

## ÉVOLUTION PHYSICO-CHEMIQUE DES EAUX DU LÉMAN (ÉLÉMENTS MAJEURS)

### PHYSICAL-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA (major-elements)

Campagne 2011

PAR

Jérôme LAZZAROTTO

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

Audrey KLEIN

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

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

#### RÉSUMÉ

*L'hiver 2010-2011 a été doux et n'a pas permis un brassage complet du Grand Lac. Un brassage partiel jusqu'à environ 50 à 85 m de profondeur a eu lieu début mars et a permis une redistribution des nutriments dans les couches superficielles ainsi qu'une réoxygénation des couches inférieures.*

*Dès la fin du mois de mars, la baisse des nutriments et l'augmentation de la matière organique particulière constatée dans les couches superficielles traduisent la reprise de l'activité phytoplanctonique printanière.*

*La phase des eaux claires se produit quant à elle fin mai et s'accompagne d'une forte transparence ainsi que d'une augmentation des concentrations en azote ammoniacal due à l'activité zooplanctonique.*

*Malgré l'absence de réoxygénation des eaux du fond, on ne constate pas de relargage important de phosphore et les concentrations en azote ammoniacal restent modérées.*

*Les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique sont les plus faibles observées dans le lac depuis les années 1980 et sont bien inférieures aux normes pour l'eau potable.*

*En revanche, malgré un léger ralentissement entre 2005 et 2008, les teneurs en chlorure augmentent depuis 2009 et avoisinent les teneurs moyennes des apports par les affluents du Léman.*

*Enfin, le stock en phosphore total est globalement stable depuis 2009 (1'938 tonnes en 2011) et la concentration moyenne est de 22.6 µg.L<sup>-1</sup>. L'objectif visé pour 2020 est d'atteindre une concentration entre 10 et 15 µg.L<sup>-1</sup>.*

#### ABSTRACT

*The winter of 2010-2011 was mild and did not achieve churning of the Grand Lac. Partial churning down to a depth of about 50 to 85 m took place early in March, and led to redistribution of the nutrients in the surface layers and reoxygenation of the lower layers.*

*From the end of March, the fall in nutrients and the increase in particular organic matter observed in the surface layers reflected the springtime resumption of phytoplanktonic activity.*

*The clear water phase occurred at the end of May, and was accompanied by high transparency and an increase in the concentrations of ammoniacal nitrogen due to zooplanktonic activity.*

*Despite the lack of reoxygenation of the deep water, there was no major release of phosphorus and the concentrations of ammoniacal nitrogen remained moderate.*

*The mean total nitrogen and nitric nitrogen concentrations were the lowest seen in the Lake since the 1980s, and were well below the standard required for potable water.*

*In contrast, despite a slight slowing between 2005 and 2008, chloride levels have been increasing since 2009 and are approaching the mean levels of the inputs in the tributaries of Lake Geneva.*

*Finally, overall the total phosphorus stock has been stable since 2009 (1'938 metric tonnes in 2011) and the mean concentration was 22.6 µg.L<sup>-1</sup>. The target set for 2020 is a concentration of between 10 and 15 µg.L<sup>-1</sup>.*

## 1. MÉTHODES

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).

Ce rapport traite de l'étude du Grand Lac à la station SHL2. L'étude du Petit Lac à GE3 fait l'objet d'un rapport tous les 5 ans (LAZZAROTTO et *al.*, 2011).

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 1 et 2).

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

### ***Profondeurs et fréquence d'échantillonnage - station SHL2 (Grand 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 est prévue : 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 18 campagnes de prélèvements en 2011, réparties selon les dates indiquées dans le Tableau 1.

Les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'INRA-UMR CARTEL 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'INRA-UMR CARTEL 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 2011 par les différents laboratoires sont concordants (STRAWCZYNSKI, 2012). Les analyses sont validées par des cartes de contrôle de justesse et de répétabilité. Les incertitudes élargies des méthodes sont indiquées dans l'Annexe 3.

Lors de chaque campagne, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH, turbidité, chlorophylle *a* in vivo et luminosité sont réalisés à l'aide d'une sonde multiparamètres immergeable (BLANC et *al.*, 1993). La figure 2 représente deux profils de sonde effectués à deux périodes distinctes : le 8 mars 2011 lors du brassage partiel et le 16 août 2011 alors que l'activité phytoplanctonique est importante.

Tableau 1 : Dates des campagnes de prélèvement à la station SHL2 (Grand Lac).

Table 1 : Dates of the sampling campaigns at the station SHL2 (Grand Lac).

Campagne n°	Date	Campagne n°	Date
1	10.01.2011	10	21.06.2011
2	14.02.2011	11	04.07.2011
3	08.03.2011	12	27.07.2011
4	28.03.2011	13	16.08.2011
5	18.04.2011	14	22.09.2011
6	02.05.2011	15	28.09.2011
7	11.05.2011	16	10.10.2011
8	30.05.2011	17	16.11.2011
9	07.06.2011	18	29.11.2011

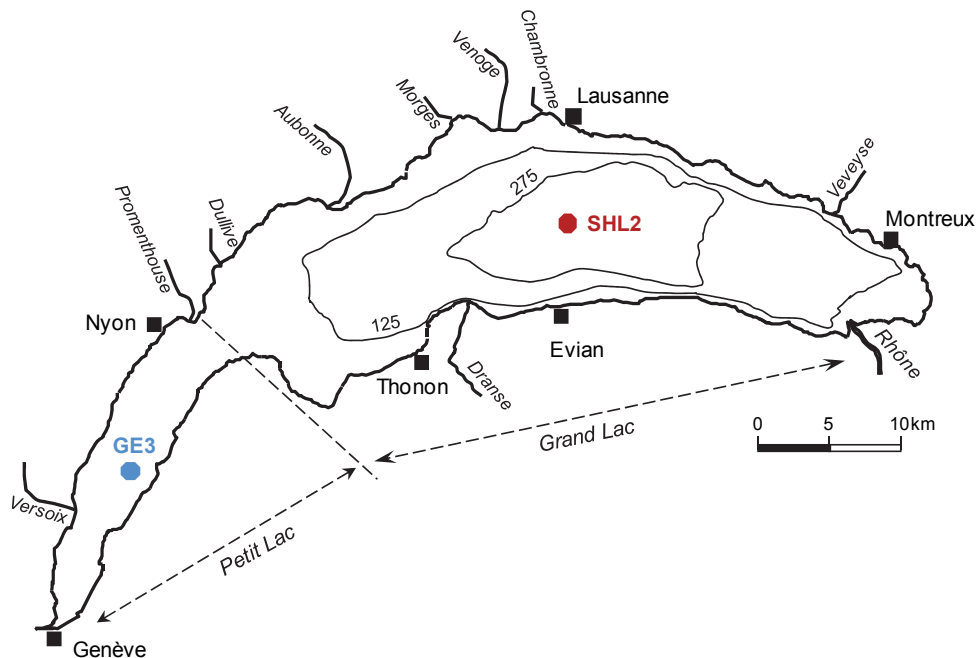


Figure 1 : Situation des points de prélèvement.

Figure 1 : Location of the sampling stations.

## 2. RÉGIME THERMIQUE ET INFLUENCE SUR LA STRATIFICATION OU LE MÉLANGE DES EAUX

En 2011, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.8°C, soit 1,5 °C de plus par rapport à 2010. Avec cette température, l'année 2011 est la 2<sup>ème</sup> année la plus chaude de la période 1980 – 2010, après 1994 avec 11.9°C. L'hiver 2011 a été plus chaud que les années précédentes. Les températures moyennes des mois de janvier et février sont supérieures à leur moyenne inter-stations sur la période 1980 – 2010 (QUETIN, 2012).

Les conditions météorologiques de l'hiver 2011 n'ont pas permis une homogénéisation thermique totale de la masse d'eau. Le minimum de température est atteint le 8 mars 2011, avec 6°C en surface. Ce

refroidissement est légèrement plus important qu'en 2010, bien que l'hiver ait été plus doux. La température des eaux du fond du lac est quant elle stable toute l'année avec 5.5°C.

Ce refroidissement des couches supérieures du lac et les vents de début d'année ont permis un brassage partiel de la colonne d'eau, constaté le 8 mars 2011, permettant une réoxygénation jusqu'à 85 mètres avec une concentration de 10.2 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup>. Plus en profondeur la concentration chute pour atteindre 4.1 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> au fond. Suite au brassage, la stratification thermique débute avec un épilimnion jusqu'à 15 m fin mars.

Depuis 2006, il n'y a pas eu de refroidissement aussi conséquent dans les couches superficielles au moment du brassage. L'année 2011 se comporte comme l'année 2006 dans la dynamique de stratification qui suit le brassage hivernal : la température augmente rapidement en surface de 0 à 20 m et ne présente pas de couche homogène importante en température à la différence de 2008 (figure 6).

Le mois de juillet a été le mois le plus chaud et présente le maximum de température en surface avec 22.13°C le 16 août 2011.

Les figures 3 à 6 représentent l'évolution saisonnière et interannuelle de la température des eaux du lac.

