3.5	4.3	2.7	2.9
Moyenne Annuelle	13.6	13.8	13.4	12.5	12.04

Pour l'inter-stations en 2015, le rayonnement global annuel obtenu est de $4'869 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, ce qui classe l'année, 3^e sur la période 1980 - 2015 (tableau 4.2, figure 4.2).

Tableau 4.2 : Rayonnement global annuel en inter-stations ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Table 4.2 : Global annual solar radiation at the inter-stations ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Années	Rayonnement global total annuel	Années	Rayonnement global total annuel
1980	4'153	1998	4'378
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

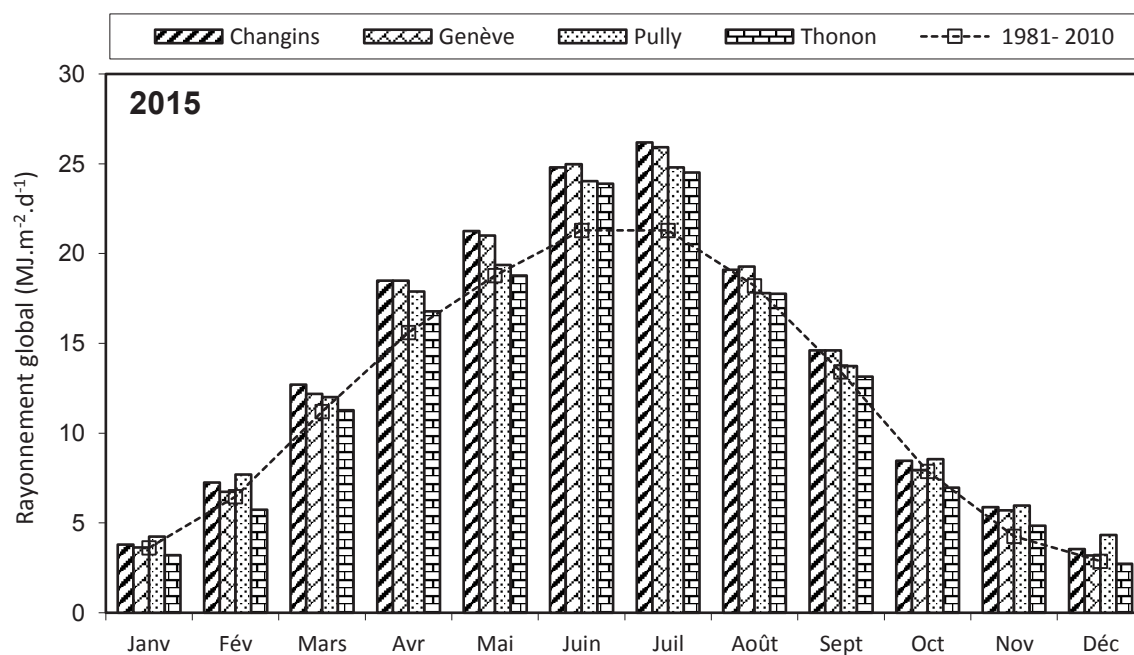


Figure 4.1 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2015 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 4.1 : Mean monthly global solar radiation at each station in 2015 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

