

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN

DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

APPORTS PAR LES AFFLUENTS AU LÉMAN ET AU RHÔNE À L'AVAL DE GENÈVE

PHYSICO-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA

METEOROLOGICAL DATAS

CONTRIBUTIONS FROM THE TRIBUTARIES OF LAKE GENEVA AND FROM THE RHONE BELOW GENEVA

CAMPAGNE 2014

PAR

Liliane SAVOYE et Philippe QUETIN

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

Audrey KLEIN

SECRÉTARIAT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN

ACW - Changins - Bâtiment DC, CP 1080, CH - 1260 NYON 1

RÉSUMÉ

L'année climatique 2014 sur les rives du Léman peut être considérée comme relativement chaude, faiblement venteuse, normalement humide et ensoleillée.

L'hiver 2014 a été relativement doux, induisant une homogénéisation partielle des couches d'eau du Léman jusqu'à 105 m. Ce brassage incomplet n'a donc pas permis de réoxygéner les couches inférieures et de redistribuer les nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau.

Un printemps précoce entraîne dès le début du mois de mars une reprise avancée de l'activité phytoplanctonique et donc, une baisse significative des nutriments conjointement à une augmentation de la matière organique particulaire. En mai, une augmentation de la transparence du fait d'une décroissance précoce de la biomasse algale délimite une phase peu marquée des eaux claires. A la fin de l'été, une prolifération algale intense donne lieu à des concentrations en nutriments à l'état de traces excepté pour l'azote nitrique.

Bien que la réoxygénation de la colonne d'eau soit partielle en 2014, le relargage de phosphore est relativement limité. Ce phénomène, également constaté en 2013, conduit à supposer que la charge en phosphore dans les sédiments est désormais faible.

Le stock ainsi que la concentration moyenne en azote nitrique dans le Léman sont élevés en 2014 néanmoins ceux-ci sont légèrement inférieurs à 2013. Ces fortes valeurs pourraient s'expliquer en partie par une pluviométrie assez importante qui a entraîné un lessivage des sols du bassin versant et ainsi des apports d'azote nitrique vers le Léman.

Le stock de phosphore total en 2014 est quasiment identique à l'année antérieure. La concentration moyenne semble se stabiliser autour de $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ depuis les deux dernières années.

Enfin, le stock de chlorure continuer à augmenter en 2014. La concentration moyenne annuelle, dorénavant supérieur à $10 \text{mgCl}\cdot\text{L}^{-1}$, tend de plus en plus vers les teneurs moyennes des apports par les affluents du Léman.

Concernant les apports en nutriments, les 4 principaux affluents du Léman (le Rhône amont, la Dranse, l'Aubonne et la Venoge) ainsi que le Rhône à l'aval de Genève et ses affluents (l'Arve et l'Allondon) ont été suivis.

Les concentrations en azote, phosphore et chlorures sont stables par rapport à 2013 et les flux ont légèrement baissé en raison de débits plus faibles liés à la pluviométrie de l'année également plus faible qu'en 2013.

ABSTRACT

The climatic year 2014 on the shores of Lake Geneva can be considered relatively warm, slightly windy as well as regularly humid and sunny, in spite of a very mild winter and spring followed by a particularly cold and humid summer.

The very mild winter caused a partial homogenization of water layers until 105 m, thus not re-oxygenating the lowers layers nor redistributing nutrients throughout the entire water column.

An early spring brought with it the resumption of phytoplanktonic activity and therefore a significant drop in nutrients, in conjunction with a rise in particulate organic matter. In May, increasing water transparency due to the early decrease of algal biomass gave rise to an inconspicuous phase of clear water. At the end of summer, an intense proliferation of algae led to nutrient concentrations at trace levels, with the exception of nitrate-nitrogen.

Although there was partial re-oxygenation in 2014, the release of phosphorus was relatively limited. This phenomenon, also noted in 2013, leads to the hypothesis that the amount of sediment phosphorus henceforth is low.

The mean concentration as well as the stock of nitrate-nitrogen in Lake Geneva were high in 2014, albeit slightly inferior to 2013. These high values could partially be explained by considerable rainfall, leading to leaching of the grounds of the drainage basin and ensuing nitrogen inputs into Lake Geneva.

The total stock of phosphorus in 2014 was nearly identical to the previous year. The average concentration seems to have leveled off at around $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ for the past two years.

Finally, the stock of chloride continued to grow in 2014. The mean yearly concentration, henceforth above $10 \text{mgCl}\cdot\text{L}^{-1}$, was increasingly similar to the average content found in the tributaries of Lake Geneva.

Regarding nutrient inputs, the four main tributaries of Lake Geneva (the upriver sector of the Rhone, the rivers Dranse, Aubonne and Venoge) as well as the Rhone downriver from Geneva and its tributaries (the Arve and the Allondon) were monitored.

Concentrations in nitrogen, phosphorus and chloride were stable in comparison with 2013 and the flows decreased slightly, due to lower flow rates related to the annual pluviometry equally weaker as in 2013.

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman en 2014, plus précisément du Grand Lac à la station SHL2, et présente les résultats et 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). L'étude du Petit Lac à GE3 fait l'objet d'un rapport tous les 5 ans. Le dernier suivi du Petit Lac a eu lieu en 2010 (LAZZAROTTO et *al.*, 2011), par conséquent, le prochain est prévu en 2015.

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 2014 (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).

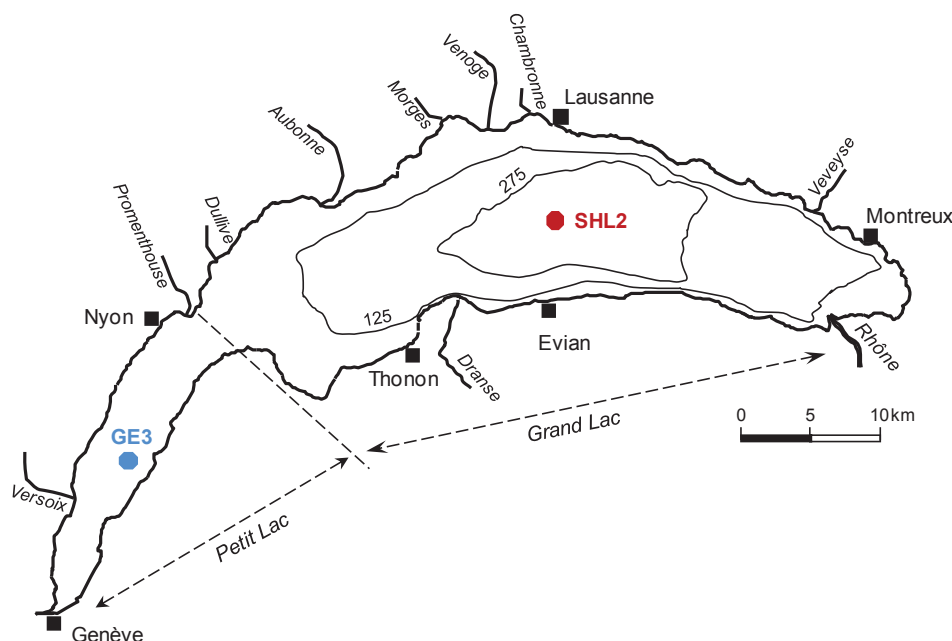


Figure 1 : Situation des points de prélèvement sur le Léman

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).

La station GE3 est également admise comme représentative de la partie profonde du Petit Lac.

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

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

Il y a eu 21 campagnes de prélèvements en 2014, 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	13.01.2014
2	18.02.2014
3	12.03.2014
4	25.03.2014
5	07.04.2014
6	22.04.2014
7	05.05.2014
8	19.05.2014
9	02.06.2014
10	30.06.2014
11	16.07.2014
12	28.07.2014
13	12.08.2014
14	28.08.2014
15	08.09.2014
16	24.09.2014
17	08.10.2014
18	20.10.2014
19	05.11.2014
20	24.11.2014
21	15.12.2014

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 3 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 2014 par les différents laboratoires sont concordants (VARGAS, 2015). 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.

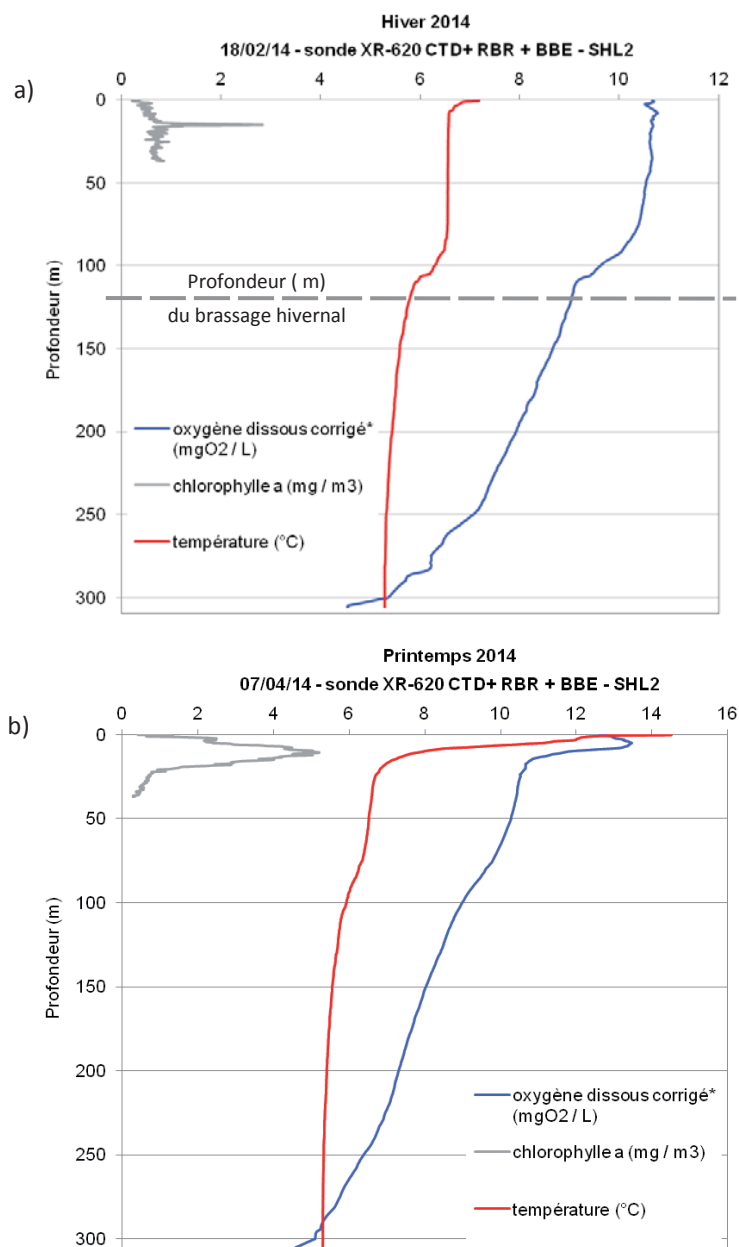
Lors de chaque campagne, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH et chlorophylle *a* in vivo sont réalisés à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable (BLANC et *al.*, 1993). Dans le même temps, une mesure de la transparence est 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 est présentée en annexe IV. L'analyse par régression linéaire montre que les valeurs obtenues pour les deux types de disques sont significativement corrélées ($R^2 = 0,97$; $n > 100$) ; toutefois, le disque de Secchi normalisé donne systématiquement une valeur de transparence plus faible d'en moyenne 1 m.

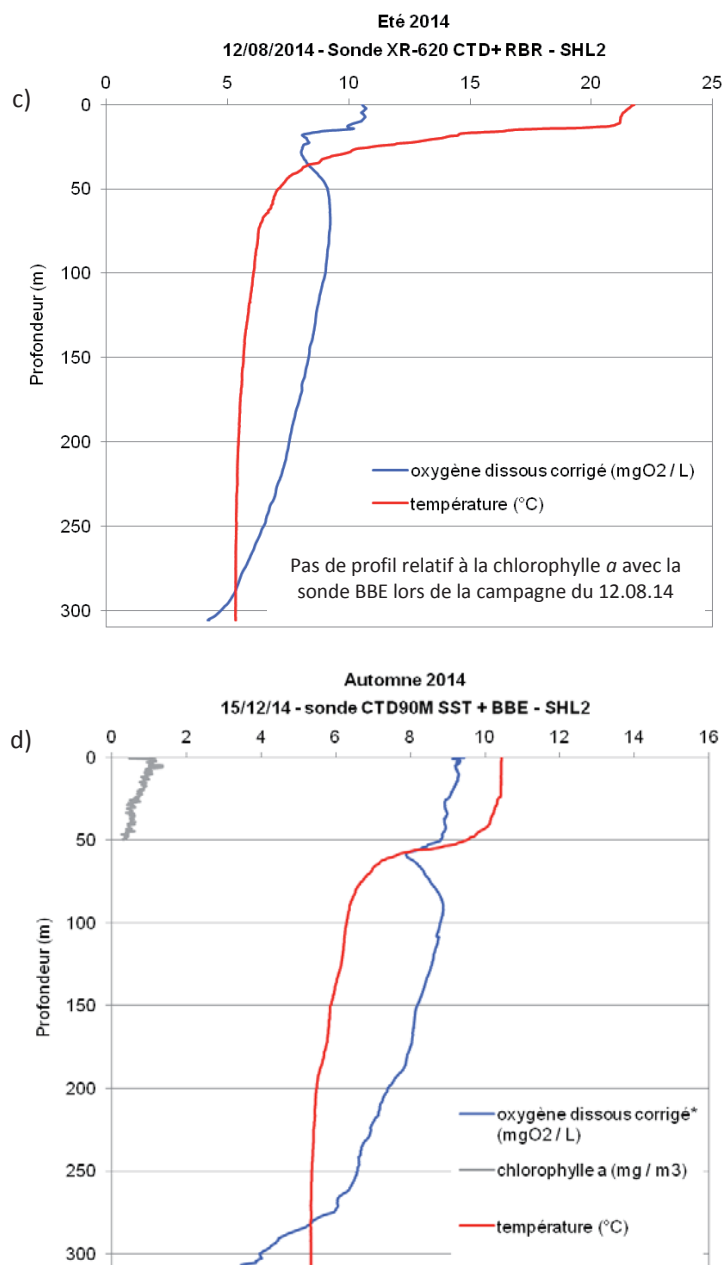
3. RÉGIME THERMIQUE : INFLUENCE SUR LA STRATIFICATION ET LE MÉLANGE DES EAUX

En 2014, les températures des quatre premiers mois peuvent être classifiées comme chaudes. Par contre pour les mois de juillet, août et dans une moindre mesure mai, les températures furent inférieures à leur moyenne inter-stations sur la période 1981 - 2010. En 2014, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.7 °C, soit la même qu'en 2003.

Les conditions météorologiques de l'hiver 2014, tout comme l'année précédente, 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 105 m de profondeur à la date du 18 février 2014 (Figure 2a). Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 5.3 °C le 13 janvier 2014 soit 0.2 et 0.1 °C de plus qu'en 2012 et 2013, respectivement. 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 4.57 mgO₂·L⁻¹.

Au printemps, les couches superficielles se réchauffent rapidement. Une stratification thermique précoce se met en place induisant une reprise avancée de l'activité phytoplanctonique (Figure 2b). La température maximale en surface est observée le 12 août 2014 avec 21.8 °C contre 25.3 °C à la même période de l'année précédente à cause d'un été frais en 2014 (Figure 2c). L'arrivée tardive de l'automne engendre une destratification thermique retardée de la masse d'eau et ainsi un déclin différé de l'activité photosynthétique (Figure 2d). A titre d'exemple, la température de l'eau à la surface le 15 décembre 2014 est égale à 10.5°C contre 7.7 °C en 2013.





* 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

(Profil de température et de l'oxygène dissous corrigé avec la sonde XR-620 CTD+ RBR ou CTD90M SST et profil de la chlorophylle *a* avec la sonde BBE)

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 (18.02.2014),
- b) au printemps (07.04.2014),
- c) en été lors de la stratification thermique maximale (12.08.2014),
- d) en automne (15.12.2014)

Figure 2 : Physico-chemical profile made using multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2) :

- a) in winter after maximal water mixing (18.02.2014),
- b) in spring (07.04.2014),
- c) in summer during the maximal thermal stratification (12.08.14),
- d) in autumn (15.12.2014)

Les figures 3 à 6 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 2014 confirme globalement la tendance croissante observée ces vingt dernières années (Figures 3, 4 et 5). La figure 6, quant à elle, indique une dynamique de stratification thermique graduelle de la couche d'eau 0 - 10 m en 2014 du fait d'un été relativement frais contre 0 - 20 m en 2013.