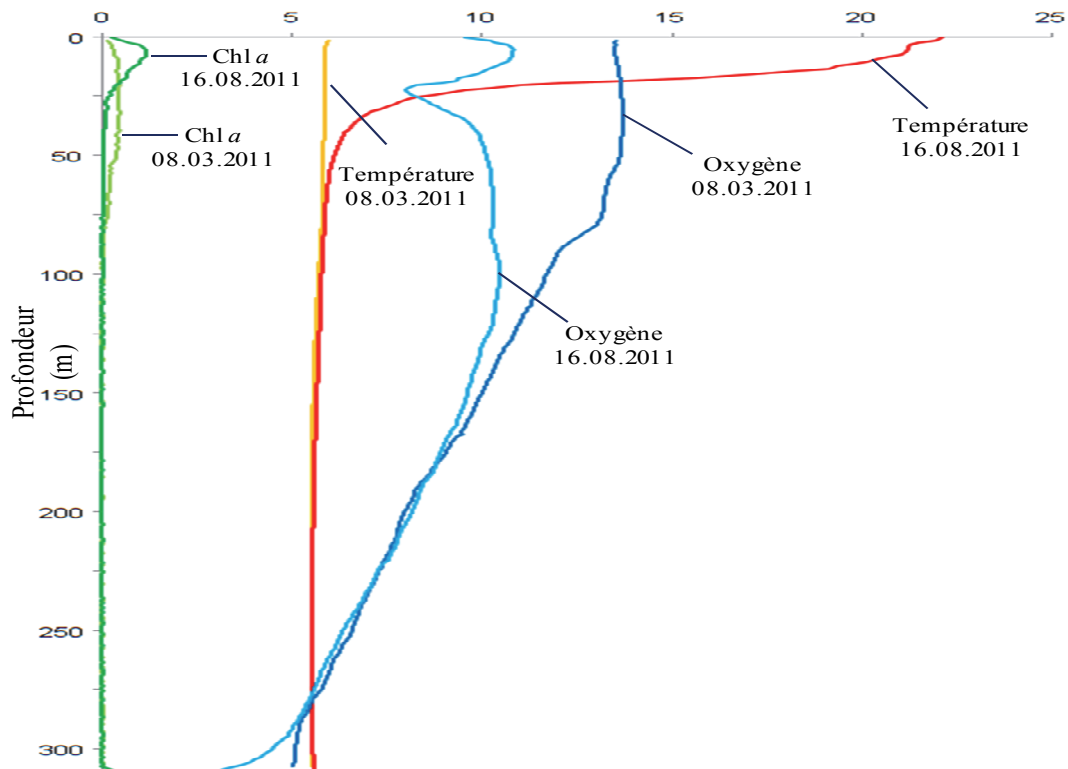


Figure 2 : Profil physico-chimique réalisé à la station SHL2 à l'aide de la sonde multiparamètres lors du brassage (08.03.2011) et lors de la stratification thermique (16.08.2011).

Figure 2 : Multi-parameter Water Quality Logger profile at SHL2 : 08.03.2011 and 16.08.2011.

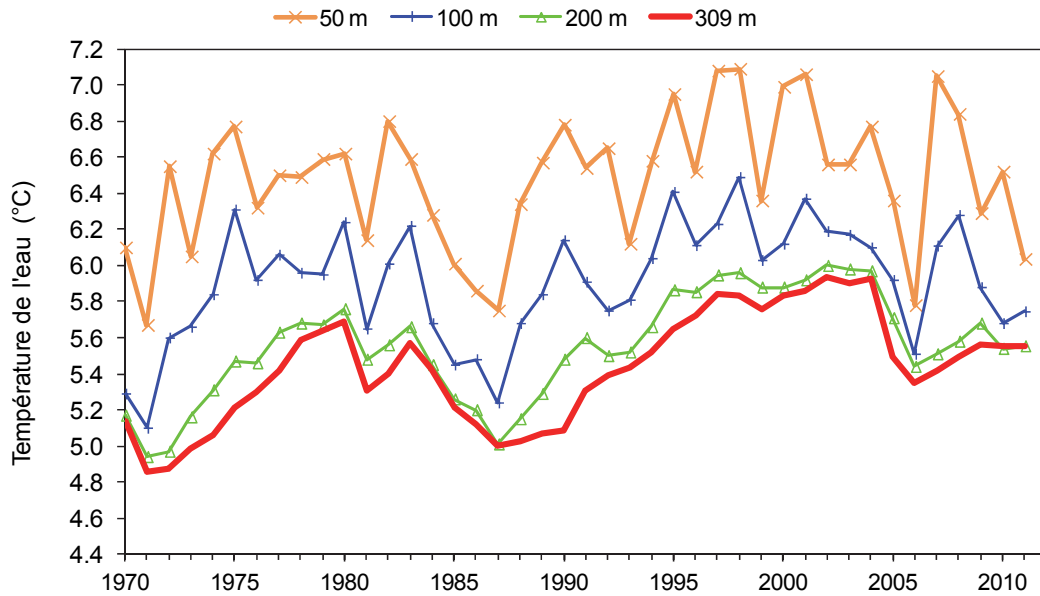


Figure 3 : Evolution de la température moyenne de l'eau aux profondeurs 50, 100, 200 et 309 mètres dans le Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 3 : Change in the mean annual water temperature at depths of 50, 100, 200 and 309 meters, lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

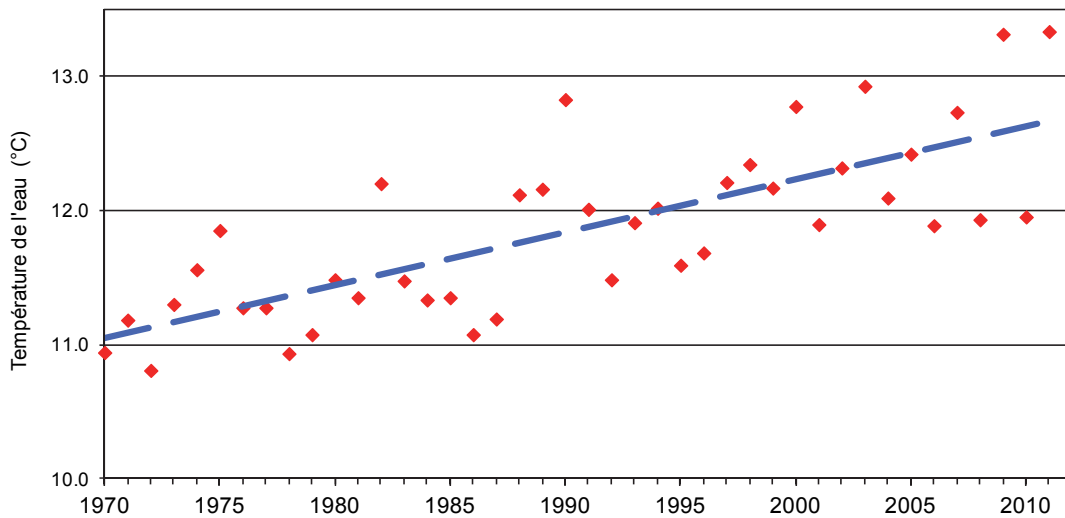


Figure 4 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du Léman à 5 mètres de profondeur – Grand Lac (SHL2).

Figure 4 : Change in the mean annual water temperature of lake Geneva at a depth of 5 meters – Grand Lac (SHL2).

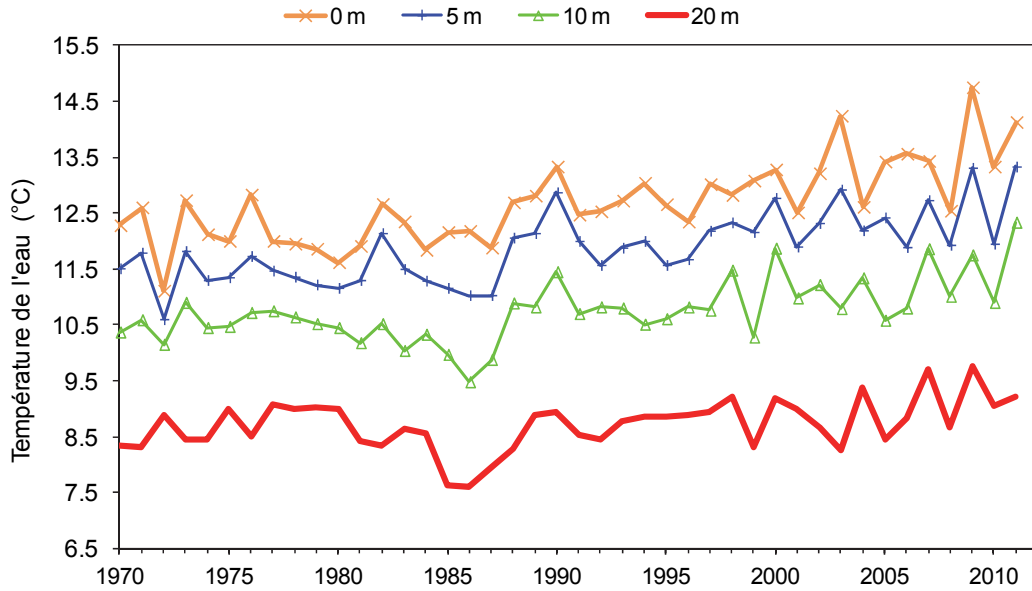


Figure 5 : Température de l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 5 : Temperature of the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 et 20 m) Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

Température (°C) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2011

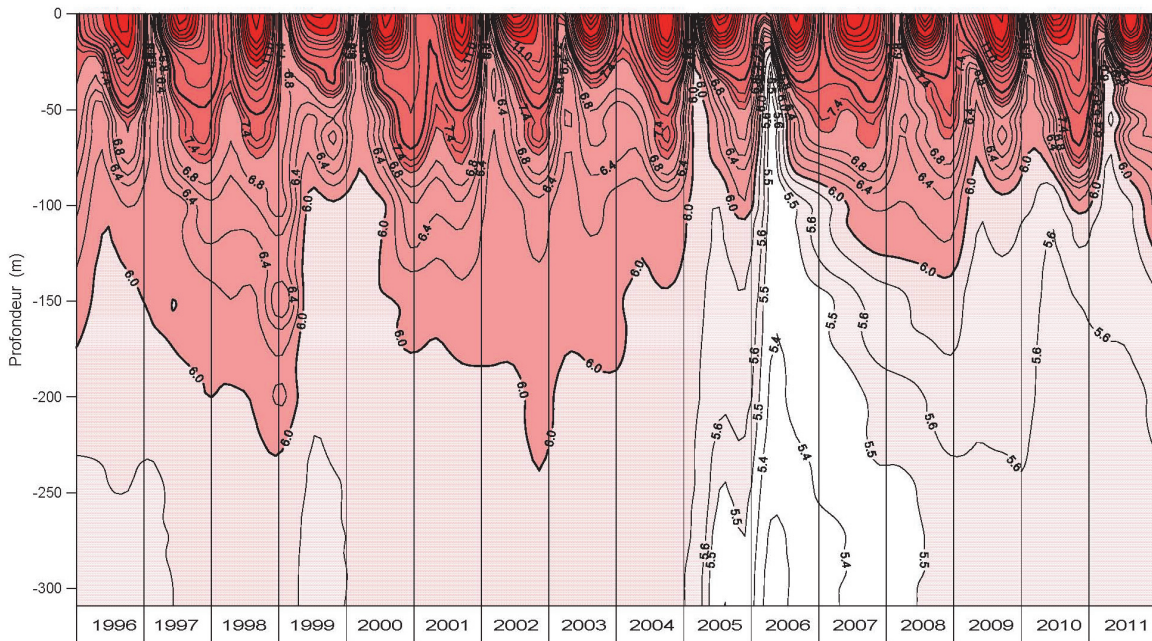


Figure 6 : Température des eaux de Léman (Grand Lac – SHL2) en fonction de la profondeur de 1996 à 2011.