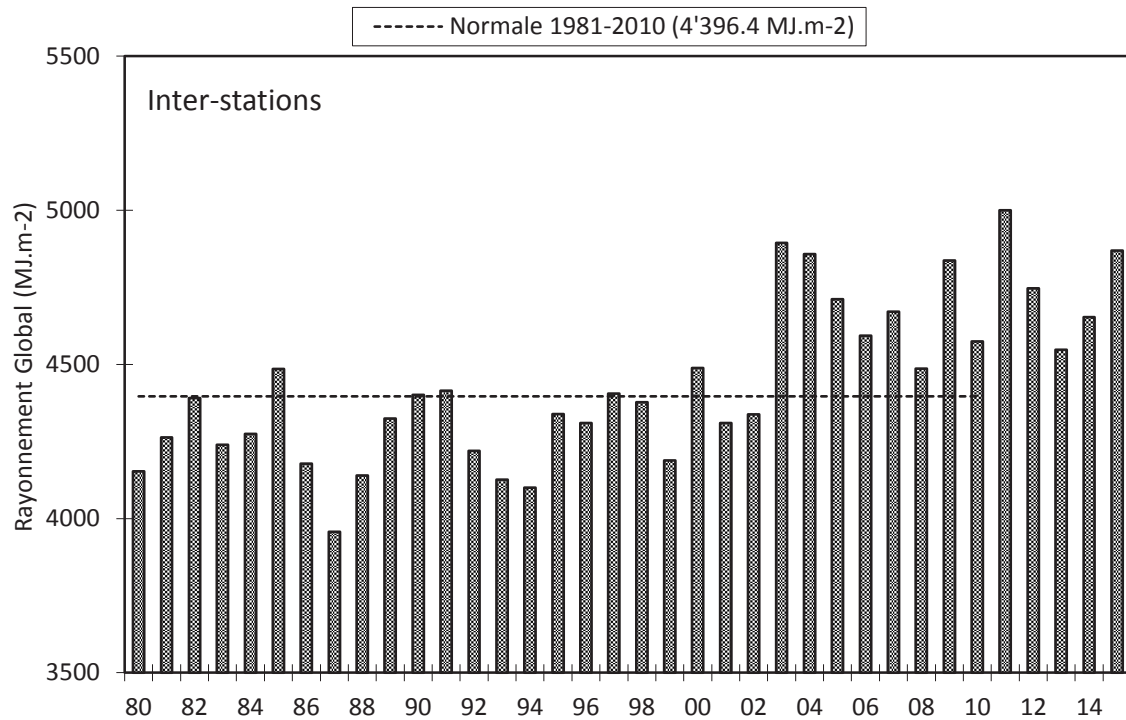


Figure 4.2 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m⁻²).

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

6. VENT

6.1 VITESSE DU VENT

En 2015 à Changins, station de référence, les mois de février, mai et septembre furent venteux. (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 : Monthly mean wind speeds in 2014 (m.s⁻¹).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1981-2010
Janvier	2.5	2.5	1.7	1.6	2.4
Février	3.0	3.3	1.7	2.6	2.8
Mars	2.8	3.0	1.1	1.5	3.3
Avril	3.0	2.8	1.4	1.6	3.3
Mai	2.8	3.0	1.4	1.5	2.8
Juin	2.5	2.2	1.4	1.3	2.8
Juillet	2.5	2.8	1.7	1.3	2.7
Août	1.9	1.9	1.1	0.8	2.6
Septembre	2.8	2.8	1.9	1.5	2.6
Octobre	1.7	1.9	1.4	1.3	2.4
Novembre	1.9	2.2	1.4	1.1	2.5
Décembre	1.1	1.1	1.1	0.6	2.6
Moyenne annuelle	2.4	2.5	1.4	1.4	2.7

Pour l'année 2015 à Changins, il a été enregistré 23 jours de vent fort ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) dont simplement 2 (+1) jours durant le 4^e trimestre (figure 5.2). Le maximum de vent moyen journalier a été relevé pour l'année 2015 le 05 février (avec 10.25 m.s^{-1}). De plus, il y a eu en 2015, 4 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 : Annual mean wind speed at Changins (m.s^{-1}).

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1980	2.5	1998	3.0
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	2015	2.5