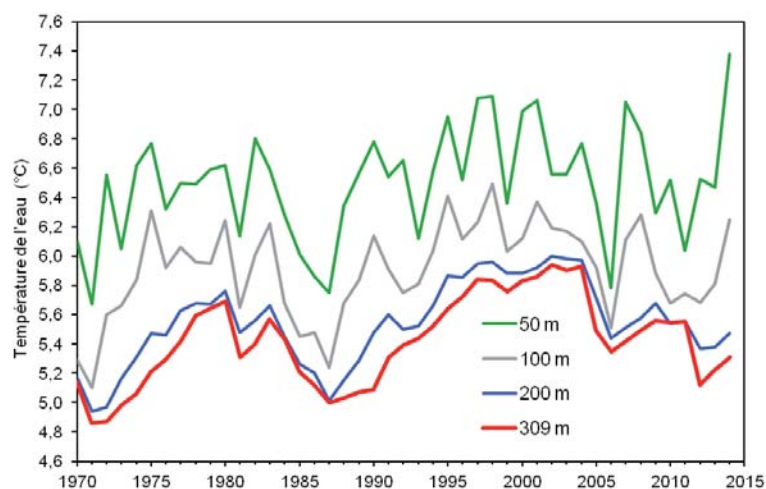


Figure 3 : Evolution de la température moyenne de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1970 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 3 : Change in the mean annual water temperature in the lake at depths of 50, 100, 200 and 309 meters from 1970 to 2014, lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

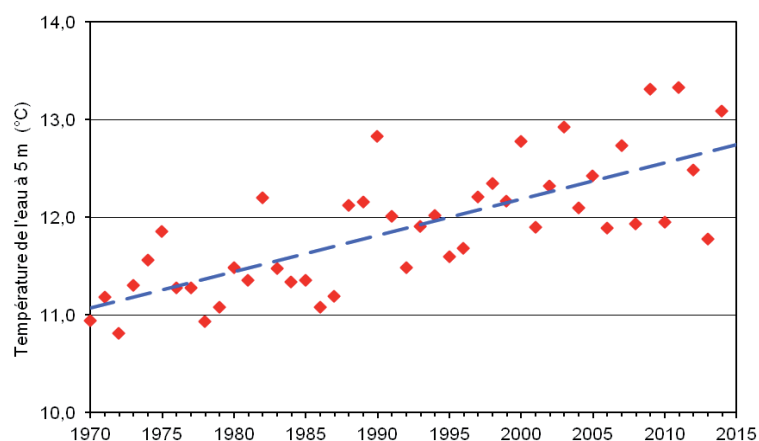


Figure 4 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du lac à 5 mètres de profondeur de 1970 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 4 : Change in the mean annual water temperature of the lake at a depth of 5 meters from 1970 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

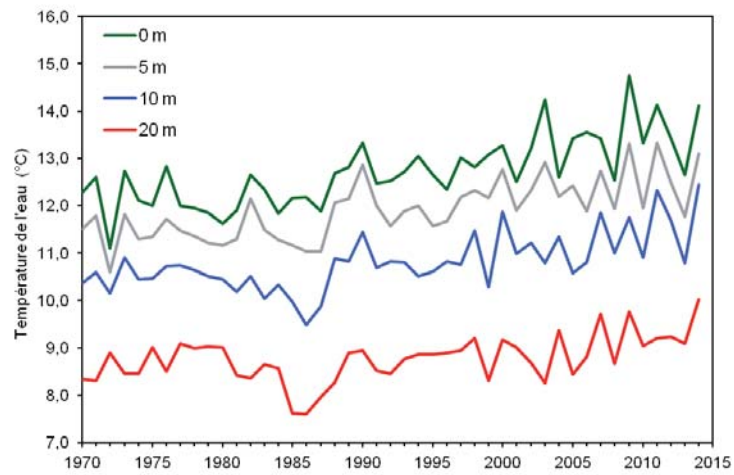


Figure 5 : Evolution de la température moyenne de l'eau du lac dans les couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) de 1970 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 5 : Change in the mean annual water temperature in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 et 20 m) from 1970 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

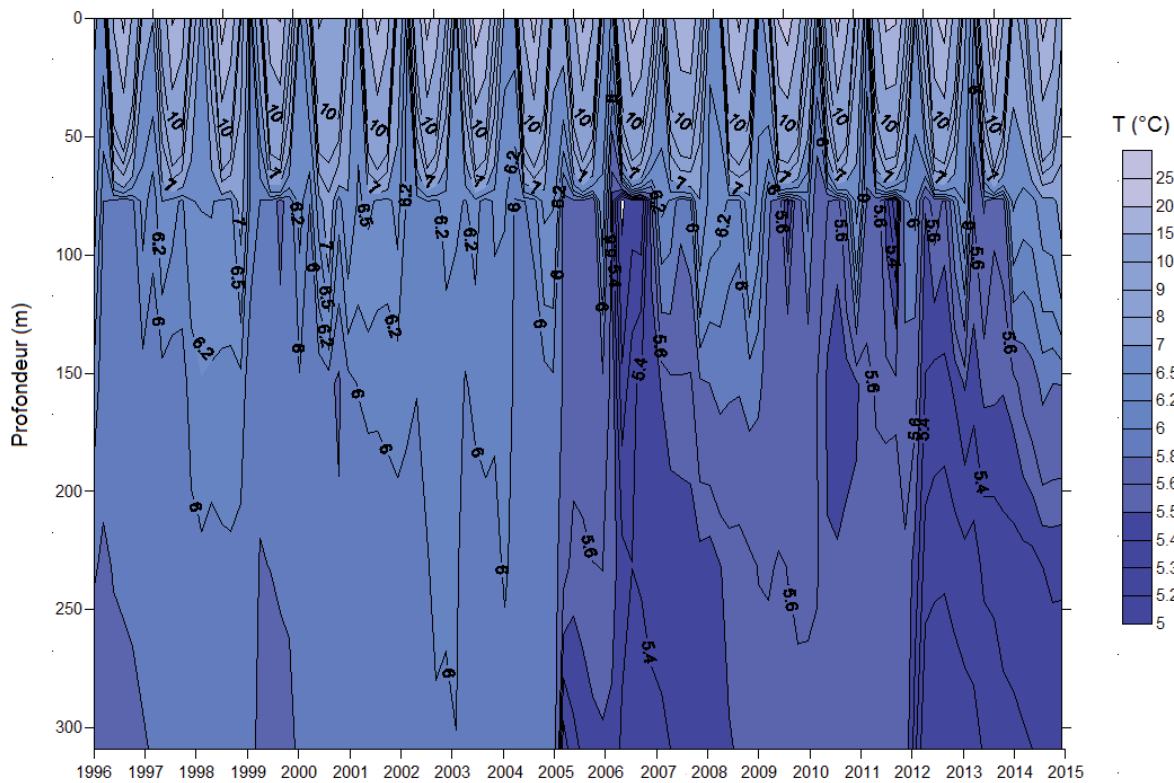


Figure 6 : Température des eaux du lac en fonction de la profondeur de 1996 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

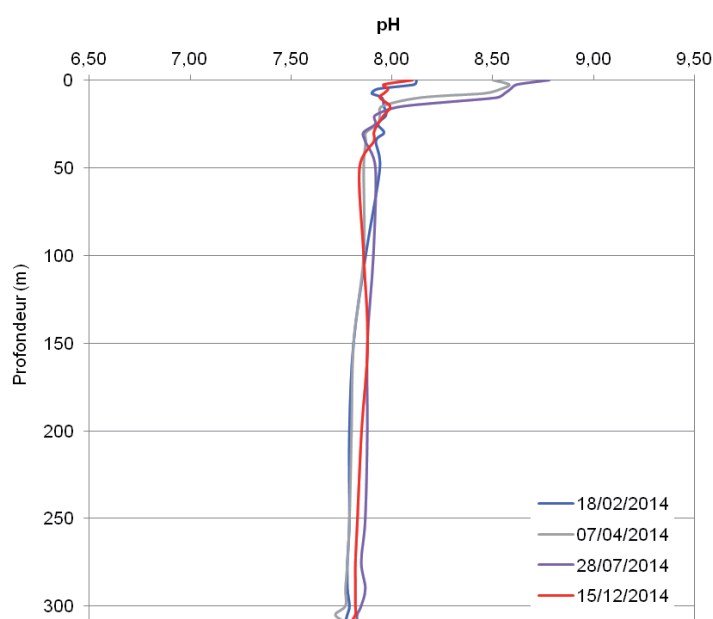
Figure 6 : Water temperature in the lake as a function of depth from 1996 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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 7 représente l'évolution saisonnière du pH dans la colonne d'eau du lac. A l'issue du brassage hivernal partiel jusqu'à 105 m, le pH de la colonne d'eau oscille globalement entre 7.77 et 7.97, tel que l'on peut l'observer sur le profil du 18 février 2014 en bleu sur la figure 7, à l'exception d'un pH en surface de 8.12 qui dénote déjà la présence de phytoplancton. La reprise précoce de l'activité phytoplanctonique printanière provoque une augmentation très marquée du pH dès le début du mois d'avril 2014. 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 8.78 a été mesuré en surface le 28 juillet 2014.



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

Figure 7 : 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 7 : 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 8 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.

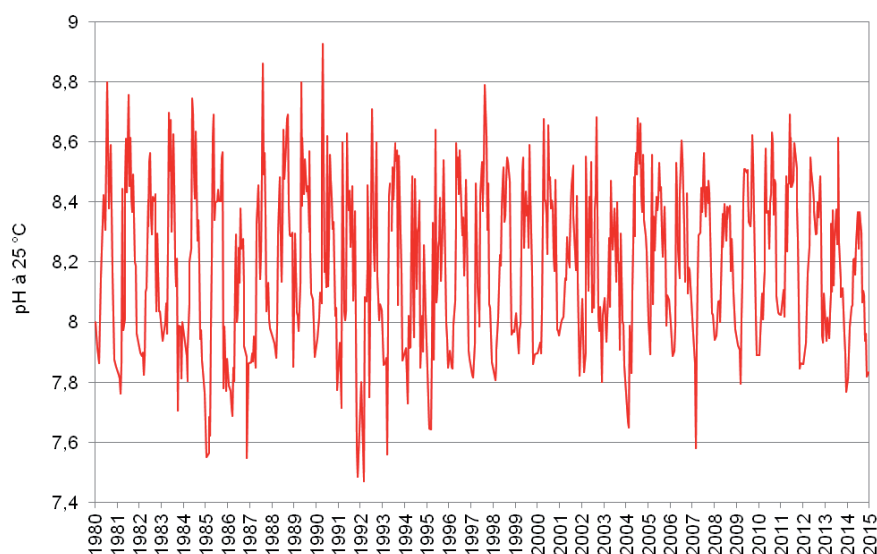


Figure 8 : Evolution du pH à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

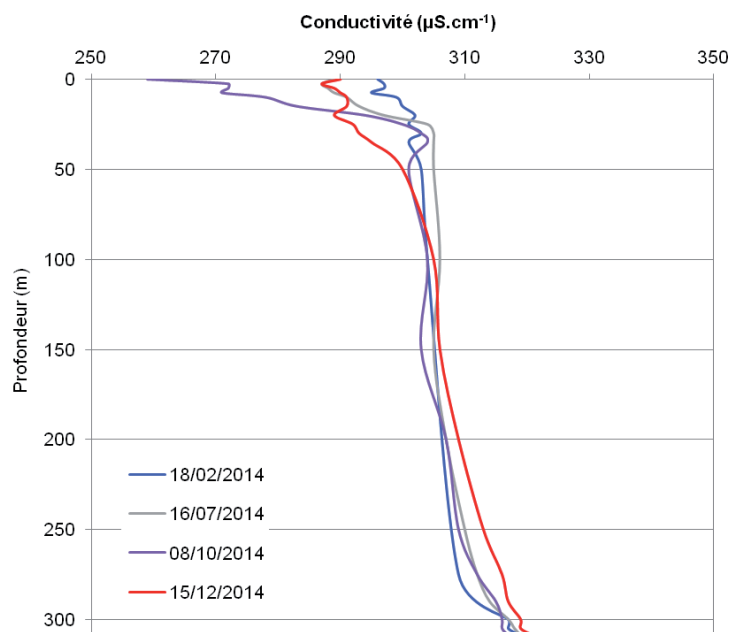
Figure 8 : Change in pH at 25°C in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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 9 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 18 février 2014 au moment du brassage hivernal partiel et varie entre 278 et 302 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Par la suite, la conductivité commence à diminuer de manière significative à partir du mois de juillet 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 259 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 0 m tel que cela est représenté en violet sur la figure 9.

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 provoquant le relargage de plusieurs sels dissous.



* 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 10 représente l'évolution de la conductivité dans les couches d'eau superficielles (0 - 20 m) sur la chronique de 1980 à 2014. Tel que le pH, la conductivité ne reflète pas de modification temporelle sur le long terme.

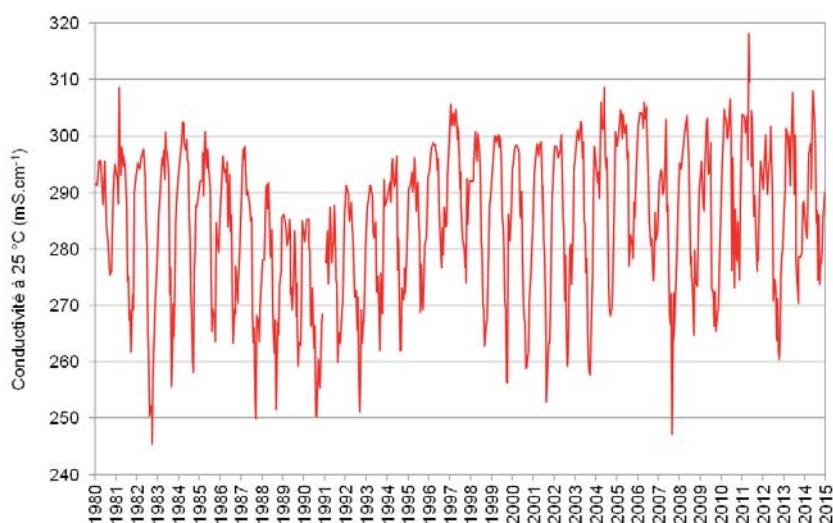


Figure 10 : Evolution de la conductivité à 25°C dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10 : Change in the conductivity at 25°C in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2014, 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 2014, le TAC est hétérogène dans la colonne d'eau et fluctue entre 1.74 et 1.96 meq·L⁻¹. Au mois de juin 2014, 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 11). Le titre alcalimétrique complet minimum dans l'épilimnion est mesuré le 28 août 2014 avec environ 1.50 meq·L⁻¹ de 0 à 15 m. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois de septembre 2014.

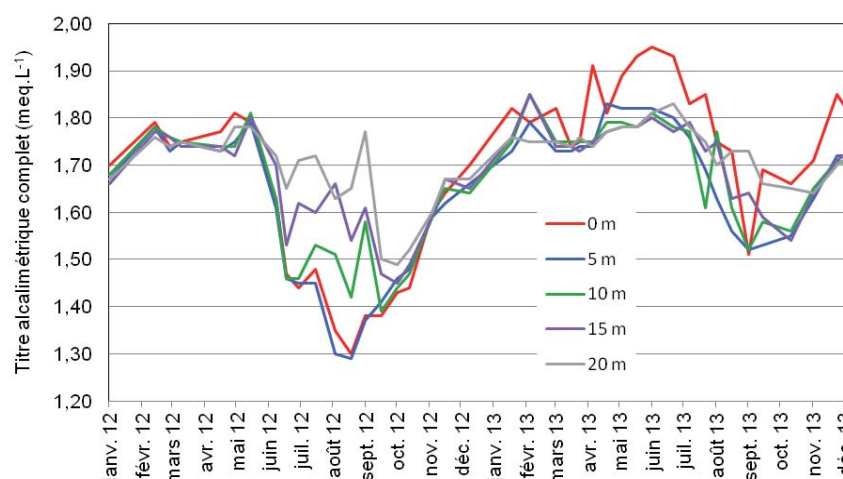


Figure 11 : Titre alcalimétrique complet dans l'eau de la couche superficielle (0-20m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 11 : Total alkalinity in lake's water surface layer (0-20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 12 représente l'évolution du titre alcalimétrique des eaux superficielles (0 - 20 m) de 1980 à 2014. 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.

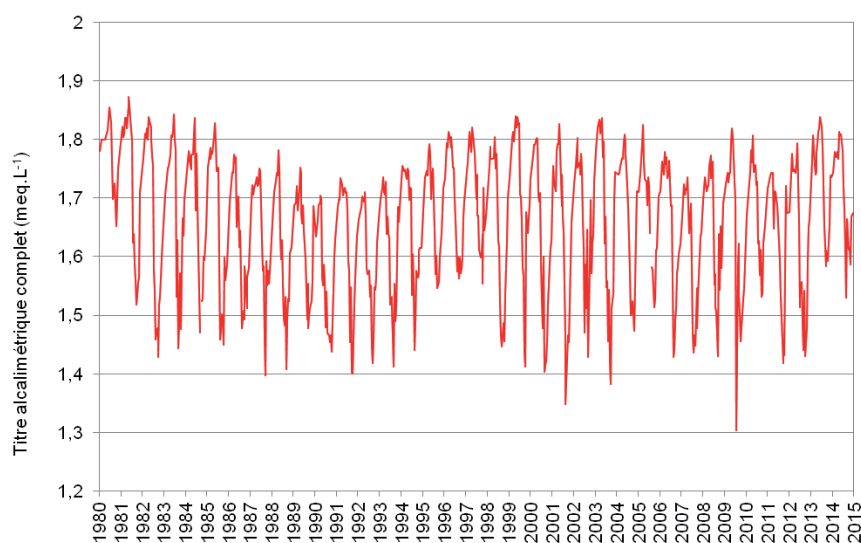


Figure 12 : Evolution du titre alcalimétrique complet dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1980 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 12 : Change in total alkalinity in lake's water surface layer (0 - 20 m) from 1980 to 2014, 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 2014 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

A l'issue du brassage partiel du lac en 2014, une concentration moyenne maximale en phosphore réactif soluble de $11.9 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ est détectée le 18 février 2014 entre 0 et 20 m (Figure 13). Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle observée l'année précédente, avec $10.8 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$, à la suite d'une homogénéisation partielle de la colonne d'eau.

On constate que la teneur en orthophosphates dans l'eau des couches superficielles diminue dès la campagne suivante, c'est-à-dire le 12 mars 2014 en réponse au démarrage avancée de l'activité phytoplanctonique printanière. La consommation de phosphore biodisponible se poursuit pour atteindre l'état de traces à la date 7 avril 2014 et ce jusqu'à la fin de l'année.