Figure 6 : Water temperature in lake Geneva (Grand Lac – SHL2) as a function of depth from 1996 to 2011.

### 3. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Chaque année, le brassage 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. Le brassage de l'année 2011 est partiel, la redistribution des nutriments est effectuée sur une plus faible profondeur que lors d'un brassage complet.

#### 3.1 Phosphore total et orthophosphate

Lors du brassage partiel des eaux, la concentration en orthophosphate (phosphore réactif soluble) est homogène jusqu'à 50 m, avec  $11 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$  le 8 mars 2011. Cette concentration diminue immédiatement jusqu'à 25 m dès la campagne suivante (le 28 mars 2011), ce qui coïncide avec l'augmentation de l'activité photosynthétique du phytoplancton (TADONLEKE, 2012).

La figure 7 permet d'observer la consommation des ions orthophosphate par l'activité phytoplanctonique printanière. Les couches superficielles s'appauvrissent rapidement en orthophosphate pour atteindre l'état de trace au mois de juin jusqu'à la fin de l'année. L'épaisseur de la couche « déphosphatée » augmente au cours de l'année pour atteindre 50 m en octobre avec des concentrations traces ( $3$  à  $4 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Depuis 2007, cette couche est significativement plus importante qu'entre 1996 et 2006 (figure 8).

La figure 9 représente l'évolution depuis 1996 du stock en phosphore total et en orthophosphate dans les couches 0-50 m et 0-30 m au moment du brassage printanier, soit dans les couches où il est disponible pour l'activité phytoplanctonique. Le stock en orthophosphate, directement biodisponible, est plus faible en 2011 que dans les années 1996-2006 et dans la tendance des dernières années.

Cette évolution est dépendante de l'intensité des brassages de l'année en cours et de l'année précédente, mais n'est pas affectée directement par le phénomène de relargage.

Par ailleurs, le stock de phosphore biodisponible dans les couches superficielles ne présente pas la même dynamique d'évolution que celle du phosphore total sur toute la colonne d'eau. L'activité phytoplanctonique est quant à elle influencée par le stock en phosphore biodisponible des couches superficielles.

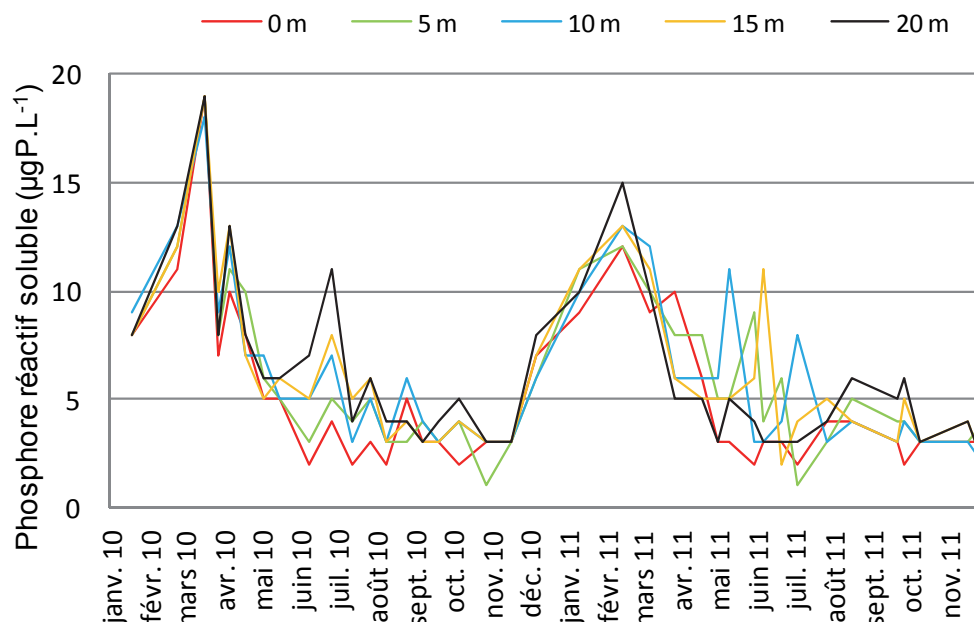


Figure 7 : Concentration en phosphore réactif soluble ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 7 : Concentration of soluble reactive phosphorus ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).



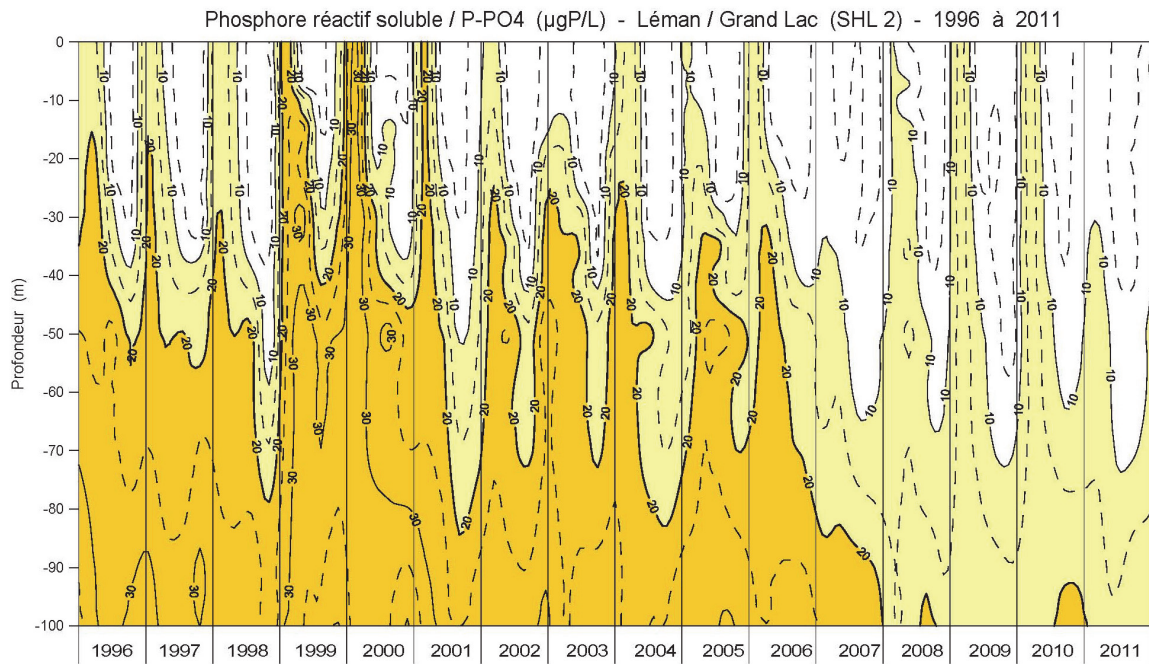


Figure 8 : Concentration en phosphore réactif soluble ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans les différentes couches du Léman (SHL2) (zone jaune foncée = concentration supérieure à  $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ , zone jaune claire = concentration entre  $10$  et  $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ ) de 1996 à 2011.

Figure 8 : Concentration of soluble reactive phosphorus ( $P-PO_4^{3-}$ ) in the various layers of Lake Geneva (SHL2) (zone shaded dark yellow = concentration  $> 20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ , zone shaded light yellow = concentration between  $10$  and  $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ ) from 1996 to 2011.

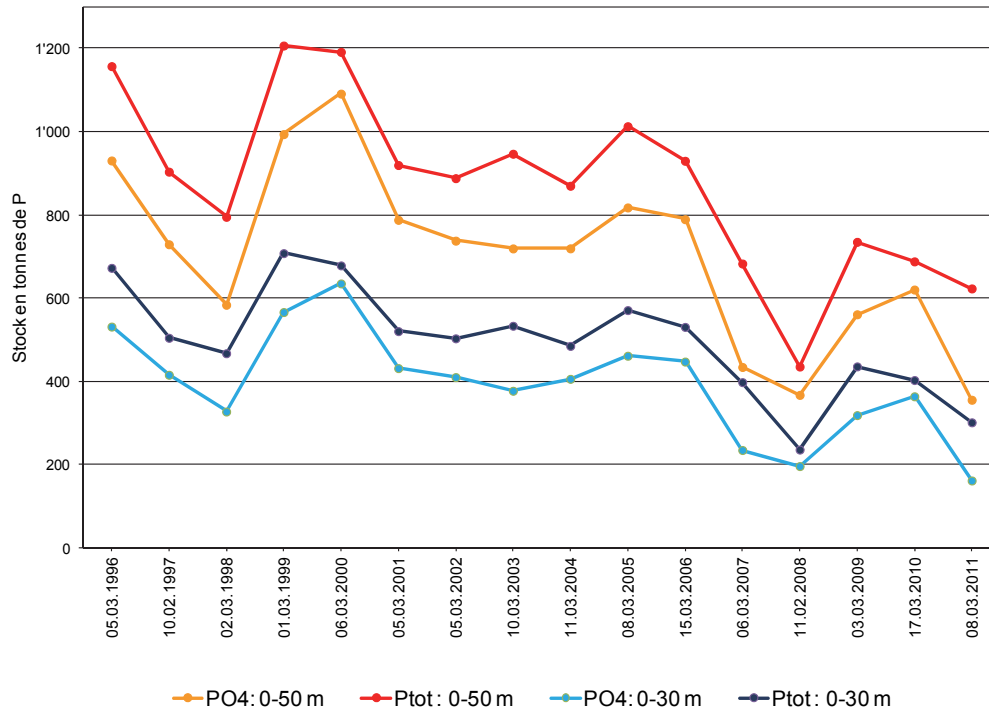


Figure 9 : Stock en phosphore réactif soluble ( $P-PO_4^{3-}$ ) et phosphore total dans les couches 0-30 m et 0-50 m de 1996 à 2011 (Grand Lac – SHL 2) au moment du brassage printanier.