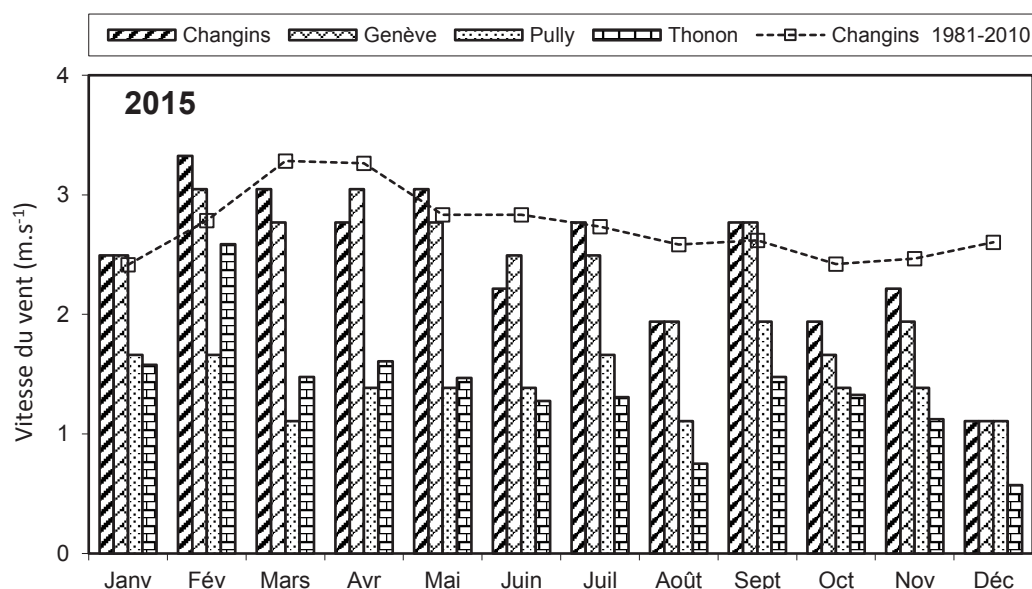


Figure 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2015 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5.1 : Mean monthly wind speeds at each station in 2015 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

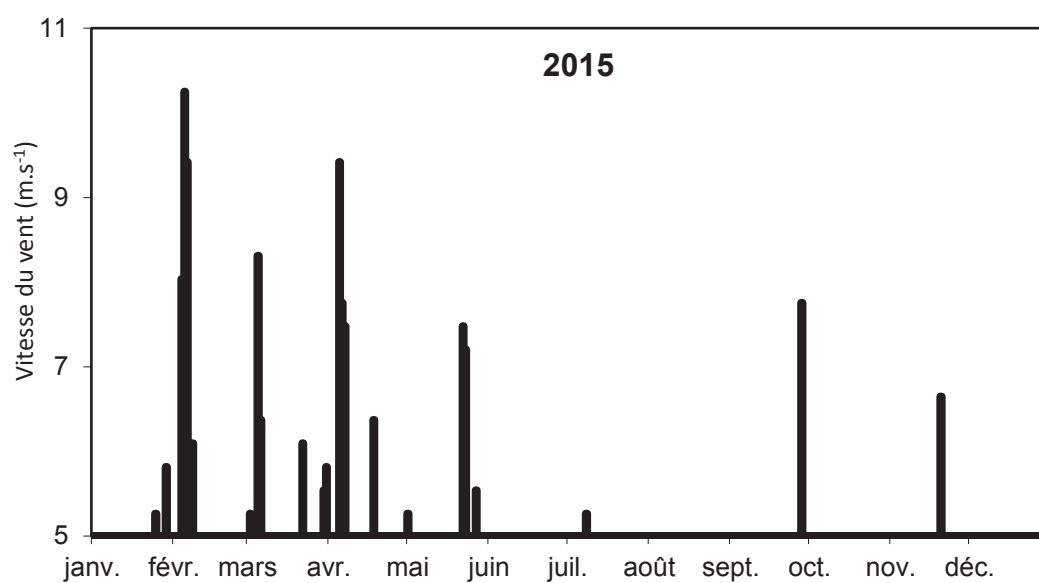


Figure 5.2 : Répartition annuelle (en 2015) des vents forts ($> 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) à Changins.

Figure 5.2 : Annual distribution (in 2015) of strong winds ($> 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) at Changins.

6.2 ROSE DES VENTS

Pour l'année 2015 à Changins, 60 % des vents (figure 5.3) se répartissent principalement selon le demi-cercle S-O-N. Les vents qui sont supérieurs à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 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.