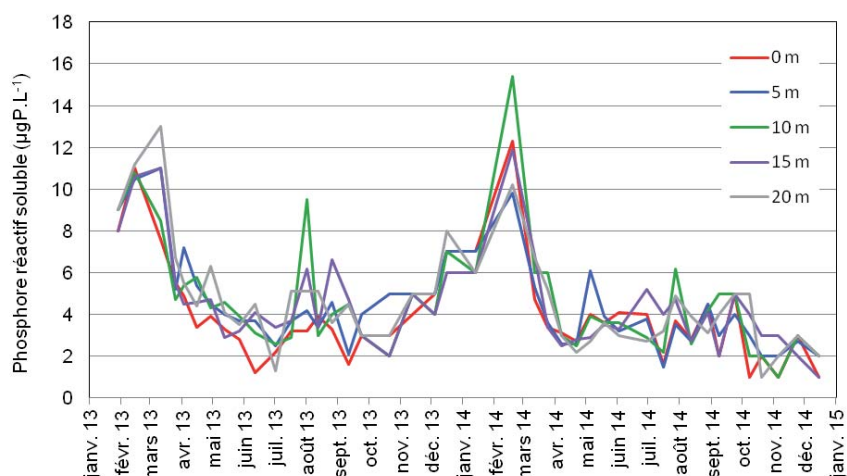


Figure 13 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO_4^{3-}) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 13 : 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 14 représente l'évolution depuis 1996 du stock en phosphore total et en orthophosphate dans les couches 0 - 30 m et 0 - 50 m lors du brassage hivernal, soit dans les couches où il est disponible pour l'activité phytoplanctonique. Le stock en orthophosphate, directement biodisponible, est plus faible que l'année précédente du fait de deux 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 en termes de relargage induit par l'intensité de désoxygénation au fond du lac.

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 30). 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.

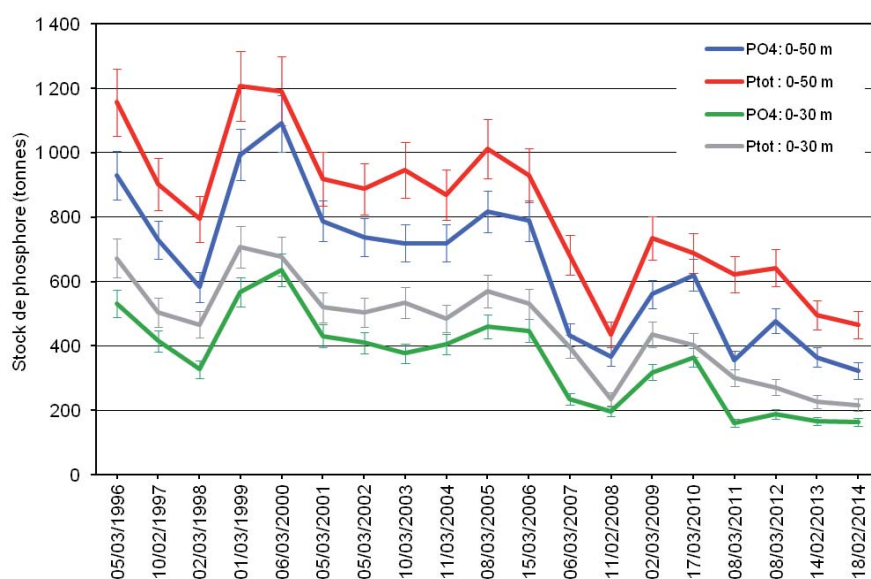


Figure 14 : Stock de phosphore réactif soluble ($P\text{-PO}_4^{3-}$) et phosphore total dans les eaux des couches 0 - 30 et 0 - 50 m de 1996 à 2014 lors du brassage hivernal, Léman - Grand Lac (SHL 2)

Figure 14 : Stock of soluble reactive phosphorus ($P\text{-PO}_4^{3-}$) and total phosphorus in the lake's water surface layers of 0 - 30 and 0 - 50 m from 1996 to 2014 during 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 18 février 2014, avec en moyenne $600 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ entre 0 et 20 m ce qui est comparable à l'année antérieure avec environ $584 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figure 15). Avec respectivement, 1'068 et 1'219 mm de pluie en 2014 et 2013, ces fortes teneurs s'expliquent en partie par la pluviométrie, qui a entraîné une forte mobilisation d'azote nitrique dans le bassin versant du lac et par conséquent des apports importants de cet élément via les affluents du Léman.

La concentration en azote nitrique des couches superficielles diminue significativement à partir de mi-mars 2014 tel qu'on peut l'observer sur la figure 15. Par la suite, la consommation de l'azote nitrique continue et la concentration de cet élément atteint un minimum le 28 août 2014 avec $250 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ à la surface du lac. L'abaissement de l'azote nitrique est moindre par rapport à 2012 (SAVOYE et al., 2014), où des concentrations à l'état de traces, de l'ordre de 20 à $30 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$, étaient mesurées à 0 et 5 m au mois d'août. Cette différence peut s'expliquer en partie par des apports d'azote nitrique par les cours d'eau alimentant le Léman du fait d'une pluviométrie assez élevée en 2014 (Annexe VI).

Finalement, la consommation ralentit dès le mois de septembre pour atteindre de nouveau, en décembre, une concentration moyenne en azote nitrique de $507 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ dans l'eau des couches superficielles.

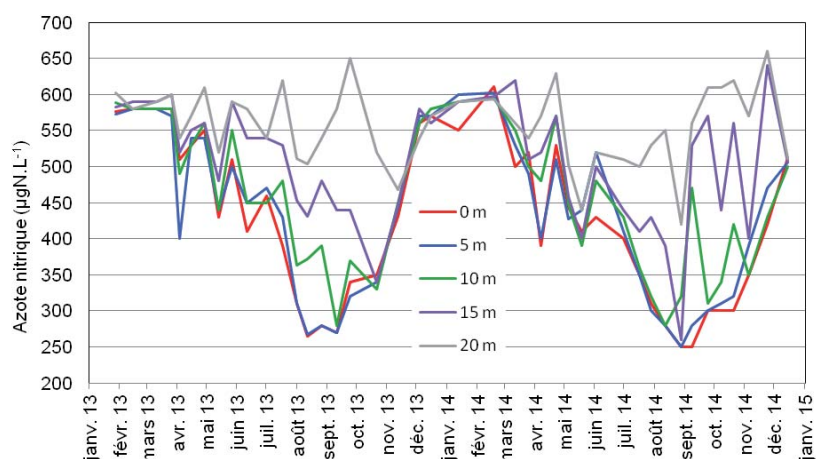


Figure 15 : Concentration en azote nitrique (N-NO_3^-) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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

La figure 16 représente l'évolution du stock d'azote total et d'azote nitrique dans les couches 0 - 30 m et 0 - 50 m lors du brassage hivernal de 1996 à 2014. On observe une relative stabilité du stock d'azote sur cette chronique de 1996 à nos jours.

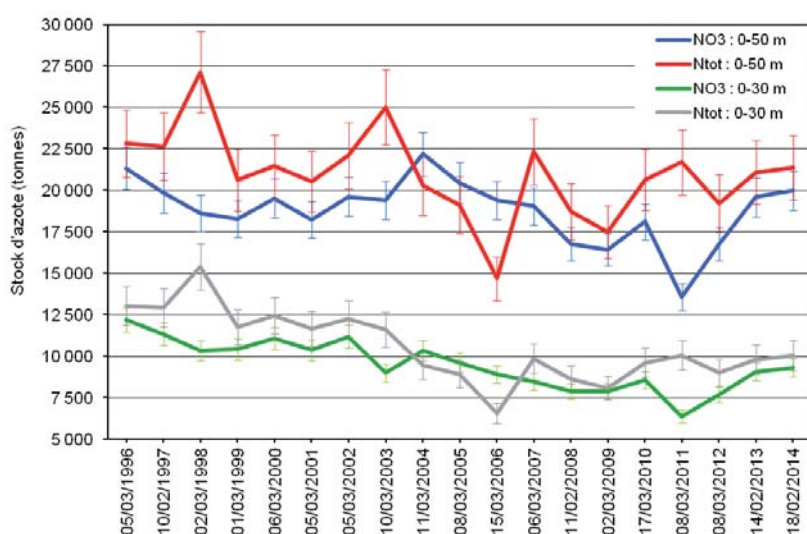


Figure 16 : Stock d'azote nitrique (N-NO_3^-) et d'azote total dans les eaux des couches 0 - 30 et 0 - 50 m de 1996 à 2014 lors du brassage hivernal, Léman - Grand Lac (SHL 2)

Figure 16 : Stock of nitrate (N-NO_3^-) and total nitrogen in the lake's water surface layers of 0 - 30 and 0 - 50 m from 1996 to 2014 during winter mixing, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

L'activité zooplanctonique précoce, due à un printemps avancé, entraîne une augmentation significative de la concentration en azote ammoniacal dès le mois de mars 2014 du fait des excréments de ces organismes mais également des poissons et de la dégradation microbienne de la matière organique (LAINE et PERGA, 2015). Néanmoins, cette activité printanière est légèrement inférieure à celle observée l'année précédente avec, par exemple, une concentration en azote ammoniacal le 5 mai 2014 de $22.4 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ à 20 m contre $24.5 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ en 2013 à profondeur identique et durant la même période de l'année (figure 17).

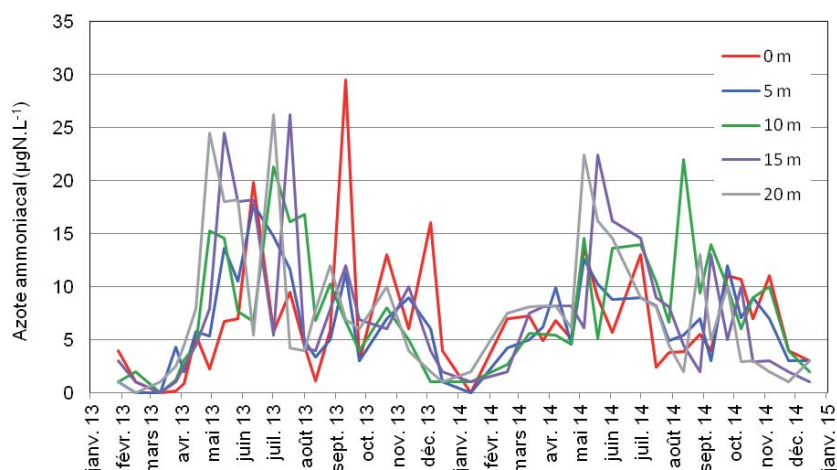


Figure 17 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH_4^+) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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

5.3. SILICE

L'homogénéisation partielle de l'hiver 2014, telle qu'en 2013, 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 18). La plus forte concentration en silice dans les couches d'eau superficielles est tout de même observée le 18 février 2014 à l'issue du brassage partiel maximal. La teneur moyenne en silice est alors égale à $1.14 \text{ mgSiO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ entre 0 et 20 m contre $1.17 \text{ mgSiO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ en 2013 à la même période de l'année (Figure 19).

Dès la campagne suivante, le 12 mars 2014, la silice commence à être consommée par l'activité phytoplanctonique précoce des algues diatomées (RIMET, 2015) pour atteindre à la fin du mois d'avril des concentrations relativement faibles de l'ordre de $0.32 \text{ mgSiO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ à 0 m.

A partir du mois de mai, la concentration en silice se stabilise en parallèle à la diminution du peuplement des diatomées. Par la suite, un nouveau fléchissement apparaît au mois de juin correspondant à l'apparition de nouvelles communautés d'algues (RIMET, 2015). Dès le mois d'août, l'abatement de la silice dans les couches d'eau de 0 à 5 m s'accroît pour atteindre l'état de traces au début du mois de septembre à cause de la prolifération d'une grande quantité de diatomées (RIMET, 2015). Finalement, la consommation ralentit dès mi-octobre occasionnant une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac.

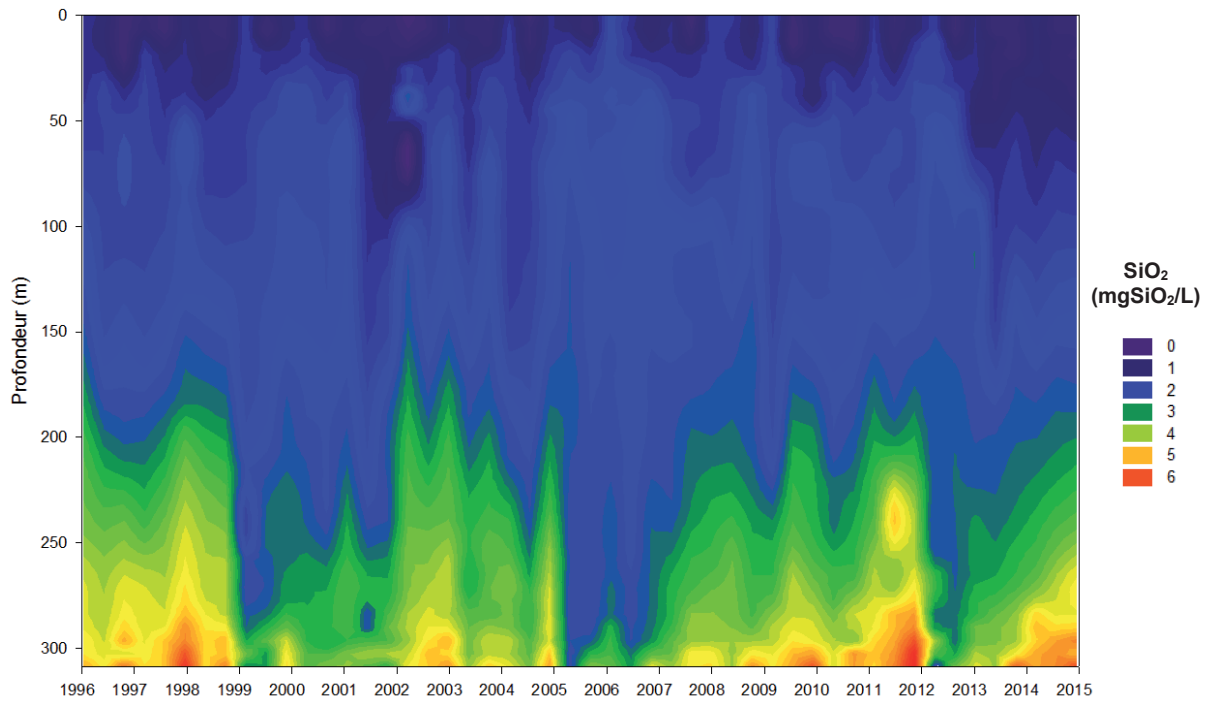


Figure 18 : Concentration en silice (SiO_2) dans les eaux du lac en fonction de la profondeur de 1996 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 18 : Concentration of silica (SiO_2) in lake's water as a function of depth from 1996 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

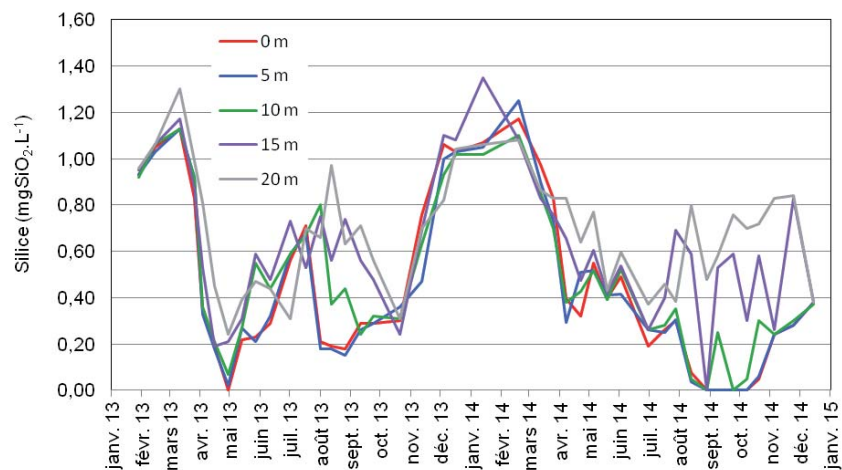


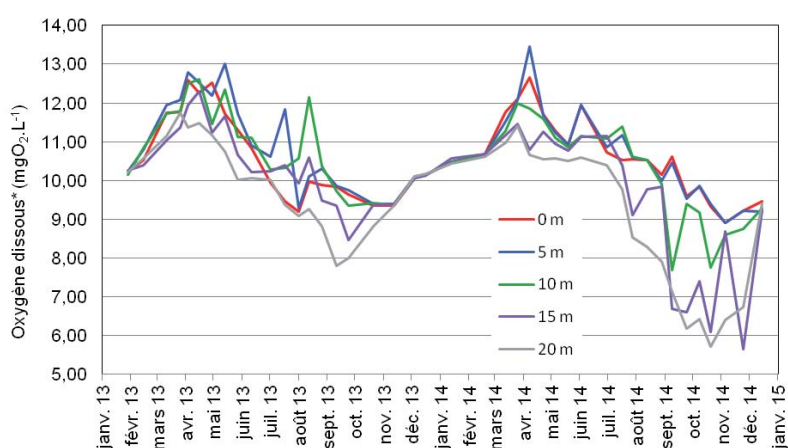
Figure 19 : Concentration en silice (SiO_2) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 19 : 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 20 et 26 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 maximum est observé de manière précoce le 7 avril 2014 avec $13.45 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ à 5 m du fait d'un mois de mars printanier.

La concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles diminue ensuite dès la fin du mois d'avril, principalement à cause d'une activité photosynthétique moins intense liée au fléchissement des diatomées (RIMET, 2015), suivi par une phase des eaux claires. 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 minime d'oxygène à 0 et 5 m au mois de juin, correspondant à l'apparition d'autres espèces algales que les diatomées. La désoxygénation de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers les couches plus profondes est relativement marquée en 2014 avec un minimum à 20 m au mois d'octobre égale à $5.71 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ contre $7.80 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ en septembre 2013. Ce transfert contrebalance la production d'oxygène dans les couches d'eau superficielles due à la réapparition massive de diatomées en août.



* 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 2014 est représentée sur la figure 21. L'hiver 2014 entraîne une transparence importante jusqu'à 12.2 m le 13 janvier 2014 (13.6 m le 13 décembre 2013). Par la suite, la reprise avancée de l'activité photosynthétique, qui induit la croissance du phytoplancton, provoque une diminution progressive de la transparence jusqu'à une valeur de 4.7 m à la fin du mois de mars qui perdure jusqu'à début mai. Ce phytoplancton printanier, qui est essentiellement constitué de diatomées (RIMET, 2015), consomme les nutriments présents en abondance mais n'est guère consommé, la température étant encore trop faible pour activer le zooplancton de façon significative. Au alentour de mi-mai, on observe une phase précoce des eaux claires qui se traduit par une augmentation brève de la transparence avec un pic à 8.6 m. Ce phénomène est dû à la raréfaction des nutriments et l'accroissement de l'activité des organismes brouteurs qui engendrent un abattement drastique des diatomées. A partir du mois de juillet, la transparence diminue et atteint le seuil de 2.4 m le 28 août 2014. A cette période, des petites chlorophycées flagellées à fort taux de reproduction et des dinophycées, deux types d'algues capables de résister à la prédation, prennent place jusqu'à début août. Par la suite, un développement important de grandes diatomées à lieu de mi-août et mi-septembre. A la fin du mois de septembre, la transparence recommence à augmenter avec un pic le 20 octobre 2014 à 9.2 m. 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 : grandes cyanobactéries et chlorophycées. Finalement, au début de l'hiver 2015, la transparence augmente à nouveau.

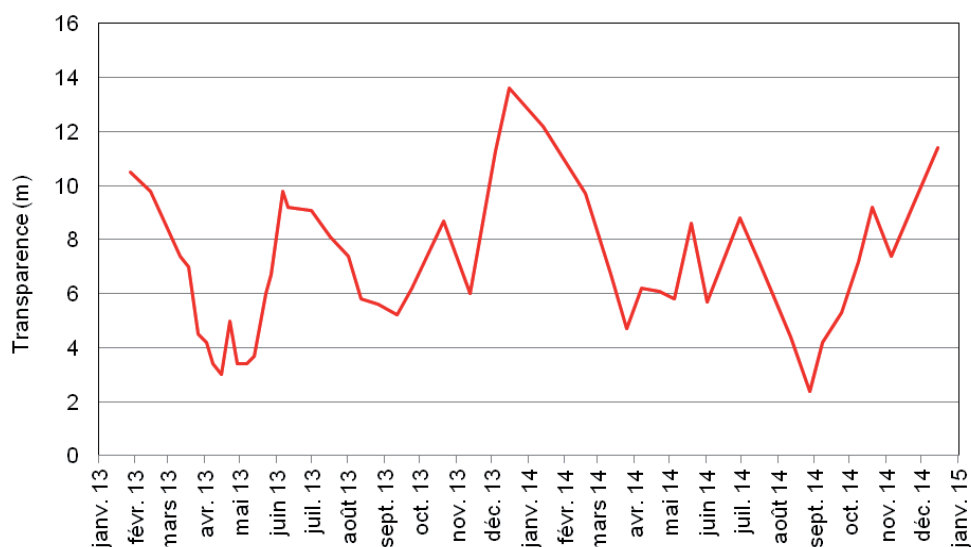


Figure 21 : Transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 21 : Transparency using a Secchi disk (black and white, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

La figure 22 permet d'observer l'historique de la transparence de 1980 à nos jours. L'année 2014 présente des valeurs de transparence du même ordre de grandeur que l'ensemble de la chronique.

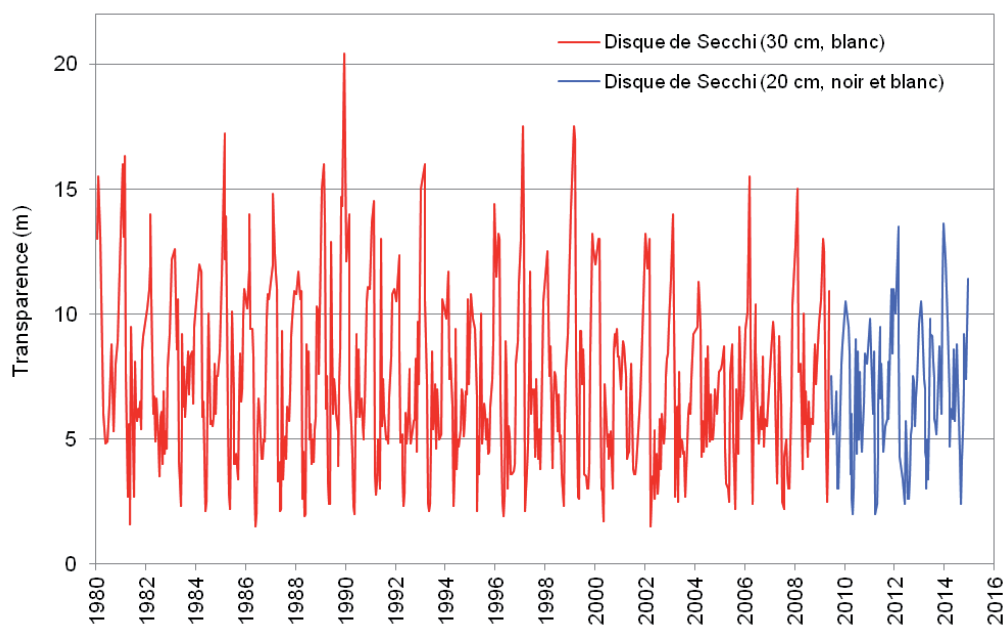


Figure 22 : Evolution de la transparence avec le disque de Secchi de 1980 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 22 : Change in transparency using Secchi disk from 1986 to 2014, 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 23). Ainsi, un pic printanier précoce de carbone organique particulaire apparaît dès le mois de mars et est marqué par un maximum le 22 avril 2014 à 15 m avec $438 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$. Par la suite, un deuxième pic est observable le 30 juin 2014 à 10 m avec $508 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$ correspondant à l'apparition de nouvelles communautés d'algues qui remplacent les diatomées (RIMET, 2015). Finalement, un troisième pic dit « automnal », plus important que les deux précédents, se dessine tardivement au mois d'août dans les couches d'eau de 0 à 15 m avec une concentration maximale le 12 août 2014 de $605 \mu\text{gC}\cdot\text{L}^{-1}$ à 5 m. Ce dernier pic, qui est corrélé avec une diminution importante de la transparence (Figure 21), correspond à la réapparition de diatomées.

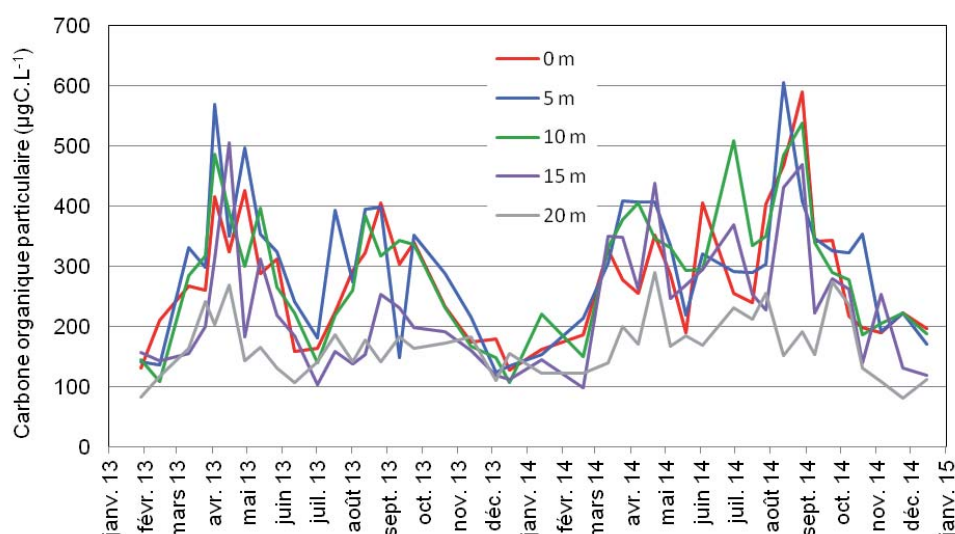
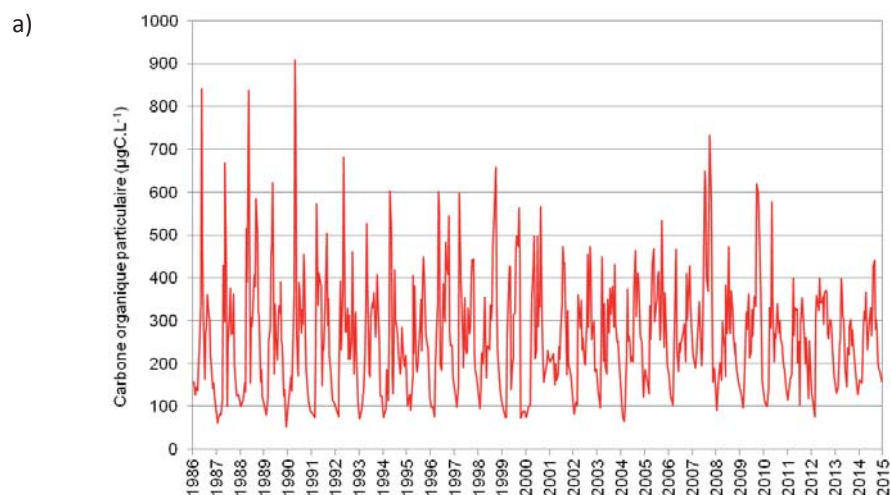


Figure 23 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 23 : 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 24a, 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 2014 sont parmi les plus basses de la chronologie de 1986 à nos jours ce qui montre que l'activité phytoplanctonique a été faible.



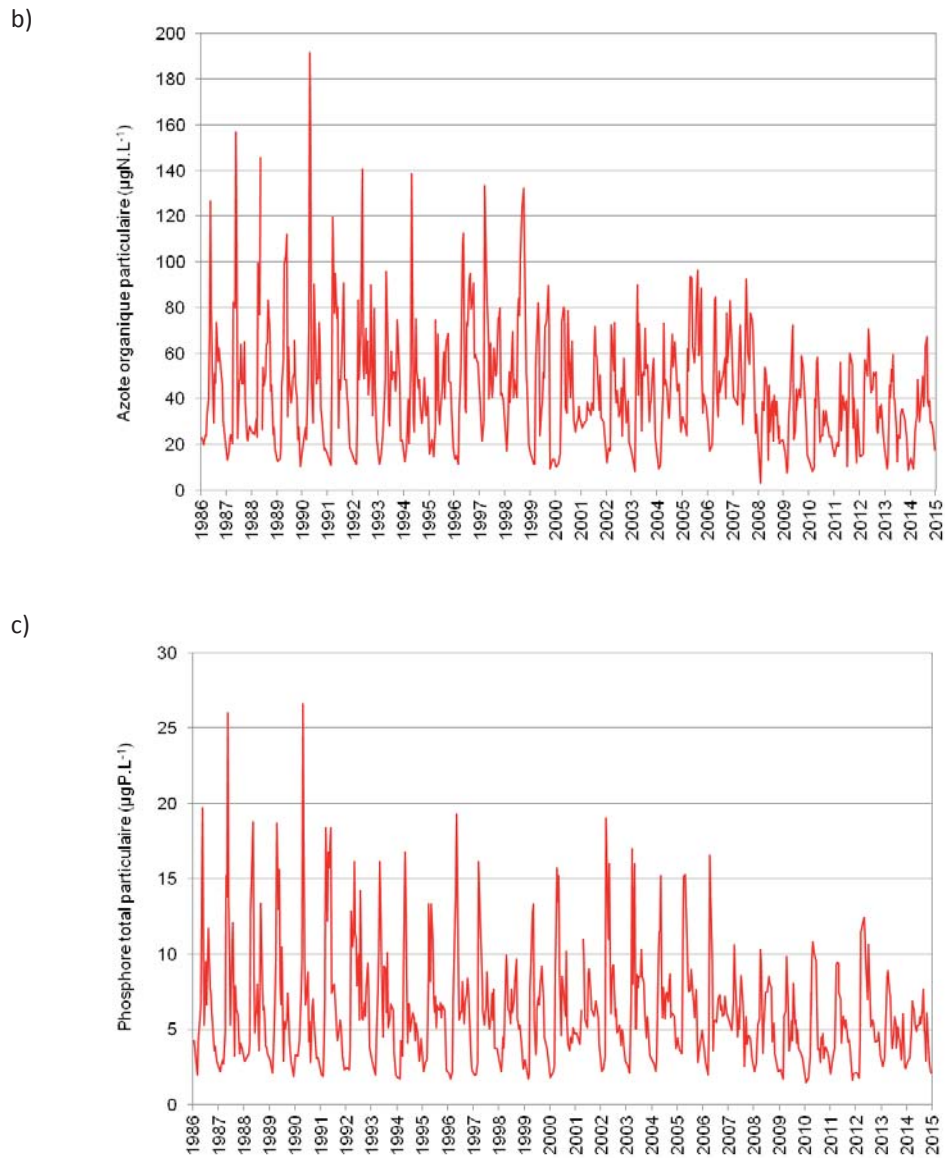


Figure 24 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche superficielle (0-20 m) de 1986 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2) :

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

Figure 24 : Change in the concentration of particulate matter in lake's water surface layer (0-20 m) from 1986 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) :

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

La figure 25 traduit une carence en phosphore importante dans 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.

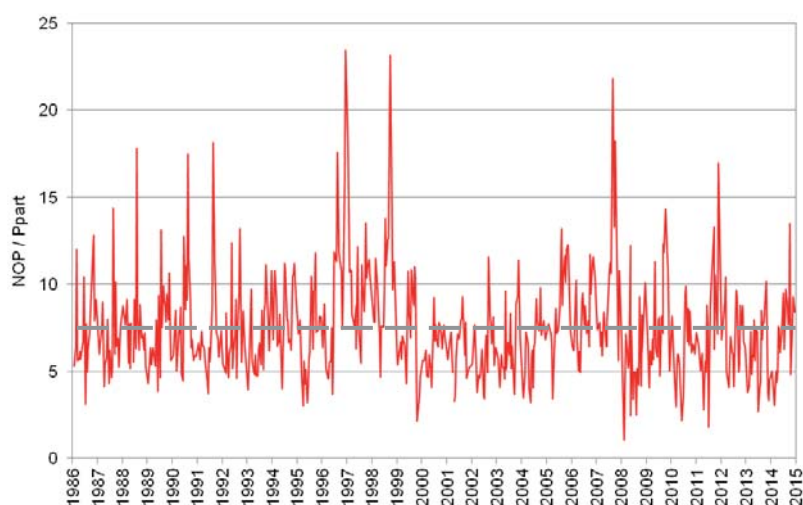
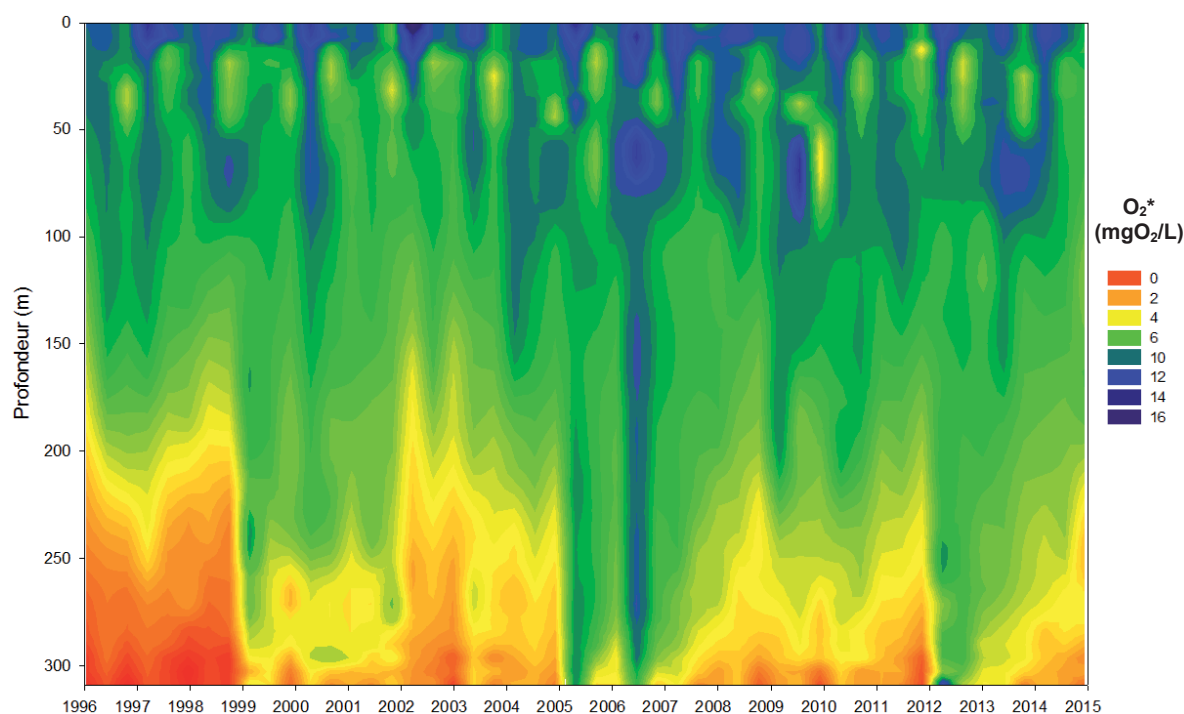