Figure 9 : Stock of soluble reactive phosphorus ( $P-PO_4^{3-}$ ) and total phosphorus (-) in the water in the surface layers (0-30 and 0-50 m) from 1996 to 2011, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2) at the time of the Spring churning.



### 3.2 Azote nitrique et azote ammoniacal

Le brassage n'a pas influencé de manière significative les concentrations en azote nitrique dans les couches superficielles qui étaient déjà considérablement concentrées dès novembre 2010 (figure 10). Au mois de janvier, la concentration en surface est de  $480 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$  et du même ordre de grandeur qu'en fin 2010. La consommation de l'azote nitrique est observable dès la campagne suivant le brassage comme pour l'ion orthophosphate, mais en se limitant à 10 m et sans atteindre de faibles concentrations. Le minimum d'azote nitrique est atteint le 28 septembre 2011 avec  $60 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$  de 0 à 5 m. La consommation en azote nitrique est plus marquée qu'en 2010.

L'activité zooplanctonique entraîne une augmentation de la concentration en azote ammoniacal (excrétions du zooplancton, mais aussi excrétions des poissons, dégradation de la matière organique,...). Il est ainsi possible d'observer l'évolution de cette activité dans les couches superficielles entre le mois d'avril et le mois de juin (figure 11). Le maximum observé est alors de  $49 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$  à 10 m de profondeur le 30 mai.

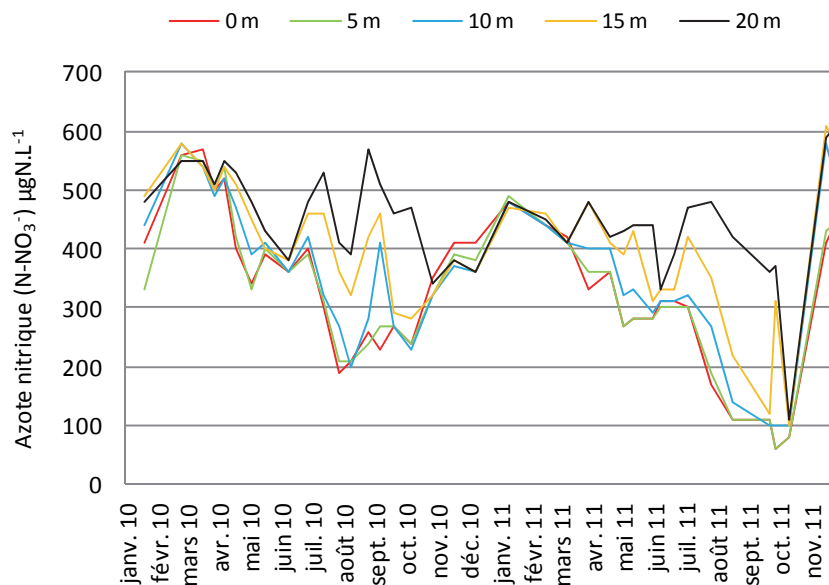


Figure 10 : Concentration en azote nitrique ( $\text{N-NO}_3^-$ ) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

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

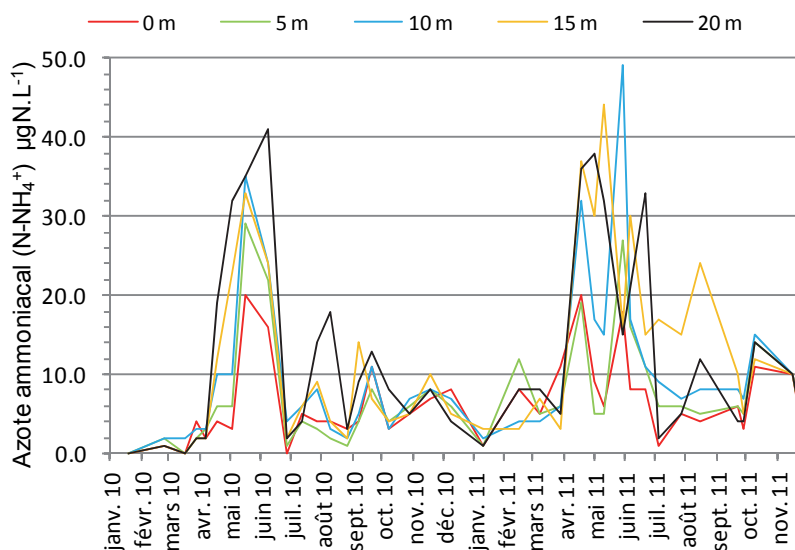


Figure 11 : Concentration en azote ammoniacal des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 11 : Concentration of ammoniacal nitrogen in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

### 3.3 Silice

La silice dissoute est quant à elle rapidement consommée par l'activité phytoplanctonique des diatomées jusqu'à des concentrations très faibles. La concentration en silice dissoute est inférieure à  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  du mois d'avril jusqu'à la fin de l'année et jusqu'à 25 mètres (figures 12 et 13). De la même manière que pour l'azote nitrique, le brassage partiel n'augmente pas significativement la concentration en silice dissoute des couches superficielles mais approfondit la couche de même concentration, soit  $1.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de 0 à 50 m.

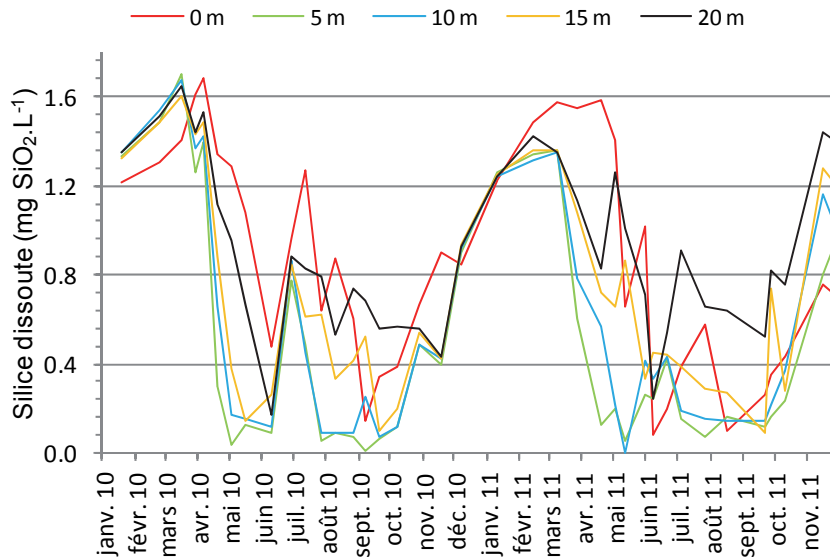


Figure 12 : Concentration en silice dissoute ( $\text{SiO}_2$ ) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 12 : Concentration of dissolved silica ( $\text{SiO}_2$ ) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

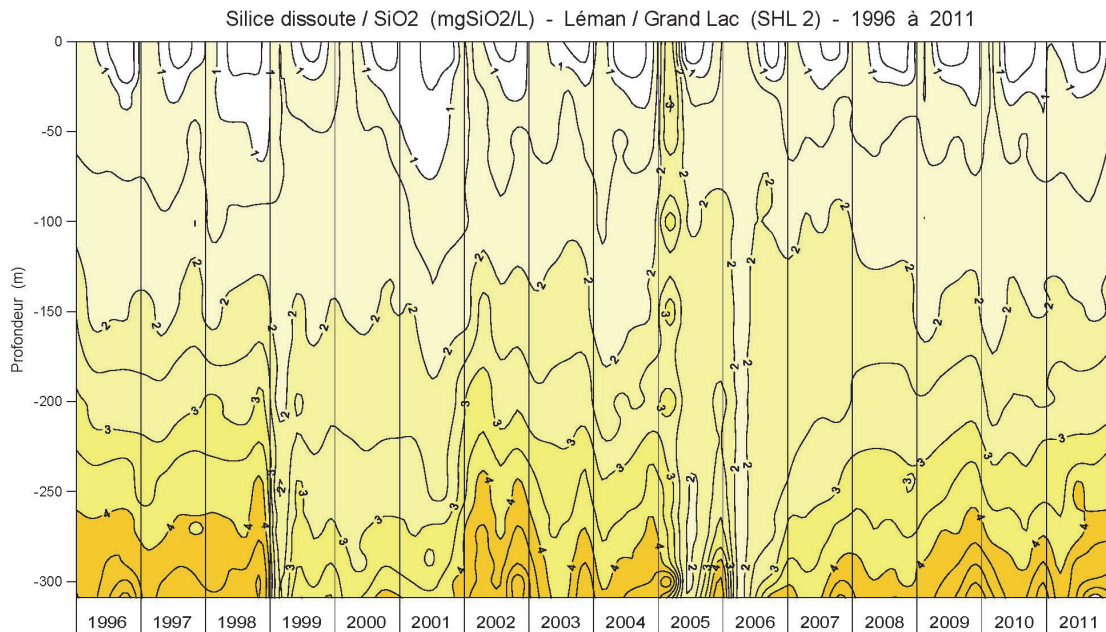


Figure 13 : Concentration en silice dissoute ( $\text{SiO}_2$ ) des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur de 1996 à 2011.

Figure 13 : Concentration of dissolved silica ( $\text{SiO}_2$ ) in the water of Lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth from 1996 to 2011.