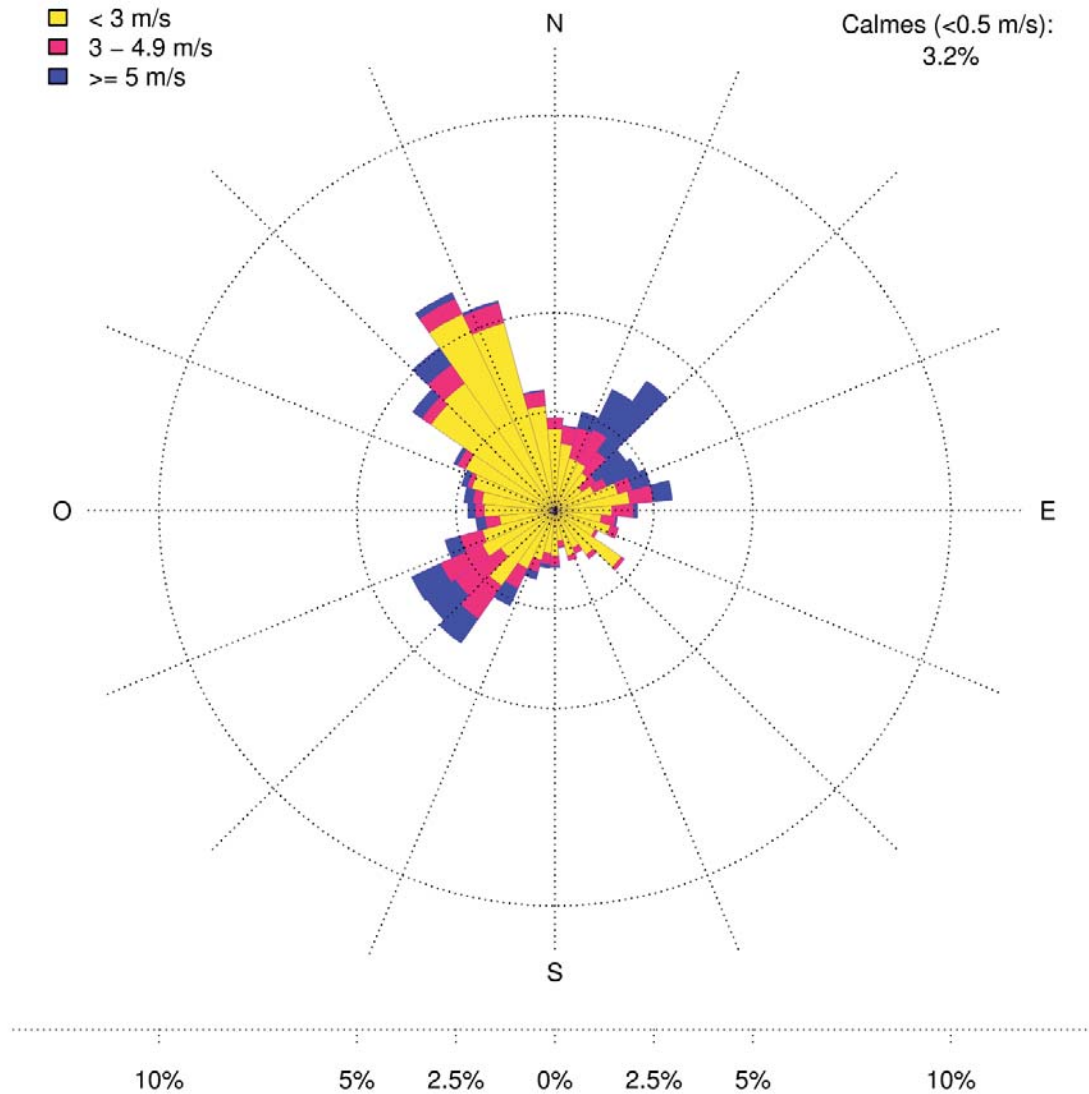


Figure 5.3 : Rose des vents moyens à Changins en 2015 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle : % d'occurrence).

Figure 5.3 : Wind directions at Changins in 2015 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).