Figure 25 : Evolution du rapport NOP / Ppart dans l'eau de la couche superficielle (0 - 20 m) de 1986 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

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

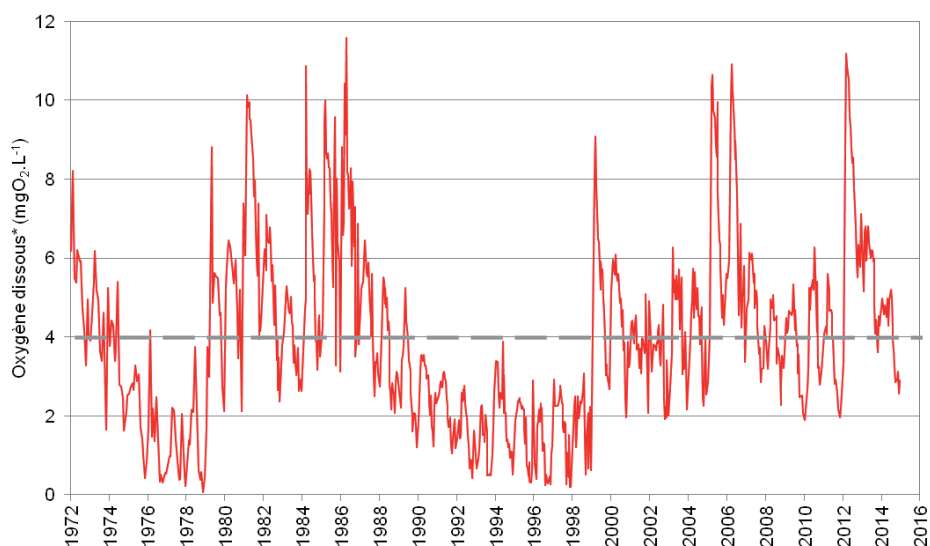
L'hiver 2014 n'a pas permis de ré-oxygéner l'ensemble de la colonne d'eau contrairement à l'année 2012 (Figure 26). A l'issue du brassage partiel maximal, le 18 février 2014, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à $4.57 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ (Figure 27). La teneur en oxygène dissous à 309 m diminue ensuite de manière progressive à partir du mois de juillet 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 24 novembre 2014 avec $2.56 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ soit quasiment $1 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ de moins que l'année antérieure (avec $3.61 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ le 21 octobre 2014).



* 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 du lac en fonction de la profondeur de 1996 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 26 : Change in the concentration of dissolved oxygen in lake's water as a function of the depth from 1996 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)



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

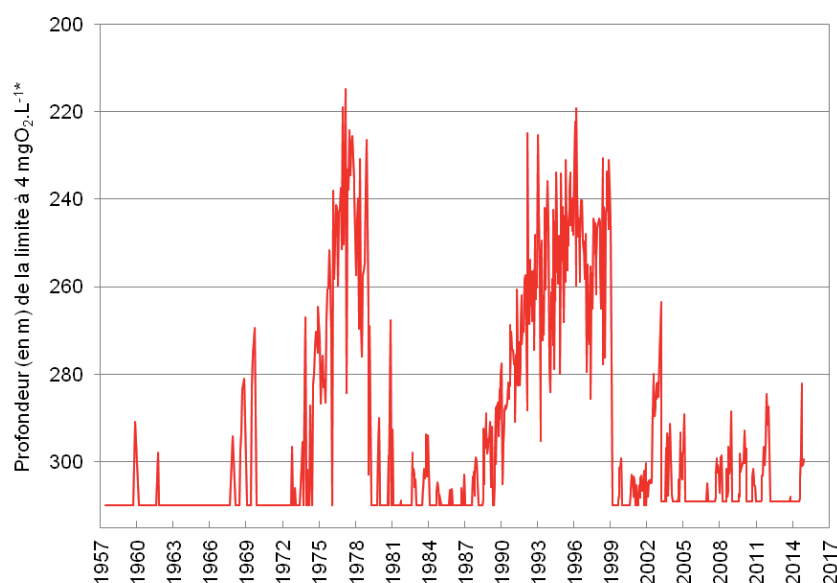
Figure 27 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 27 : Change in the concentration of dissolved oxygen in the bottom of lake's water at 309 m from 1972 to 2014, 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 figure 28 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 que pour l'année 2014, 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.

La ligne pointillée sur la figure 27 indique le seuil à $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ relative aux exigences sur la qualité des eaux en Suisse.



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

Figure 28 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mg d'oxygène dissous par litre de 1957 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 28 : Change in threshold's depth at 4 mg of dissolved oxygen per liter from 1957 to 2014, 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 2014, il devrait y avoir un relargage de phosphore au fond du lac. Cependant, les figures 29 et 30 montrent des teneurs en orthophosphates dans le fond du lac guère 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 24 novembre 2014, lorsque la teneur en oxygène dissous est la plus faible, avec $53 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ contre $50 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ en 2013.

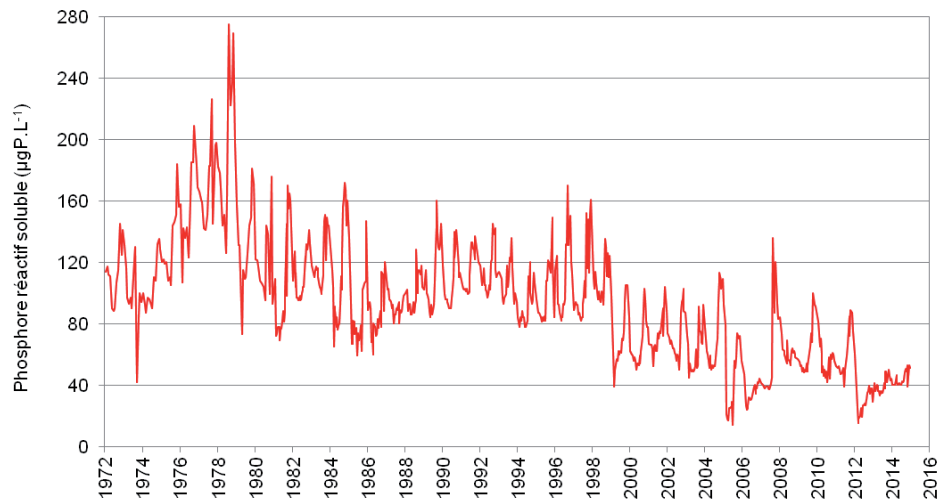


Figure 29 : Evolution de la concentration en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 29 : 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 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

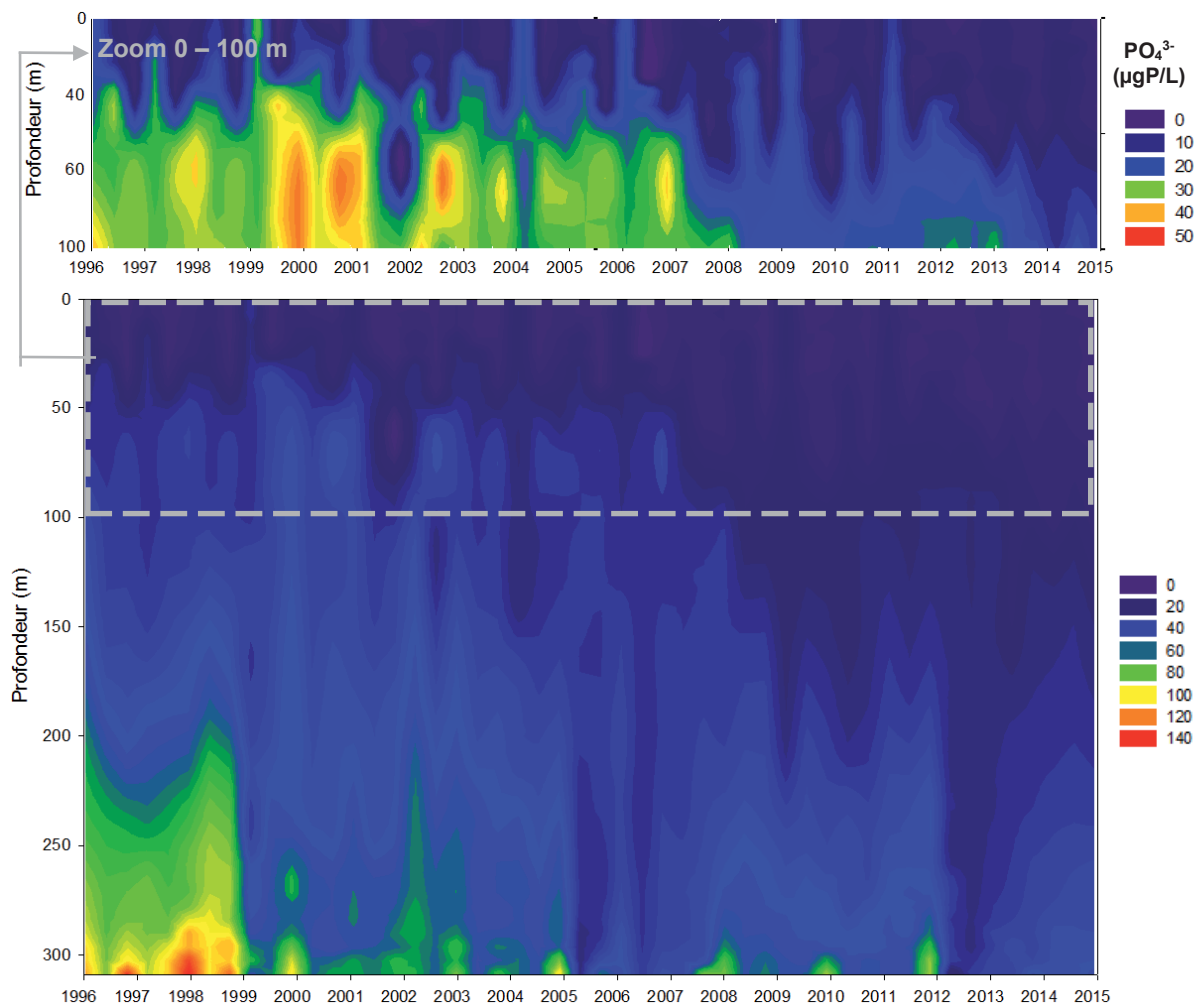


Figure 30 : Evolution de la concentration en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) en fonction de la profondeur de 1996 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 30 : Change in the concentration of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) in lake's water as a function of depth from 1996 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Tout comme pour le phosphore réactif soluble, 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 2014 par rapport à l'année 2013 (Figure 31).

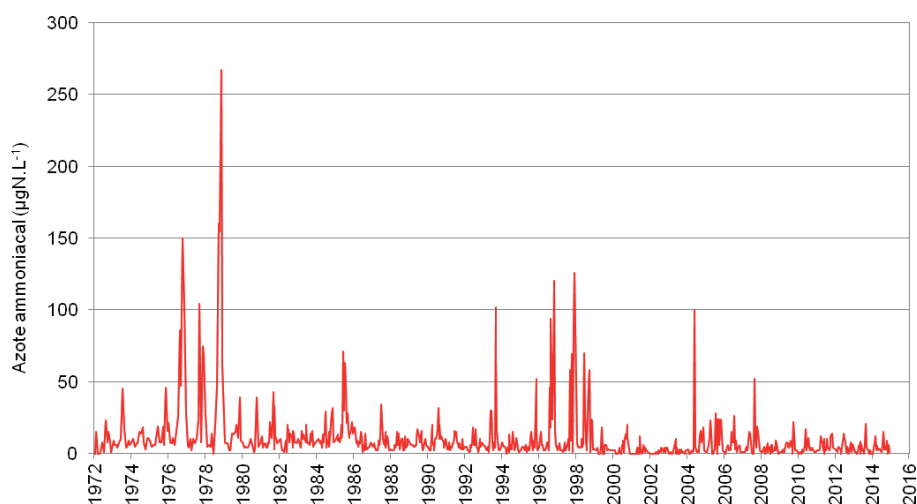


Figure 31 : Evolution de la concentration en azote ammoniacal (N-NH_4^+) dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 31 : Change in the concentration of ammoniacal nitrogen (N-NH_4^+) in the bottom of lake's water at 309 m from 1972 to 2014, 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 semble se stabiliser en 2014 avec 1'762 tonnes de P contre respectivement 1'853 et 1'696 en 2012 et 2013 (Figure 32). La concentration moyenne annuelle pondérée est égale à $20.5 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

En ce qui concerne le phosphore réactif soluble, c'est-à-dire l'orthophosphate, le stock n'évolue guère en 2014 avec 1'438 tonnes de P contre 1'467 en 2013. Ainsi, la concentration moyenne annuelle pondérée est de $16.7 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

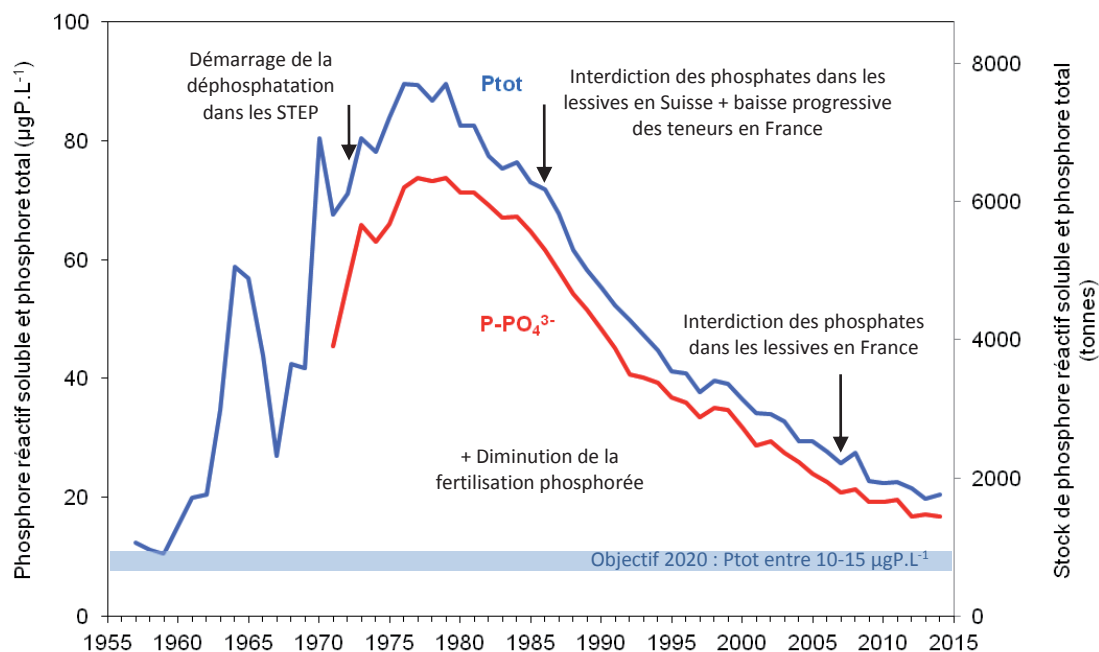


Figure 32 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore réactif soluble et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1957 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 32 : 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 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7.2. AZOTE NITRIQUE ET AZOTE TOTAL

Les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique sont légèrement inférieures à celles de l'année précédente, mais somme toute relativement élevées du fait d'une importante pluviométrie certes en deçà de celle observée en 2013 sur le bassin versant du Léman. En 2014, la concentration moyenne en azote total est de $620 \mu\text{gN} \cdot \text{L}^{-1}$, soit un stock de 53'299 tonnes de N. La concentration moyenne annuelle en azote nitrique, quant à elle, est égale à $572 \mu\text{gN} \cdot \text{L}^{-1}$, ce qui représente un stock de 49'180 tonnes de N contre $592 \mu\text{gN} \cdot \text{L}^{-1}$ et 50'939 tonnes en 2013 (Figure 33). Cette teneur en nitrates d'environ $0.57 \text{ mgN} \cdot \text{L}^{-1}$ dans les eaux du Léman, soit $2.53 \text{ mgNO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$, reste conforme à la norme d'eau de consommation en Suisse qui édicte une valeur de tolérance de $40 \text{ mgNO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$ et en France, une limite de qualité qui est de $50 \text{ mgNO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$.

L'évolution du stock d'azote total et nitrique dans le Léman est relativement stable depuis les années 80. Cette tendance stationnaire s'explique par des apports du bassin versant au Léman qui n'évolue guère à cause d'une part de l'absence de progrès technique dans les STEP en matière de dénitrification et d'autre part du maintien de la fertilisation azotée des cultures (Annexe VI).