### 3.4 Oxygène dissous

La photosynthèse produit de l'oxygène dissous et peut entraîner une sursaturation des couches superficielles (figure 14). Le maximum de sursaturation est observé dès le 28 mars avec 15 mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> en surface. La sursaturation apparaît plus importante qu'en 2010 (Figures 14 et 19)

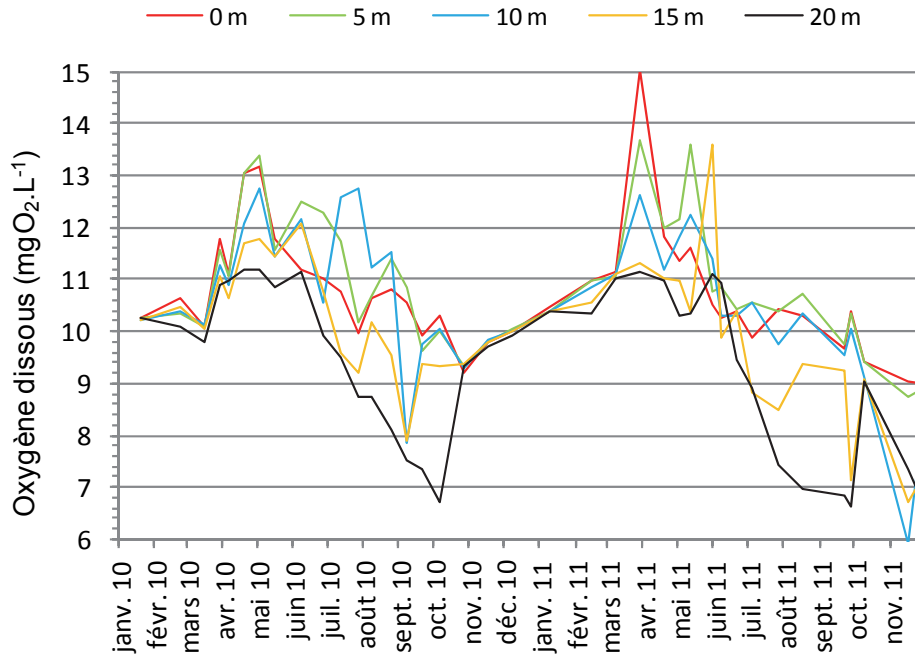


Figure 14 : Concentration en oxygène dissous des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 14 : Concentration of dissolved oxygen in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

### 3.5 Transparence

Après le brassage, lors de la reprise de l'activité photosynthétique, les nutriments sont consommés, la transparence diminue du fait de la présence de phytoplancton. La transparence passe de 10.3 m le 8 mars à 2.3 m le 28 mars, minimum de transparence de l'année (figure 15). Ce minimum de transparence correspond à une prédominance de nanophytoplancton (RIMET, 2012). La transparence augmente ensuite au mois de mai et reste supérieure à 5 m jusqu'à la fin de l'année.

Lors de la consommation du phytoplancton par le zooplancton, la transparence augmente fortement pour atteindre 10.1 m le 30 mai. C'est la phase des eaux claires qui s'étend de mai à juin (PERGA et LAINE, 2012). L'activité phytoplanctonique reprend ensuite en entraînant une diminution modérée de la transparence.

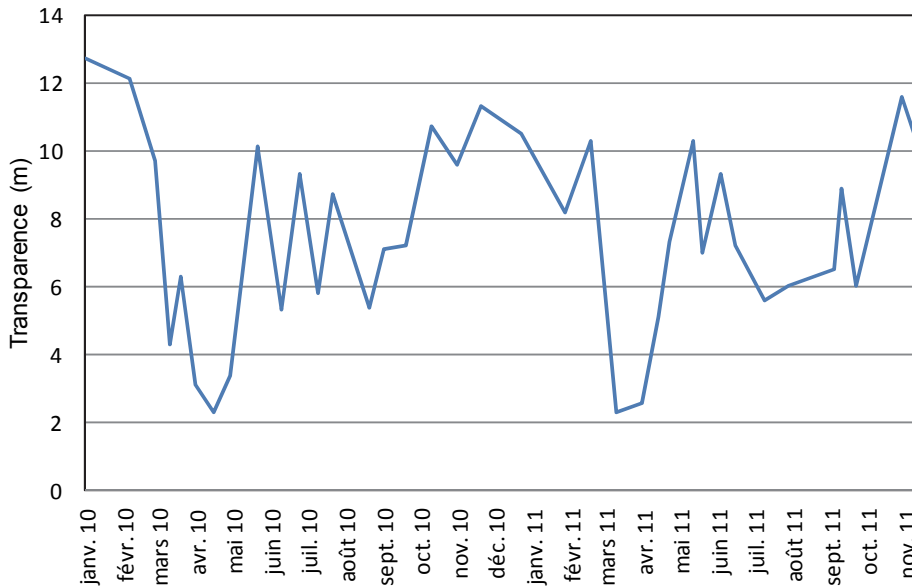


Figure 15 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi (30 cm blanc), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 15 : Transparency measured using a Secchi disk (30 cm white), Léman - Grand Lac (SHL2).

### 3.6 Matière organique particulaire

Les concentrations en carbone organique particulaire (COP) dans les couches superficielles évoluent inversement à la consommation des nutriments et ceci dès le début de l'activité phytoplanctonique (figure 16). Comme pour la transparence et la sursaturation en oxygène dissous, le maximum de l'année en carbone organique particulaire est observé en surface le 28 mars.

La figure 17 permet d'observer la dynamique de la matière organique particulaire (C, N et P) et met en évidence le pic printanier d'activité planctonique. Ce pic est moins important que dans les années 80-90, donnant relativement plus d'importance au pic automnal.

La figure 18 montre que le phosphore reste majoritairement le facteur limitant pour la croissance du phytoplancton : 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.C. Redfield, 1958).

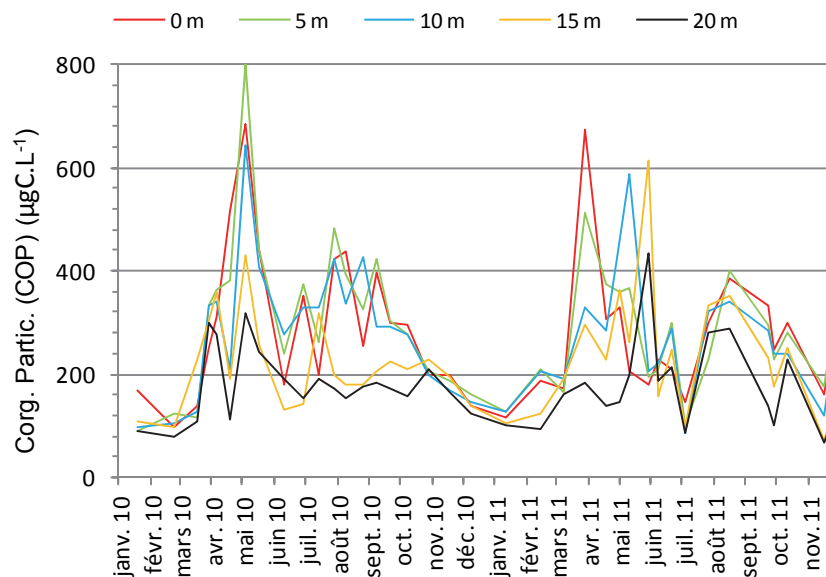


Figure 16 : Concentration en carbone organique particulaire des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 16 : Concentration of particulate organic carbon in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

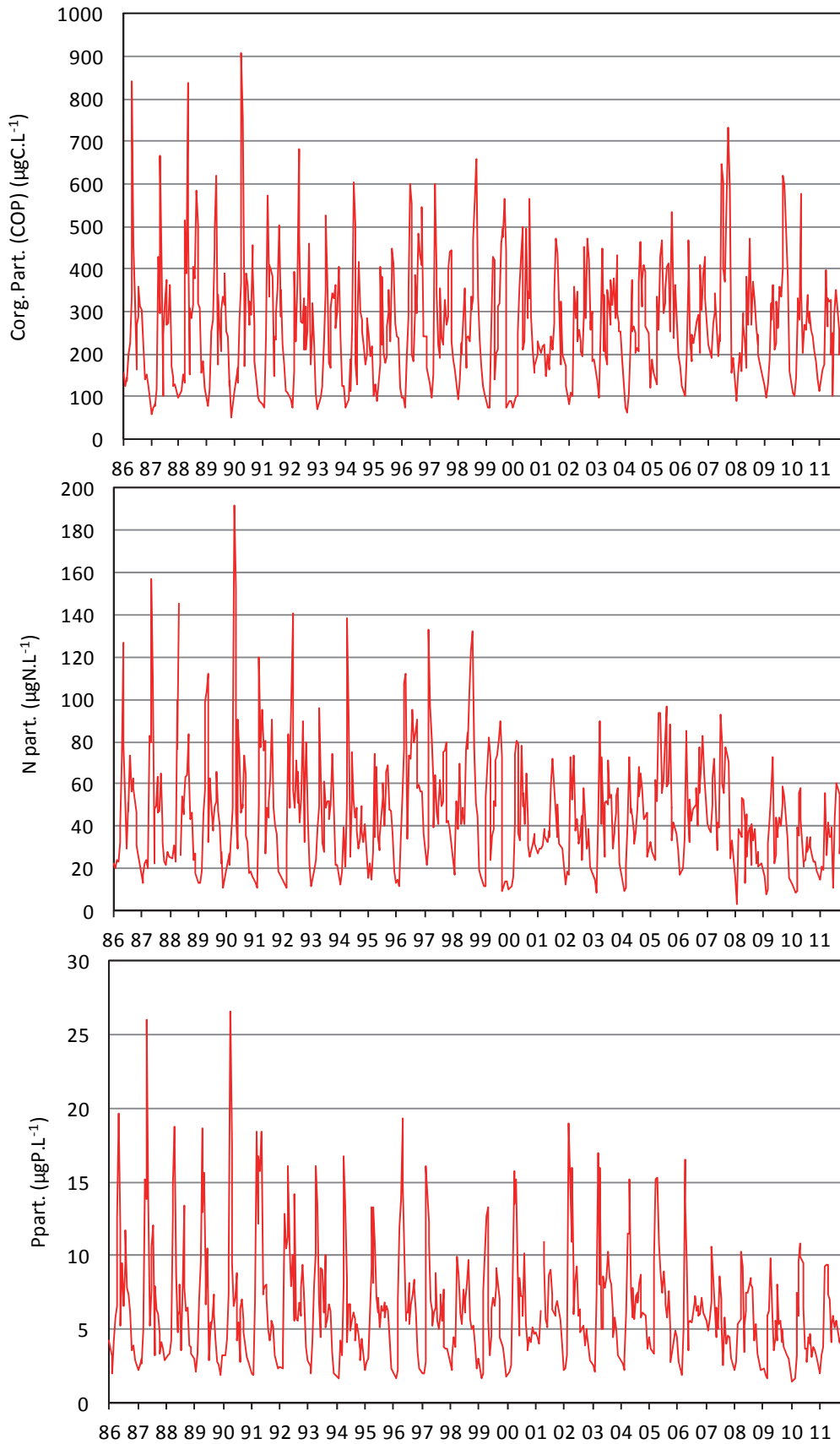


Figure 17: Concentrations en carbone organique, azote et phosphore particulaires des eaux de la couche superficielle (0-20 m).