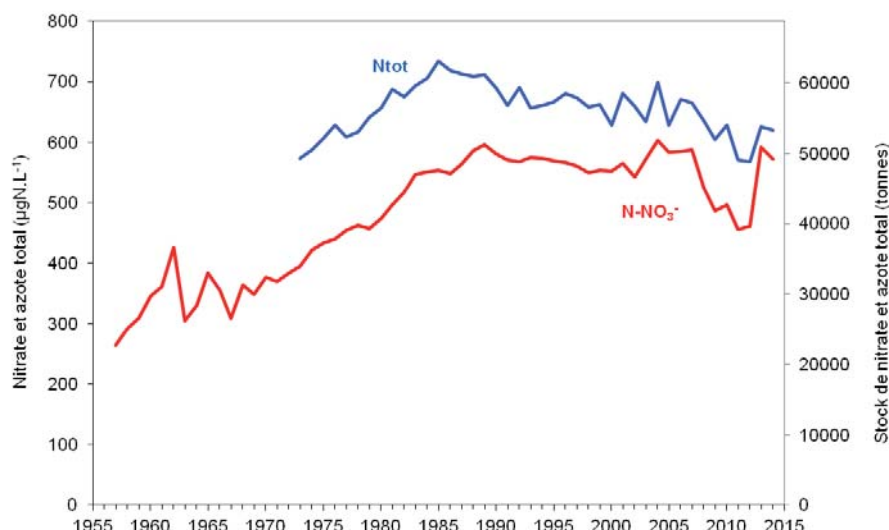


Figure 33 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1957 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 33 : 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 2014, 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 34). En 2014, le stock de chlorure est égal à 872'189 tonnes soit une teneur moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.14 mgCl·L⁻¹ contre 848'029 tonnes et 9,86 mg Cl·L⁻¹ en 2013. Ce phénomène s'explique en majeure partie par les apports via les affluents du Léman (Annexe VI) 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).

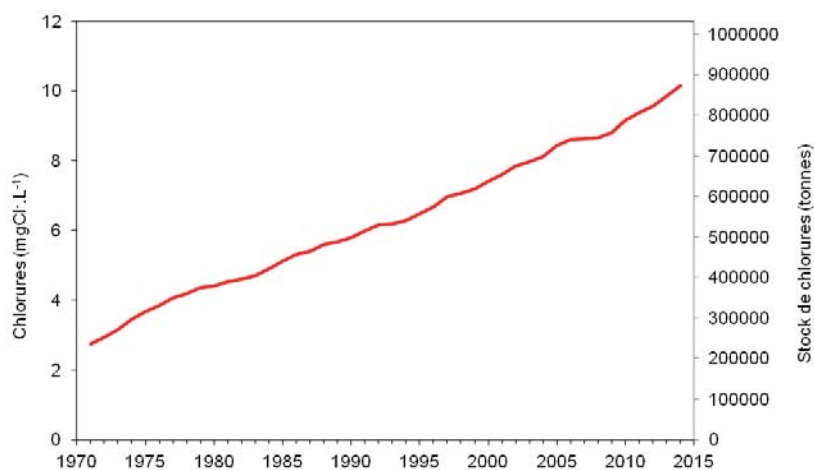


Figure 34 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 34 : Change in the weighted mean annual concentration and stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1971 to 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

8. CONCLUSIONS

L'année climatique 2014 sur les rives du Léman peut être considérée comme relativement chaude avec une température annuelle de 11.7 °C, faiblement venteuse, normalement humide et ensoleillée, avec 1'068.1 mm de précipitations et 1'903 heures d'ensoleillement.

Les faits marquants de l'évolution physico-chimique des eaux du Léman en 2014 sont les suivants :

- L'hiver 2014 a donné lieu à un brassage partiel de la colonne d'eau jusqu'à 105 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 de manière précoce du fait d'un hiver doux conjointement à un printemps très avancé dans la saison. Celle-ci 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 2014 tel qu'en 2013 et ce malgré deux années successives de brassage partiel qui ont occasionné une réoxygénation limitée des eaux profondes ;
- En 2014, le stock d'azote nitrique dans le lac demeure élevé, mais légèrement moindre qu'en 2013, avec 49'180 tonnes de N en raison d'apports importants suite à des précipitations abondantes ayant lessivé les sols du bassin versant du Léman ;
- La concentration moyenne en phosphore total semble s'équilibrer depuis les deux dernières années aux alentours de 20 mgP·L⁻¹ (19.7 et 20.5 mgP·L⁻¹ en 2013 et 2014, respectivement) ;
- Le stock de chlorure dans le Léman continue d'augmenter et atteint 872'189 tonnes en 2014.

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.
- LAZZAROTTO, L., NIREL, P. et RAPIN, F. (2011) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 31-63.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- 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.
- LAINE, L. et PERGA, M. (2015) Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 127-136.
- RIMET, F. (2015) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 103-120.
- SAVOYE, L., QUETIN, P. et KLEIN, A. (2014), Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 21-56.
- VARGAS, S. (2015) Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 246-258.

ANNEXES

ANNEXE I

Tableau I : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table I : Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2014, 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	10.30	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
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

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
2010	9.18	22.4	19.3	628	503	3.0	2.0	498	9.15	110.0	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

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

b : valeur interpolée

ANNEXE II

Tableau II : Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table II : Annual total content in metric tons from 1957 to 2014, 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	NOP 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	1'255	141	33'030	251'000			
1973	801'900	6'900	5'660	49'180	35'306	1'185	201	33'920	271'000			
1974	781'700	6'700	5'420	50'350	37'544	1'180	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	1'000	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	1'205	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
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

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	NOP tonnes
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

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
σ	S·cm ⁻¹	4
NO ₃ ⁻	µgN·L ⁻¹	6
NO ₂ ⁻	µgN·L ⁻¹	4
NH ₄ ⁺	µgN·L ⁻¹	7
Ntot	µgN·L ⁻¹	9
NOP	µgN·L ⁻¹	4
PO ₄ ³⁻	µgP·L ⁻¹	8
Ptot	µgP·L ⁻¹	9
Ppart	µgP·L ⁻¹	9
COP	µgC·L ⁻¹	5
Cl ⁻	mgCl ⁻ ·L ⁻¹	6
SiO ₂	mgSiO ₂ ·L ⁻¹	3

* 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

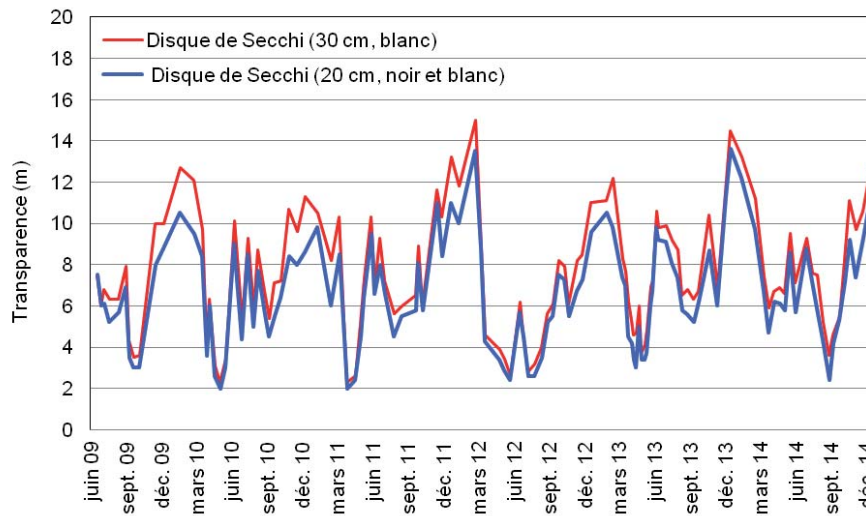


Figure IV.1 : Représentation graphique de la comparaison entre la mesure de la transparence avec le disque de Secchi « INRA » (disque blanc d'un diamètre de 30 cm) et normalisé (disque noir et blanc, 20 cm) de mi-2009 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2014, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

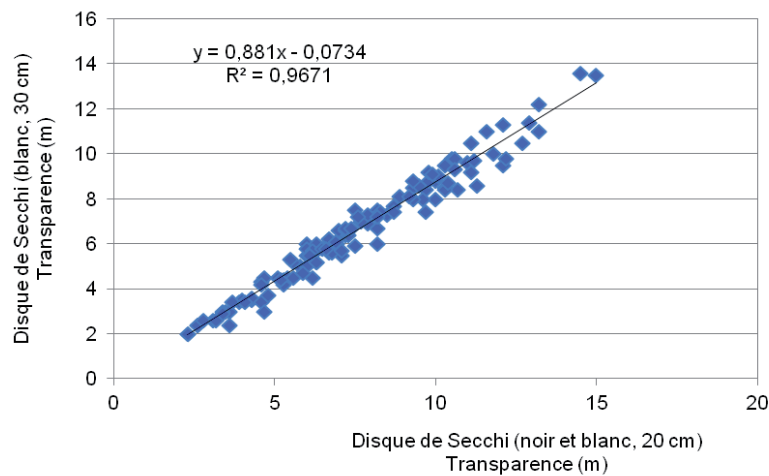


Figure IV.2 : Régression linéaire entre la mesure de la transparence avec le disque de Secchi « INRA » (disque blanc d'un diamètre de 30 cm) et normalisé (disque noir et blanc, 20 cm) de mi-2009 à 2014, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2014, 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). Comme 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 2014, les températures des mois de juillet, août et dans une moindre mesure mai ; furent inférieures à leur moyenne inter-stations sur la période 1981 - 2010. Les températures des quatre premiers mois peuvent être classifiées comme chaudes. (tableau 1.1, figure 1.1).

Tableau 1.1 : Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2014 (°C).

Table 1.1 : Mean monthly air temperature for each station in 2014 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	4.1	3.9	4.6	4.2	2.2
Février	4.8	4.4	5.1	4.8	2.9
Mars	7.8	8.0	8.1	7.4	6.5
Avril	11.8	11.5	11.9	11.5	9.9
Mai	13.5	13.0	13.4	13.0	14.4
Juin	19.1	18.7	19.2	18.8	17.7
Juillet	18.4	18.0	18.4	18.4	20.1
Août	18	17.5	18	18.1	19.7
Septembre	16.7	16.4	16.8	16.8	15.8
Octobre	13.7	13.4	14.1	13.7	11.5
Novembre	8.2	7.7	8.8	8.5	6.0
Décembre	4.3	4.3	5	5.2	3.3
Moyenne annuelle	11.7	11.4	12.0	11.7	10.8

En 2014, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.7 °C, soit la même qu'en 2003. Avec cette température, l'année 2014 se classe au 3^e rang (la plus chaude étant 1994 avec 11.9 °C) de la période 1980 - 2014. (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
1979	9.9	1997	11.1
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

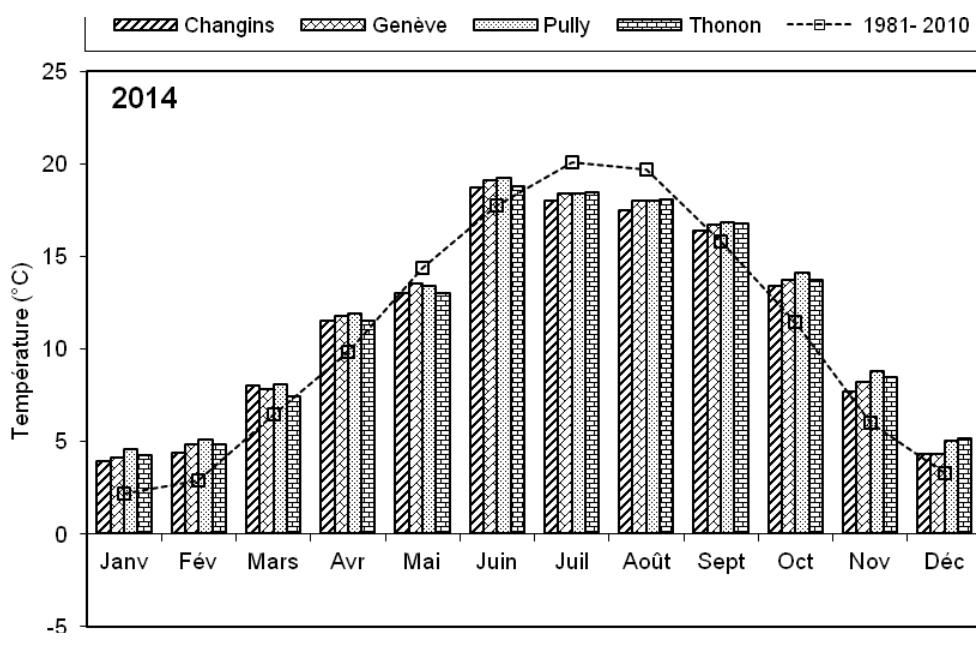


Figure 1.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2014 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1.1 : Mean monthly air temperature at each station in 2014 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

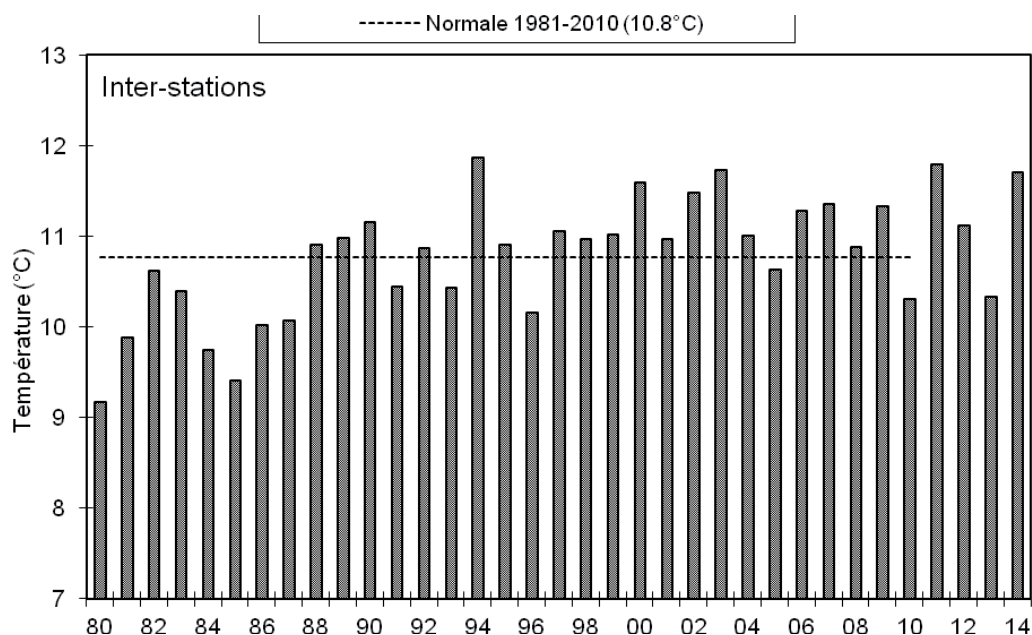


Figure 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

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

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2014 sur le bassin lémanique est de 1'068.1 mm, légèrement supérieure à la normale inter-stations (1'008.9 mm) relevée sur les 4 stations entre 1981 et 2010. Pully est la station la plus arrosée avec 1'190.0 mm. Genève avec 1'004.6 mm a les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Les mois mars, juin, septembre et décembre furent particulièrement secs. Par contre les mois de février, juillet, octobre et novembre furent eux excédentaires. Ce qui donne pour l'année 2014 un excédent de 5.8 % par rapport à la normale 1981 - 2010.

Tableau 2.1 : Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2014.

Table 2.1 : Monthly rainfall (mm) at each station in 2014.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	92.6	99.9	82.3	98.5	72.9
Février	121.2	127.4	136.1	137.0	60.8
Mars	39.3	36.8	36.7	41.5	68.5
Avril	60.1	48.5	68.3	68.0	73.5
Mai	73.4	75.8	86.3	100.5	92.8
Juin	54.6	71.8	63	47.5	94.3
Juillet	175.5	173.8	267.5	194.5	83.8
Août	52.8	83.9	120.9	75.5	86.6
Septembre	40.1	29.9	20.9	22.0	99.0
Octobre	141.7	113.8	137.7	130.0	102.5
Novembre	107.6	105.4	120.5	118.5	83.0
Décembre	45.7	39.3	49.8	38.0	88.9
Total Annuel	1'004.6	1'006.3	1'190.0	1'071.5	1'008.9

En inter-stations, l'année 2014 se classe au 13^e rang de la chronologie pluviométrique 1980 - 2014 (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
1979	1'080.4	1997	1'022.9
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

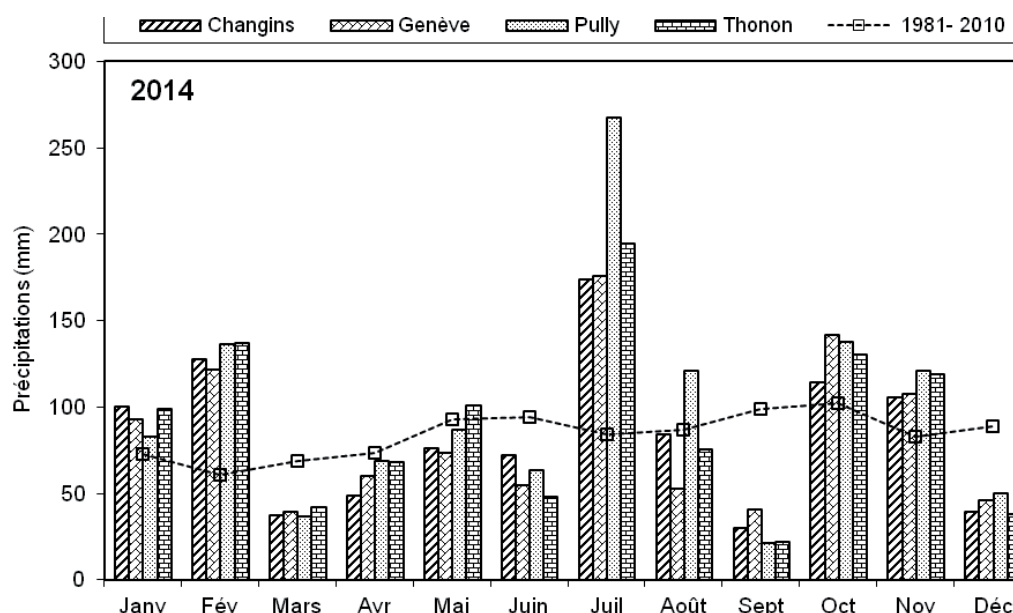


Figure 2.1 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2014 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 2.1 : Monthly rainfall at each station in 2014 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

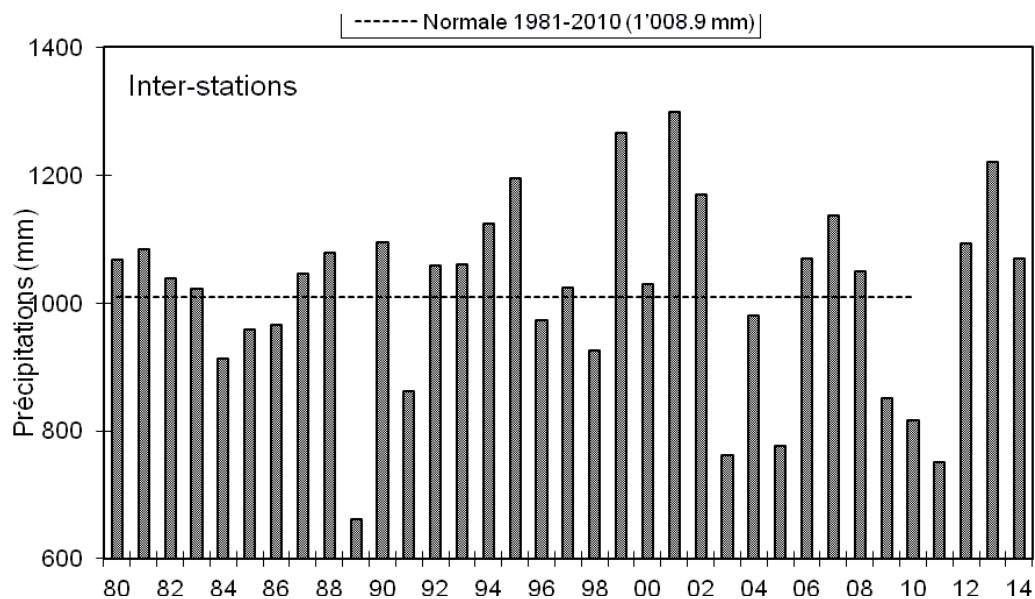


Figure 2.2 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

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

4. INSOLATION

A part les mois de juillet, aout et novembre l'année 2014 fut ensoleillée (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Insolation mensuelle à chaque station en 2014 (h).

Table 3.1 : Monthly insolation at each station in 2014 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Inter-stations 1981 - 2010
Janvier	62	66.2	72.2	60.9	62.4
Février	76.3	82.8	84.6	82.9	90.7
Mars	213.2	227.4	220.9	213.3	156.4
Avril	196	205.3	197.3	210.8	182.1
Mai	195.2	198.0	196.9	230.4	208.1
Juin	294.1	281.0	290.5	309.4	236.7
Juillet	160.6	160.0	165.8	191.2	258.6
Août	188.6	188.2	171.4	217.7	236.8
Septembre	217	217.1	218.7	209.6	183.6
Octobre	147.2	148.7	158.9	134.4	120.0
Novembre	46.8	52.2	63.3	39.4	69.2
Décembre	63.3	77.4	64.6	41.6	49.8
Total Annuel	1'860.3	1'904.3	1'905.1	1'941.6	1'841.5

L'année 2014 avec une moyenne inter-stations de 1'903 heures est une année moyennement ensoleillée. Elle se classe 14^e sur la période 1980 - 2014 (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
		1997	1'948.4
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

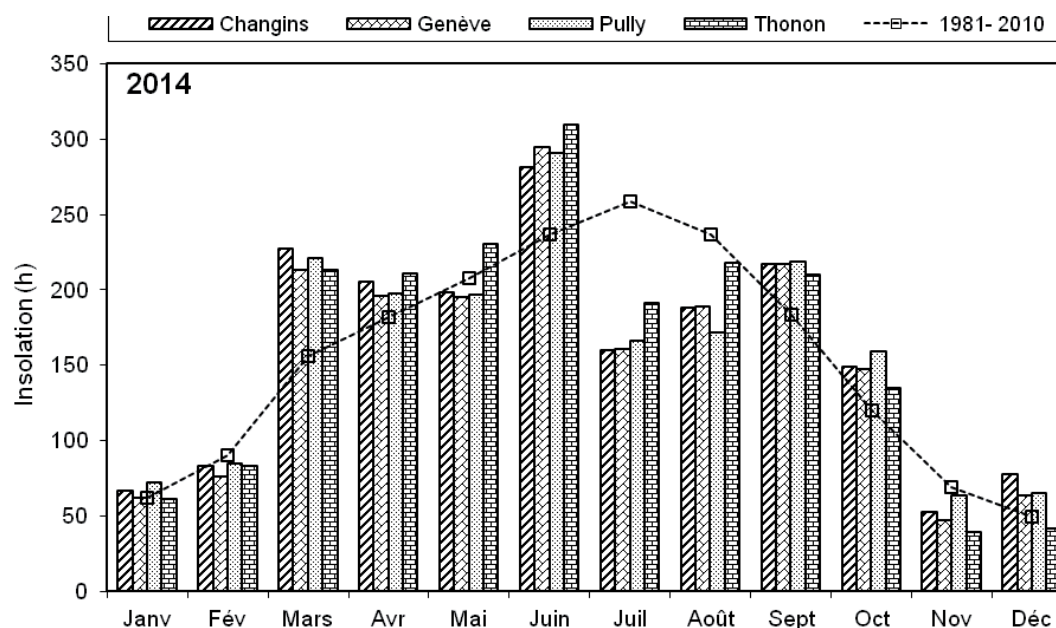


Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2014 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3.1 : Monthly insolation at each station in 2014 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

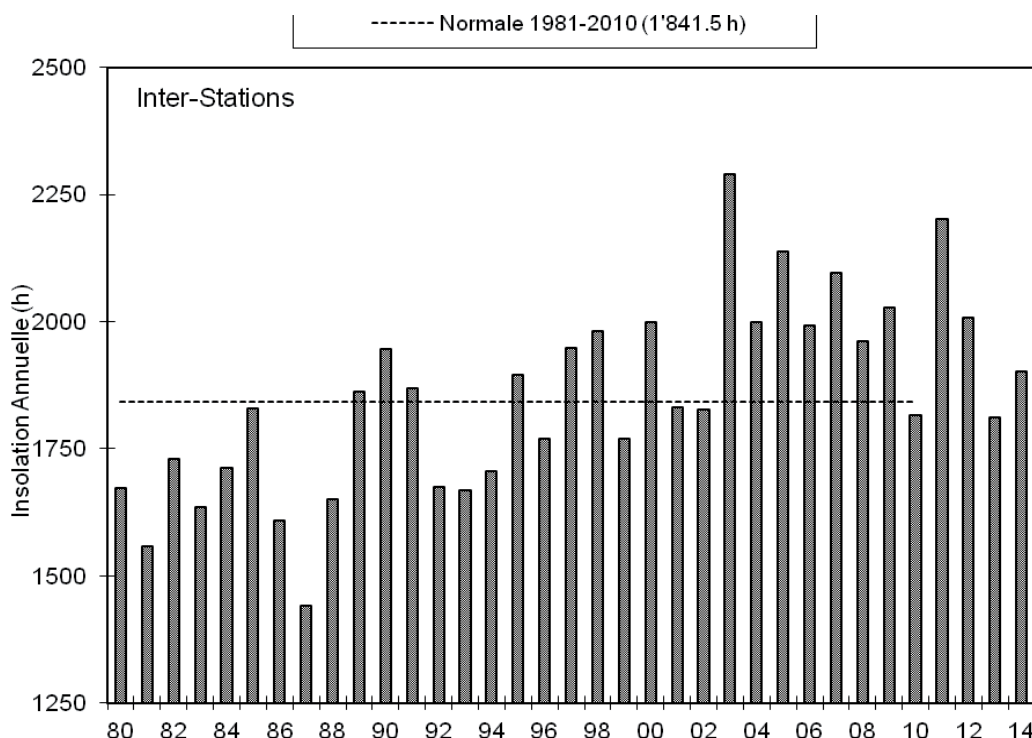


Figure 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations.

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 2014 est de $12.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Tableau 4.1 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2014 (moyenne journalière en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

Table 4.1 : Global monthly solar irradiation at each station in 2014 (mean daily irradiation in $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	4.1	4.1	4.2	3.5	3.6
Février	6.2	6.3	6.7	6.0	6.5
Mars	14.5	14.4	14.2	13.5	11.2
Avril	17.7	17.5	17.2	16.6	15.6
Mai	20.7	19.8	19.3	19.3	18.8
Juin	25.2	24.5	24.6	24.8	21.3
Juillet	17.5	17.1	16.9	17.3	21.3
Août	18.5	17.8	16.8	17.3	18.2
Septembre	16.3	15.9	15.5	14.8	13.4
Octobre	9.7	9.5	9.6	8.4	7.9
Novembre	3.5	3.8	4.3	3.0	4.3
Décembre	3.5	3.8	3.7	2.5	2.9
Moyenne Annuelle	13.1	12.9	12.7	12.2	12.04

Pour l'inter-stations en 2014, le rayonnement global annuel obtenu est de 4'653. MJ·m⁻², ce qui classe l'année, 8^e sur la période 1980 - 2014 (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
		1997	4'405
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

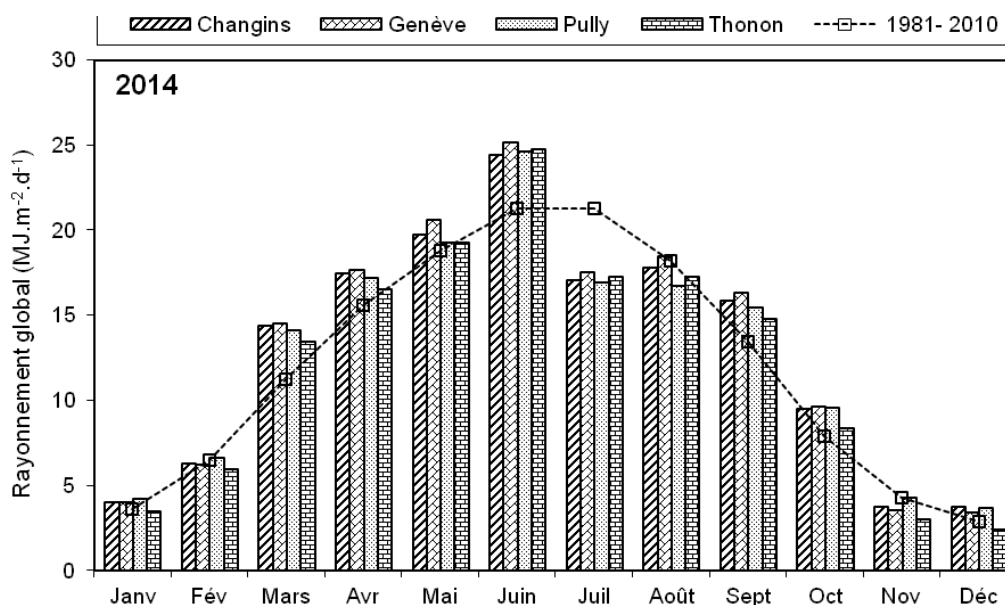


Figure 4.1 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2014 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 4.1 : Mean monthly global solar irradiation at each station in 2014 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

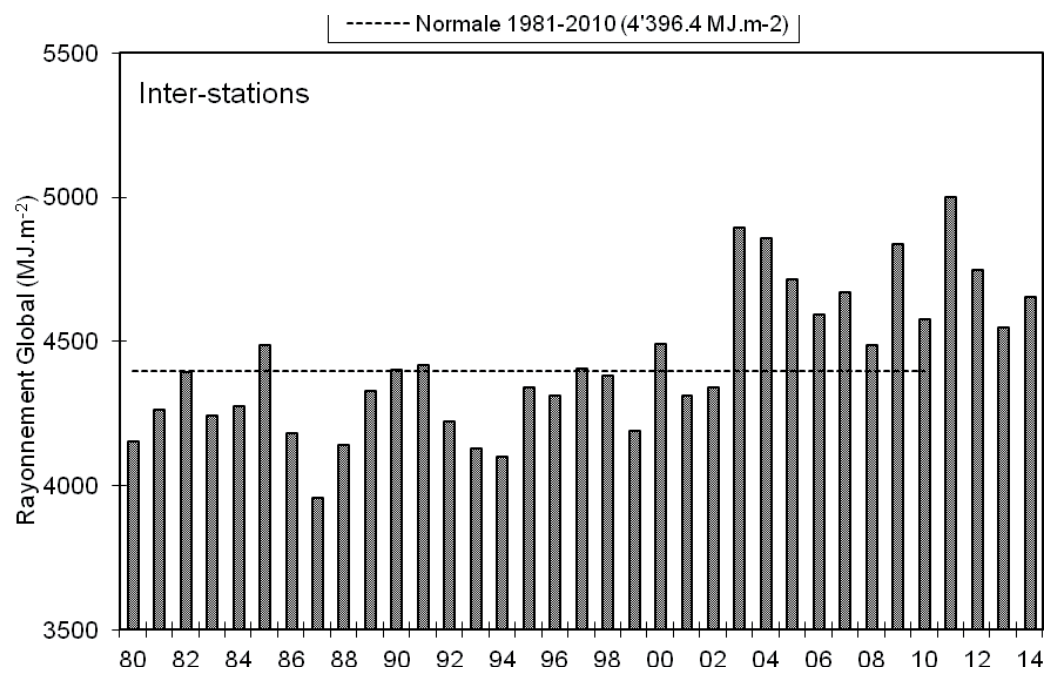


Figure 4.2 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m⁻²).

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

6. VENT

6.1 VITESSE DU VENT

A Changins, station de référence, le mois de mai fut venteux. Pour les autres mois de l'année 2014, les vitesses moyennes du vent sont moins élevées que leur moyenne dans 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 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Table 5.1 : Mean monthly wind speeds in 2014 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1981-2010
Janvier	1.9	1.7	1.1	0.7	2.4
Février	2.5	2.5	1.4	1.0	2.8
Mars	2.2	2.2	1.4	0.9	3.3
Avril	2.2	2.5	1.7	1.2	3.3
Mai	3.3	3.3	1.9	1.7	2.8
Juin	2.5	2.5	1.7	1.2	2.8
Juillet	1.9	1.9	1.1	0.9	2.7
Août	2.2	2.2	1.4	1.1	2.6
Septembre	2.2	2.5	1.7	1.4	2.6
Octobre	1.7	1.9	1.1	0.9	2.4
Novembre	1.4	1.4	0.8	1.0	2.5
Décembre	2.5	2.5	1.7	2.0	2.6
Moyenne annuelle	2.2	2.3	1.4	1.2	2.7

Pour l'année 2014 à Changins, il a été enregistré 18 jours de vent fort ($> 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) dont 12 (+1) jours durant le 2^e trimestre (+ 11/05, à $4.99 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (figure 5.2). Le maximum de vent moyen journalier a été relevé pour l'année 2014 le 16 mai (avec $11.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). De plus, il y a eu en 2014, 3 jours où la vitesse du vent a été enregistrée à $4.99 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (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 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

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

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1979	2.6	1997	2.5
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

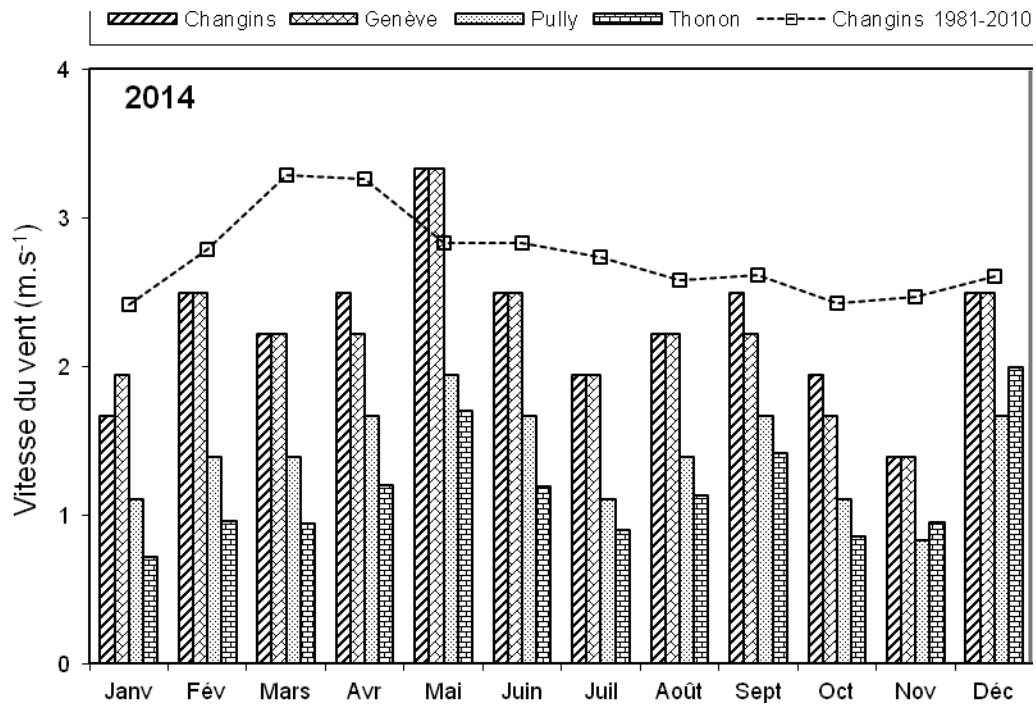


Figure 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2014 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5.1 : Mean monthly wind speeds at each station in 2014 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

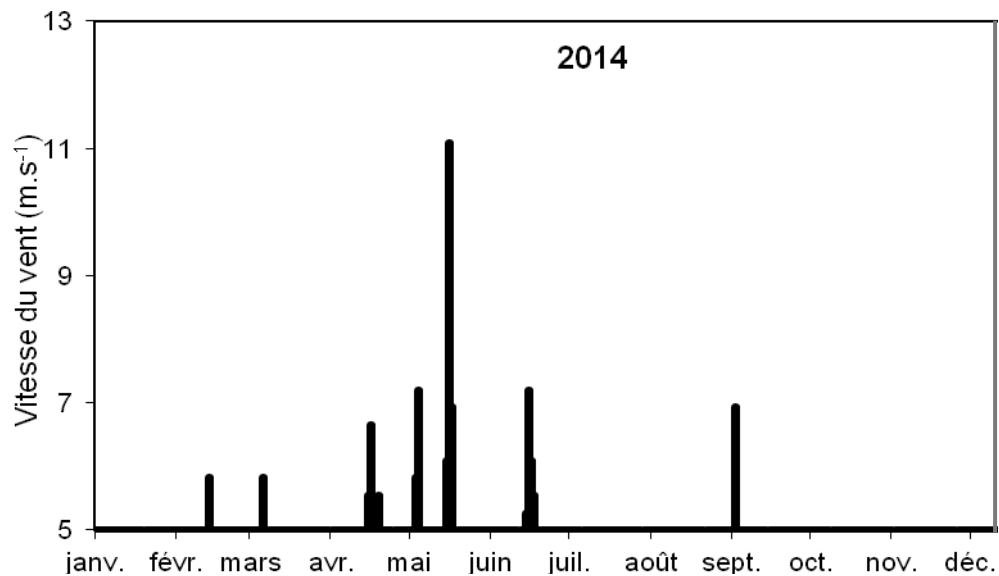


Figure 5.2 : Répartition annuelle (en 2014) des vents forts ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) à Changins.