Figure 17: Concentrations of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus in the water in the surface layer (0-20 m).

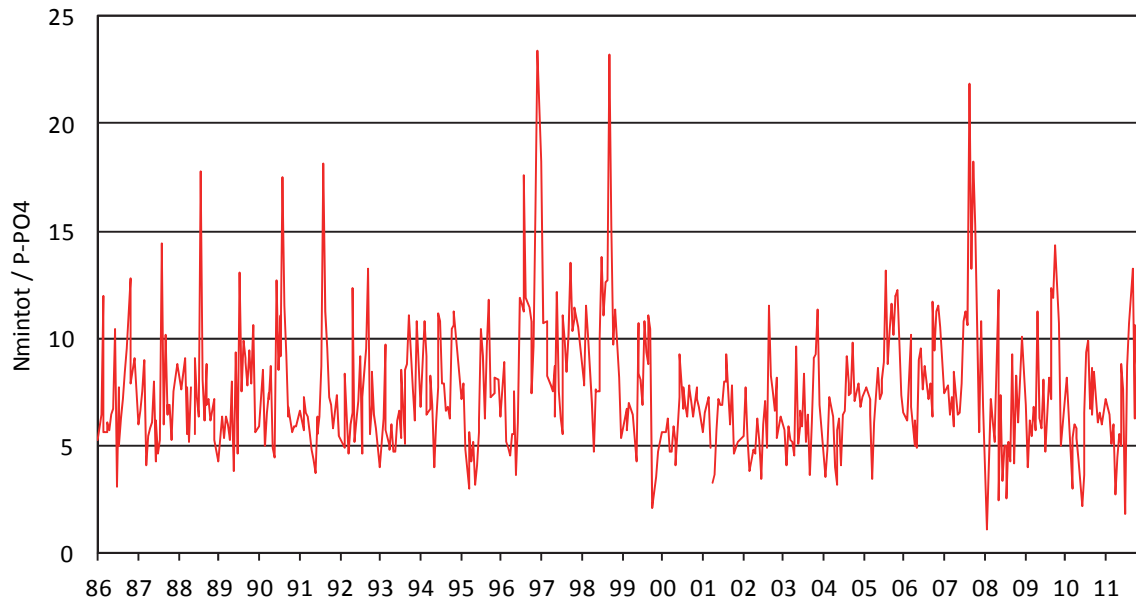


Figure 18 : Rapport Nminéral / P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 18: Nmineral / P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

#### 4. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

La dynamique de l'année 2011 est proche de celle des années précédentes. On n'observe pas de réoxygénation complète de la colonne d'eau mais jusqu'à 85 mètres avec un brassage partiel.

Le brassage partiel et d'autres phénomènes physiques (apports du Rhône, courants sur les parois) ont permis de réoxygéner les couches profondes. La concentration atteint 4.1 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> et augmente lors de la campagne suivante pour atteindre un maximum de 5.6 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> le 28 mars. Tout au long de l'année, l'activité microbienne dégrade la matière organique en consommant de l'oxygène dissous. A partir du mois d'août, cette activité est visible par la diminution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux du fond.

La concentration en oxygène dissous diminue graduellement jusqu'en fin d'année pour atteindre un minimum de 2.0 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> en novembre. Comme pour les années précédentes, malgré un brassage partiel, la désoxygénation des eaux du fond du lac, bien que significative, est moins importante que celles observées dans les années 80-90 (figure 19).

A partir du 21 juin, la concentration des eaux du fond du lac en oxygène dissous est inférieure à 4.0 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> et le reste jusqu'à la fin de l'année (figure 20).

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

Le relargage du phosphore est plus significatif qu'en 2010 avec un maximum de 89 µgP·L<sup>-1</sup> au fond du lac en octobre (figure 21). Les concentrations en azote ammoniacal au fond du lac restent modérées comme l'année précédente.



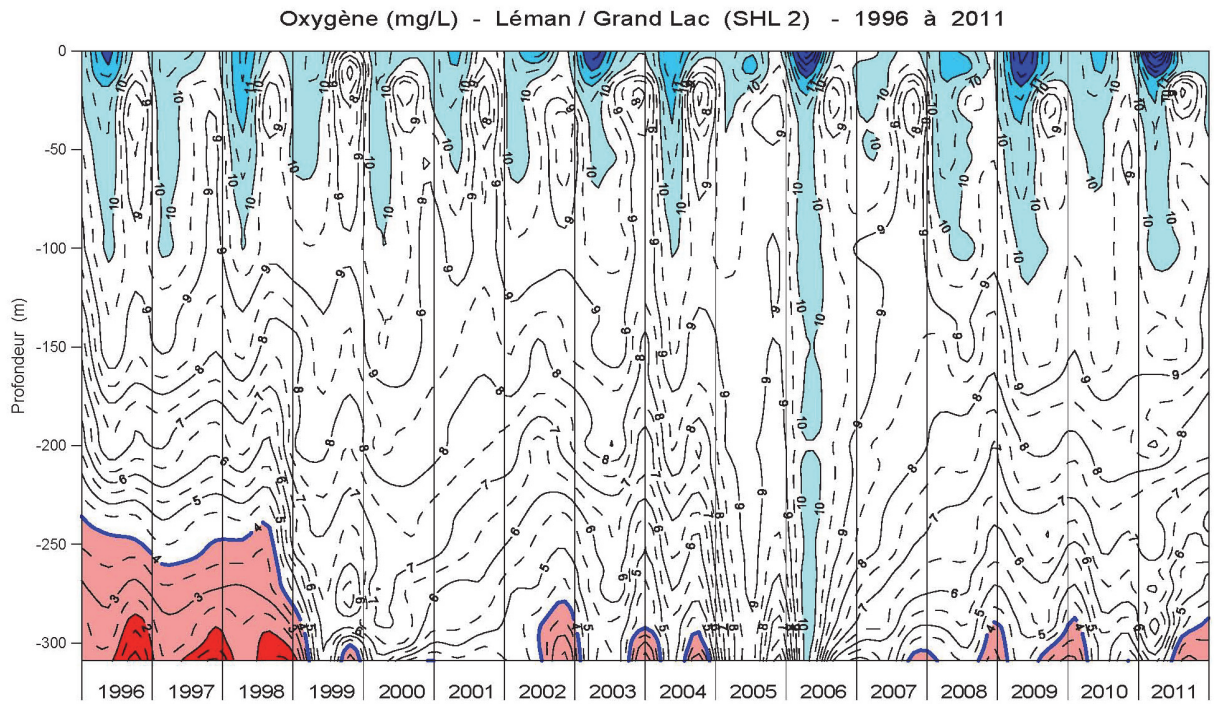


Figure 19 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur de 1996 à 2011.

Figure 19 : Concentration of dissolved oxygen in the water of the lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth from 1996 to 2011.

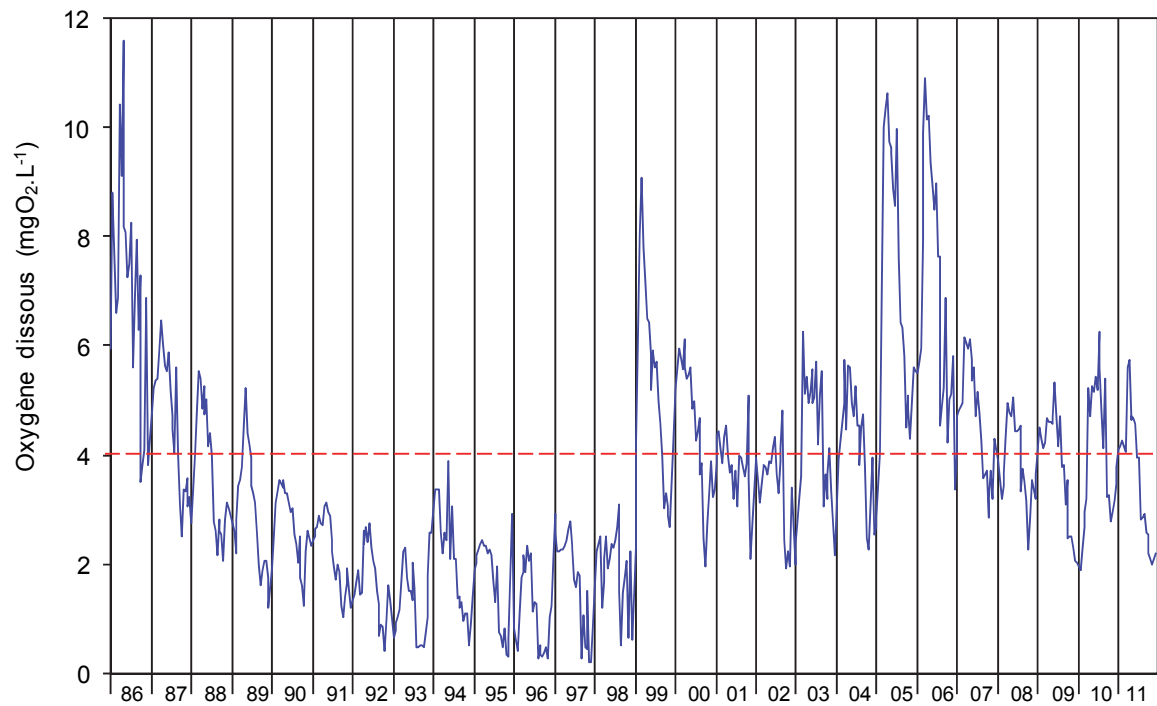


Figure 20 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 20 : Concentration of dissolved oxygen in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).