Figure 5.2 : Annual distribution (in 2014) of strong winds ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) at Changins.

6.2 ROSE DES VENTS

Pour l'année 2014 à Changins, 63 % des vents (figure 5.3) se répartissent principalement selon le demi-cercle S-O-N. Sur les 8.1 % des vents qui sont supérieurs à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 60.5 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; alors que 27.2 % sont d'origine opposée S-O.

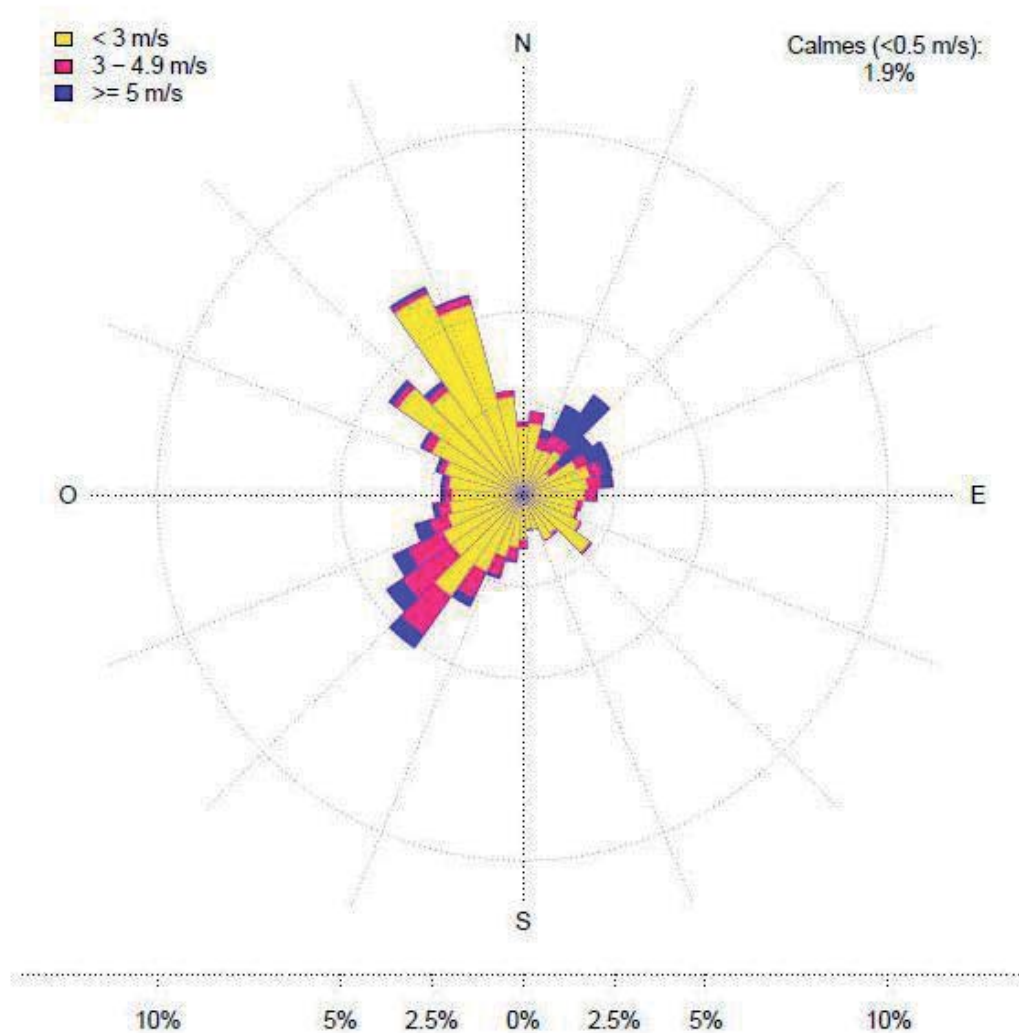


Figure 5.3 : Rose des vents moyens à Changins en 2014 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle : % d'occurrence).

Figure 5.3 : Wind directions at Changins in 2014 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).

ANNEXE VI

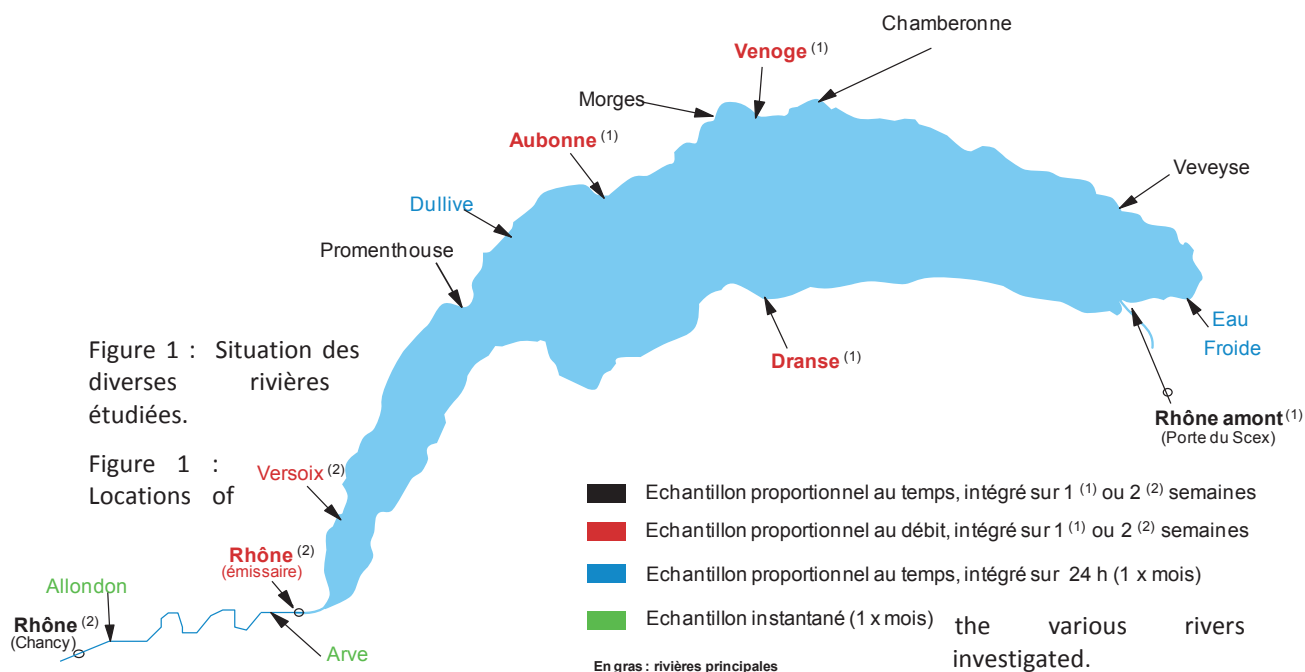
LES APPORTS PAR LES AFFLUENTS AU LÉMAN ET AU RHÔNE À L'AVAL DE GENÈVE

CONTRIBUTIONS FROM THE TRIBUTARIES OF LAKE GENEVA AND FROM THE RHONE BELOW GENEVA

1. GÉNÉRALITÉS ET MÉTHODES

Le programme de surveillance de l'année 2014 comprend le suivi de plusieurs rivières principales : le Rhône amont, la Dranse, la Venoge, l'Aubonne, la Versoix, le Rhône émissaire, l'Arve, l'Allondon et le Rhône à Chancy (Figure 1). Toutes les autres rivières sont suivies dans le cadre de programmes cantonaux ou de programmes propres aux laboratoires mais ne font pas l'objet du présent rapport.

Pour ces rivières, les prélèvements sont effectués, soit en continu (analyses réalisées sur des échantillons proportionnels au débit ou au temps prélevés sur 2 semaines, 1 semaine ou une fois 24 heures par mois), soit de manière ponctuelle 12 fois par an (figure 1).



Pour le bassin versant du Rhône en aval du lac, les analyses concernent le Rhône émissaire, le Rhône à Chancy dans le cadre du programme NADUF (programme de surveillance nationale des cours d'eau suisses), l'Arve et l'Allondon (Figure 1).

Les prélèvements et les analyses chimiques sont effectués dans les rivières suivantes par différents laboratoires :

- Versoix, Arve, Allondon et Rhône émissaire : Service de l'écologie de l'eau du canton de Genève ;
- Venoge et Aubonne : Laboratoire de la Direction générale de l'environnement du canton de Vaud ;
- Rhône amont à la Porte du Scex : Laboratoire du Service de la protection de l'environnement du canton du Valais et Laboratoire EAWAG (programme NADUF) ;
- Rhône à Chancy : Laboratoire EAWAG (programme NADUF) ;
- Dranse : Station d'Hydrobiologie Lacustre (INRA).

La validité des résultats est testée deux fois par année par des analyses interlaboratoires organisées dans le cadre de la CIPEL auxquelles participent environ 20 laboratoires accrédités pour ce type d'analyses (VARGAS, 2015).

La plupart des analyses sont effectuées sur des échantillons d'eau filtrée (maille de 0.45 µm) hormis pour les concentrations de phosphore total et d'azote total où elles sont déterminées sur les échantillons d'eau brute.

2. DEBITS ET APPORTS ANNUELS DES AFFLUENTS DU LÉMAN ET EXPORTATIONS ANNUELLES DU RHÔNE AVAL ET DE SES PRINCIPAUX AFFLUENTS

Les débits moyens annuels des affluents du Léman et de l'émissaire à Genève montrent une stabilité sur le long terme, mais présentent des fluctuations d'une année à l'autre, liées à la pluviométrie. Par rapport à la moyenne interannuelle 1965-2014, les débits 2014 sont légèrement inférieurs pour les 4 principaux affluents du Léman ainsi que pour le Rhône émissaire (Tableau 1).

Tableau 1 : Débits moyens annuels des affluents et de l'émissaire à Genève ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Table 1 : Mean annual flow rates of the tributaries and of the effluent river in Geneva ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Année	Rhône amont	Dranse	Aubonne	Venoge	Rhône émissaire
1986	194.9	23.2	5.3	3.9	259.1
1987	194.0	26.3	6.9	4.7	276.6
1988	202.7	22.4	6.7	5.4	278.9
1989	167.4	21.7	2.9	2.2	207.2
1990	164.8	33.0	3.7	2.9	238.6
1991	171.9	14.8	5.9	3.1	201.5
1992	177.5	21.2	7.2	4.1	224.7
1993	190.9	17.3	5.8	4.1	243.2
1994	214.6	20.7	6.3	4.7	297.4
1995	208.2	27.2	6.6	5.3	303.4
1996	145.2	15.4	4.4	3.5	192.5
1997	183.3	18.8	5.8	3.9	234.0
1998	168.8	17.2	5.0	3.3	216.4
1999	215.7	24.7	5.9	5.0	302.2
2000	187.3	19.7	6.1	4.2	246.6
2001	196.7	26.2	6.8	5.6	308.5
2002	176.9	20.9	6.0	4.8	249.1
2003	195.2	15.0	3.9	2.4	231.4
2004	163.3	13.7	4.9	3.6	221.2
2005	157.7	11.3	3.7	2.6	198.0
2006	171.7	17.8	6.6	4.8	229.9

2007	187.0	19.8	6.1	4.0	267.1
2008	179.0	15.5	5.3	3.9	244.9
2009	187.5	14.5	3.5	3.0	235.4
2010	196.4	15.9	3.5	2.7	229.4
2011	144.9	10.6	2.1	1.3	118.1
2012	196.4	14.6	4.9	3.9	259.4
2013	195.9	22.6	6.2	4.8	267.0
2014	171.2	18.5	4.7	3.6	256.4
Moyenne 1965-2014	183.9	20.2	5.3	4.5	244.2

Les apports et les concentrations phosphore, azote, chlorure mesurés en 2014 sont synthétisés dans les tableaux 2 et 3. L'analyse des flux de nutriments des principaux affluents du territoire de la CIPEL montre certaines différences selon les bassins versants de rivières, ainsi que des fluctuations annuelles parfois assez importantes liées à l'influence des conditions météorologiques. L'observation des résultats sur le long terme permet toutefois de dégager plusieurs tendances.

Rivières du bassin versant du Léman : Rhône amont, Dranse, Venoge, Aubonne

Les apports en phosphore total par les principaux affluents du Léman ont diminué depuis 2008 et restent relativement stables.

Les apports en phosphore réactif soluble sont relativement stables depuis le milieu des années 90 et fluctuent autour des 70 tonnes par an.

Les apports en azote minéral total sont relativement stables depuis 1980 et s'expliquent par l'absence de dénitrification dans la majeure partie des STEP du bassin du Léman et par une fertilisation azotée stable depuis près de 20 ans.

Les quantités de chlorure en hausse depuis 1980 semblent montrer une relative stabilité depuis 2010 mais sont légèrement plus faibles qu'en 2013 en lien avec la pluviométrie de l'année.

Rivières du bassin Rhône aval : Arve, Allondon, Rhône à la sortie du territoire suisse à Chancy

Pour ces bassins versants, les apports en phosphore réactif soluble sont relativement stables ces dernières années. Ceux en azote total et en chlorures sont essentiellement liés à la pluviométrie, avec pour les chlorures, une influence liée à l'arrivée des eaux du Léman.

Tableau 2 : Concentrations moyennes en 2014.

Table 2 : Mean concentrations in 2014.

Nom Rivière	Débit (m³/sec)	N-NH ₄ (mgN/L)	N-NO ₂ (mgN/L)	N-NO ₃ (mgN/L)	Ntot (mgN/L)	P-PO ₄ (mgP/L)	PtotBrut (mgP/L)	Cl (mg/L)
Bassin versant du Léman								
Rhône amont	171.2	0.06		0.65		0.01	0.06	11.2
Dranse	18.5	0.03	0.01	0.61	0.68	0.01	0.04	5.4
Aubonne	4.7	0.03	0.01	1.32		0.01	0.05	5.0
Venoge	3.6	0.22	0.04	3.51		0.02	0.08	16.9
Versoir	3.6	0.05		1.39	1.45	0.03	0.08	11.6
Bassin versant Rhône aval								
Rhône émissaire	256.4	0.03		0.47	0.57	0.01	0.03	9.9
Arve	92.1	0.11	0.03	0.64	0.80	0.03	0.07	8.1
Allondon	4.9	0.03	0.02	1.48	1.46	0.04	0.11	5.6
Rhône Chancy	331.2	0.11	0.02	0.62	0.77	0.02	0.04	9.9

Tableau 3 : Flux en 2014.

Table 3 : Flows in 2014.

Nom Rivière	Débit (m³/sec)	N-NH ₄ (tN/an)	N-NO ₂ (tN/an)	N-NO ₃ (tN/an)	Ntot (t/an)	P-PO ₄ (tP/an)	PtotBrut (tP/an)	Cl (t/an)
-------------	-------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	----------------	------------------------------	---------------------	--------------

Bassin versant du Léman

Rhône amont	171.2	341		3'499		58	325	59'357
Dranse	18.5	16	4	354	395	4	21	3'168
Aubonne	4.7	4	1	197		1	7	750
Venoge	3.6	25	4	399		2	9	1'923
Versoix	3.6	6		160	166	4	9	1'331
Total BV Léman		392	9	4'609	561	69	371	66'529

Bassin versant Rhône aval

Rhône émissaire	256.4	218		3'764	4'577	54	235	79'826
Arve	92.1	320	91	1'866	2'328	81	193	23'426
Allondon	4.9	5	4	228	225	5	18	867
Rhône Chancy	331.2	1'127	235	6'512	8'044	166	442	103'396