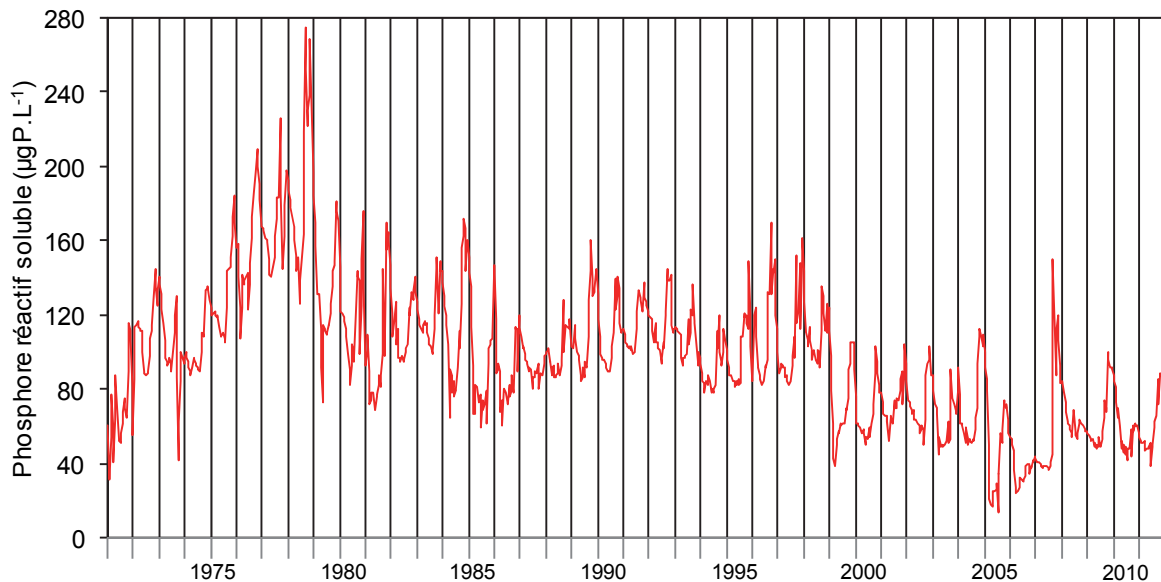


Figure 21 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO43-) des eaux du fond à 309 m, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 21 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO43-) in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

## 5. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

Les concentrations moyennes pondérées et les stocks (cf. Annexes 1 et 2) pour l'ensemble du Grand Lac sont calculés à partir des mesures et des analyses effectuées sur les échantillons prélevés au centre du lac entre Lausanne et Evian (Grand Lac, point SHL 2 : figure 1).

### 5.1 Oxygène dissous

Sur la figure 20, la limite pointillée indique le seuil des  $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  correspondant aux exigences relatives à la qualité des eaux en Suisse. L'Annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 stipule :

« Pour les lacs, il faut également que : la teneur en oxygène de l'eau ne soit, à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à  $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ O}_2$  ; 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 22 indique l'évolution de l'épaisseur de la couche d'eau de concentration inférieure à  $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  depuis 1957.

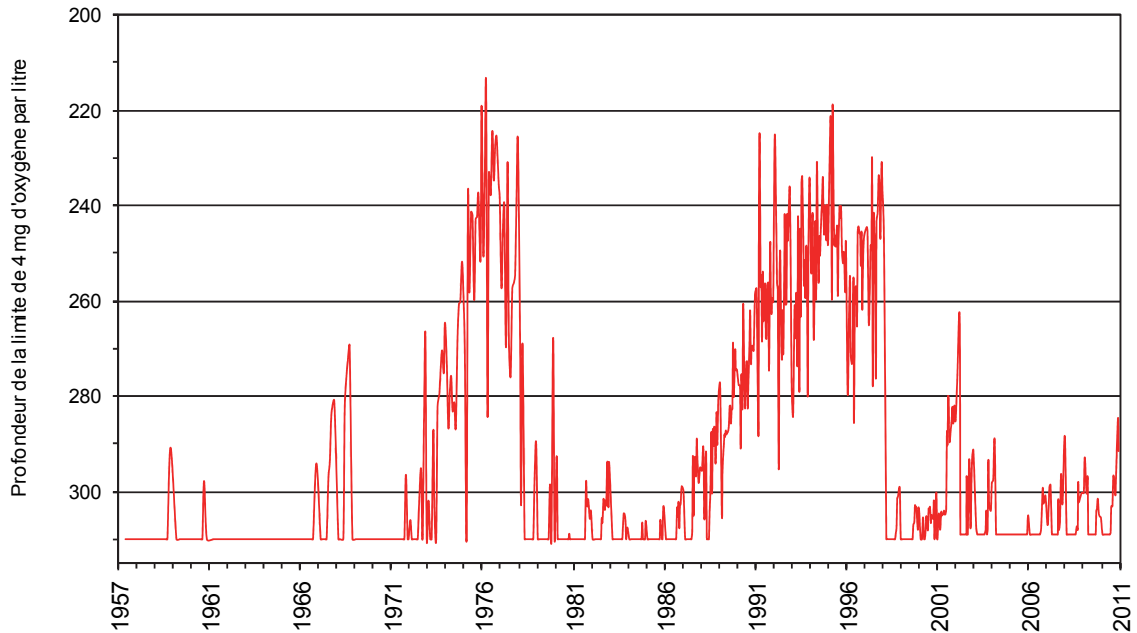


Figure 22 : Evolution de la profondeur de la limite à  $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  dans le Léman - Grand Lac (SHL2) depuis 1957.

Figure 22 : Change in the depth of the  $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  threshold in lake Geneva - Grand Lac (SHL2) since 1957.

## 5.2 Phosphore réactif soluble et phosphore total

Le stock moyen en phosphore total n'a pas significativement évolué depuis 2009, soit 1'938 tonnes de P (pour 1'915 tonnes de P en 2010 et 1'955 en 2009) et une concentration moyenne de  $22.6 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$  (figure 23).

Il en est de même pour le stock en orthophosphate (phosphore réactif soluble) qui est de 1'684 tonnes de P (pour 1'650 tonnes de P en 2010) et une concentration moyenne de  $19.7 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ .

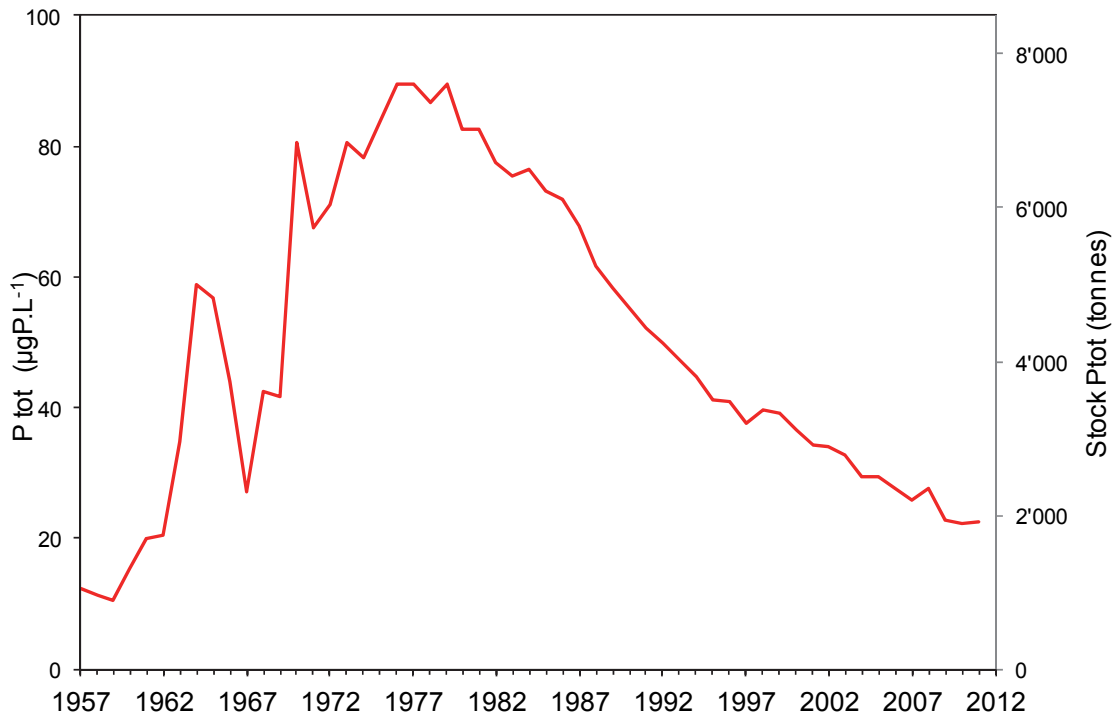


Figure 23 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore total contenu dans le Léman de 1957 à 2011 - Grand Lac (SHL2).

Figure 23 : Change in weighted mean annual total phosphorus concentration and total phosphorus content of the lake Geneva from 1957 to 2011 - Grand Lac (SHL2).

### 5.3 Azote nitrique et azote total

Les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique diminuent par rapport aux années précédentes. En 2011, la concentration moyenne en azote total est de  $0.57 \text{ mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ , soit un stock de 48'805 tonnes de N. La concentration moyenne en azote nitrique est de  $0.46 \text{ mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ , soit  $2.04 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$  (la norme d'eau de consommation en Suisse est de  $40 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$  et en France de  $50 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ ).

Ces valeurs sont les plus faibles observées depuis les années 1980 (figure 24).

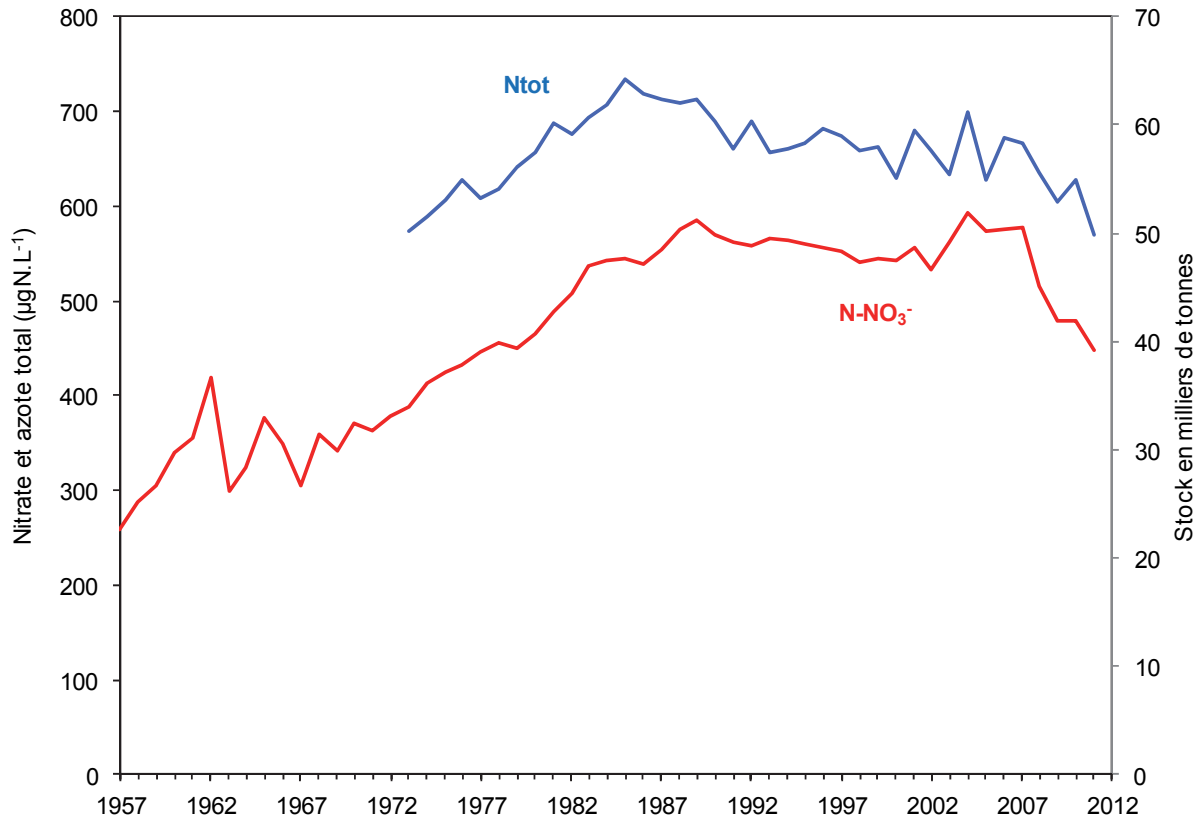


Figure 24 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique contenus dans le Léman de 1957 à 2011, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in the weighted mean annual total nitrogen concentration, in the total nitrogen content and the nitric content of the lake Geneva from 1957 to 2011, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

### 5.4 Chlorure

Depuis le début des mesures du chlorure dans le Léman en 1971 ( $2.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), la teneur du Grand Lac en chlorure est en augmentation quasi linéaire de 2 % par an. Entre 2005 et 2008, nous avons observé un léger ralentissement de l'évolution, mais depuis 2009, le stock en chlorure augmente et atteint en 2011 802'776 tonnes soit  $9.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , contre  $9.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  en 2010 (figure 25). La concentration moyenne des apports par les affluents du Léman atteint  $11.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  cette année (KLEIN, 2012). Si les apports n'évoluent pas de manière importante, la concentration moyenne du lac atteindra progressivement la concentration moyenne des apports.

L'étude menée par GUMY et De ALENCASTRO (2001) indiquait que les concentrations du chlorure observées dans le Léman sont très inférieures aux valeurs toxiques citées dans la littérature. Elle montrait également que les principales sources du chlorure sont majoritairement l'industrie et les sels de déneigement.

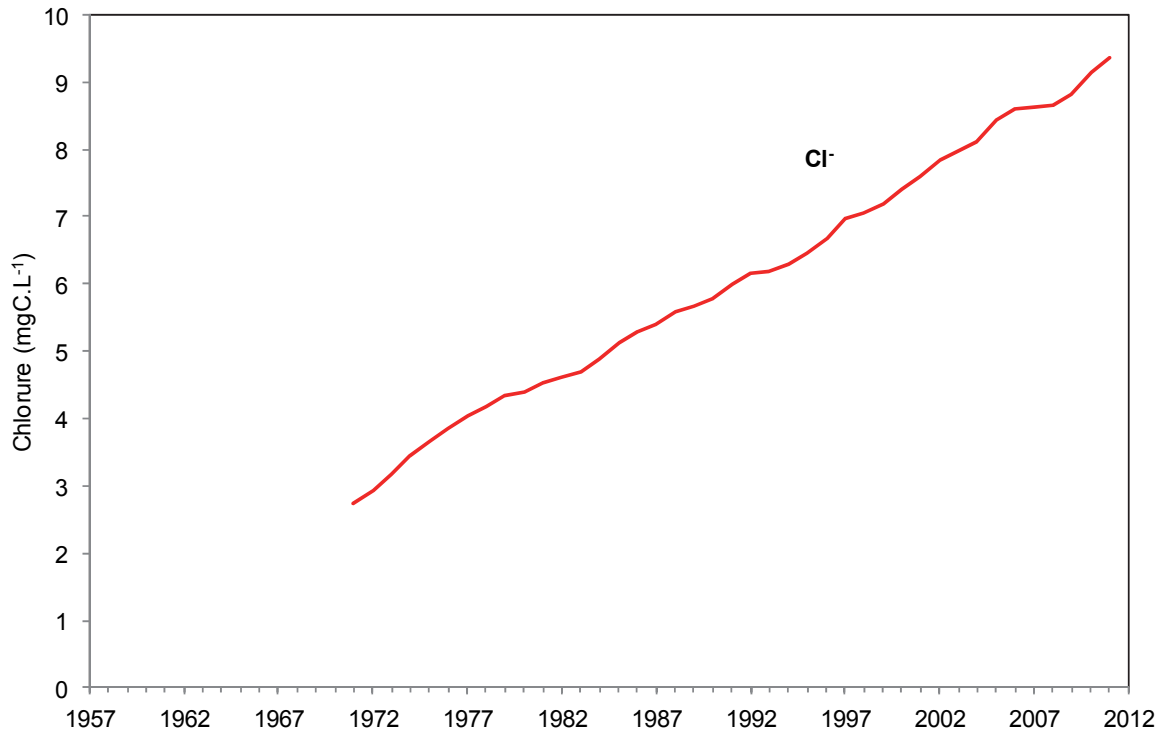


Figure 25 : Évolution de la concentration moyenne annuelle en chlorure, pondérée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2011, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 25 : Change in the weighted mean annual concentration of chloride in the entire mass of the water of the lake from 1971 to 2011, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

## 6. CONCLUSIONS

Les principales observations en 2011 sont :

### ➤ *Pour le Grand Lac :*

- Le brassage partiel de l'hiver 2010 - 2011 jusqu'à environ 50 à 85 m de profondeur a été particulièrement faible et a faiblement redistribué les nutriments.
- Les consommations des ions orthophosphate (phosphore réactif soluble) et silice sont très importantes dès le mois de mars et se poursuivent toute l'année jusqu'à l'état de trace dans les couches épilimniques.
- La réoxygénation des eaux du fond du lac est faible en 2011, mais les phénomènes de relargage du phosphore et de réduction de l'azote ont été limités.

### ➤ *Pour les stocks :*

- Le stock en phosphore total sur toute la colonne n'évolue pas depuis 3 ans : en 2011 la concentration moyenne est de  $22.6 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ . Cela tend à prouver qu'il faut maintenir un effort pour la réduction des apports en phosphore afin que l'état du lac soit stable sur le long terme.
- Le stock en chlorure continue son augmentation après un léger ralentissement ces dernières années.
- Le stock en azote total est le plus bas depuis les années 1980.

## 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. (2012) : Apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 102-121.
- LAZZAROTTO, J., NIREL, P., RAPIN, F., (2011) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 31-63.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- PERGA, M.-E. et LAINE, L. (2012) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 85-94.
- QUETIN, P. (2012) : Météorologie. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 14-25.
- REDFIELD, A.C. (1958) : The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist, Vol. 46, N°3, pp. 205-221
- RIMET, F. (2012) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 67-77.
- STRAWCZYNSKI, A. (2012) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 151-160.
- TADONLEKE, R.D. (2012) : Production primaire et biomasse chlorophyllienne dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011, 78-84.

ANNEXES

Annexe 1

Concentrations moyennes pondérées - Léman (Grand Lac - SHL2).

Mean weighted concentrations – Lake Geneva (Grand Lac – SHL2).

Année	Oxygène mg·L <sup>-1</sup>	P tot. µgP·L <sup>-1</sup>	PO <sub>4</sub> µgP·L <sup>-1</sup>	Ntot. µgN·L <sup>-1</sup>	Nmintot µgN·L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> µgN·L <sup>-1</sup>	NO <sub>2</sub> µgN·L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> µgN·L <sup>-1</sup>	Cl mgCl·L <sup>-1</sup>	C.O.P µgC·L <sup>-1</sup>	Npartic µgN·L <sup>-1</sup>	Ppartic µgP·L <sup>-1</sup>	Transpar 12 mois (en m)	Transpar mai-sept (en m)
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	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	110.0	8.7	2.0	8.22	6.41
2011	8.96	22.6	19.7	570	463	4.1	1.4	457	9.37	86.6	9.7	2.1	7.50	7.32

\* : valeur interpolée



**Annexe 2**

Stocks en tonnes - Léman (Grand Lac - SHL2).

Total content in metric tons - Lake Geneva (Grand Lac - SHL2).

Année	Oxygène Tonnes	P tot. Tonnes	P-PO4 Tonnes	N tot. Tonnes	Nmintot Tonnes	N-NH4 Tonnes	N-NO2 Tonnes	N-NO3 Tonnes	Cl Tonnes	C.O.P. Tonnes	P partic Tonnes	N partic 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
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	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

\* : valeur interpolée

**Annexe 3**

Incertitudes élargies\* des principales analyses physico-chimiques.

Expanded uncertainties of main physical and chemical analyses.

Paramètre	Unité	Incertitude élargie U (%)
NO <sub>3</sub>	mgN·L <sup>-1</sup>	6 %
NO <sub>2</sub>	mgN·L <sup>-1</sup>	6 %
NH <sub>4</sub>	mgN·L <sup>-1</sup>	6 %
Ntotal	mgN·L <sup>-1</sup>	6 %
PO <sub>4</sub>	µgP·L <sup>-1</sup>	6 %
Ptotal	µgP·L <sup>-1</sup>	7 %
TOC	mgC·L <sup>-1</sup>	4 %
Ca	mg·L <sup>-1</sup>	3 %
K	mg·L <sup>-1</sup>	4 %
Mg	mg·L <sup>-1</sup>	4 %
Na	mg·L <sup>-1</sup>	5 %
Cl	mg·L <sup>-1</sup>	5 %
SO <sub>4</sub>	mg·L <sup>-1</sup>	3 %

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