

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN (éléments majeurs)

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

Campagne 2010

PAR

Jérôme LAZZAROTTO

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

Pascale NIREL

SERVICE DE L'ÉCOLOGIE DE L'EAU, DÉPARTEMENT DE L'INTÉRIEUR ET DE LA MOBILITÉ, CP 78, CH - 1211 GENÈVE 8

François RAPIN

SECRÉTARIAT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN
ACW - Changins - Bâtiment DC, CP 1080, CH - 1260 NYON 1

RÉSUMÉ

L'hiver 2009-2010 a permis un brassage partiel du Grand Lac début mars 2010. L'homogénéisation des eaux a atteint environ 150 à 200 m. Dès mars, après brassage, le déclenchement de l'activité phytoplanctonique est mis en évidence par la consommation des nutriments et la sursaturation en oxygène dissous dans les couches superficielles. L'orthophosphate (phosphore réactif soluble) et la silice sont fortement consommés et leurs concentrations baissent jusqu'à atteindre des valeurs très basses dans les couches superficielles. Cette faible concentration en surface perdure tout le reste de l'année.

La phase des eaux claires se produit en juin et s'accompagne d'une forte transparence.

Dans les couches profondes, partiellement réoxygénées par le brassage partiel, on ne constate pas de relargage important de phosphore, ni de réduction significative de l'azote.

Le stock en phosphore total du lac diminue faiblement : la concentration moyenne est de $22.4 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ (1'915 tonnes).

La dynamique des couches superficielles du Petit Lac est proche de celle du Grand Lac avec une forte consommation des nutriments dès le brassage. Le Petit Lac étant chaque année complètement homogénéisé et réoxygéné, les concentrations d'oxygène au fond restent supérieures aux exigences légales.

Dans le Petit Lac, la concentration moyenne en phosphore total tend à se rapprocher de $10 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

ABSTRACT

The winter of 2009-2010 saw partial churning of the Grand Lac early in March 2010, which extended down to about 150 - 200 meters. From March, after churning, the onset of phytoplanktonic activity was evident from the consumption of nutrients and the dissolved oxygen oversaturation in the surface layers. Orthophosphate (soluble reactive phosphorus) and silica were strongly consumed, and their concentrations dropped to very low levels in the surface layers. This low surface level persisted throughout the rest of the year.

The clear-water phase occurred in June, and was accompanied by high transparency.

In the deep layers, which were partially reoxygenated by the partial churning, no major release of phosphorus or any significant reduction of nitrogen was observed.

The total phosphorus content of the lake fell slightly: the mean concentration was $22.4 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ (1'915 tons).

The dynamic pattern seen in the surface layers of Petit Lac was similar to that in Grand Lac, with a high consumption of nutrients once churning had occurred. Since Petit Lac is completely mixed and reoxygenated every year, the bottom level of oxygen remained above the legally-required levels.

In Petit Lac, the mean concentration of total phosphorus tended towards $10 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

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 et de l'étude du Petit Lac à GE3 qui fait l'objet d'un rapport tous les 5 ans (LAZZAROTTO et al., 2006).

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 20 campagnes de prélèvements en 2010, 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 2010 par les différents laboratoires sont concordants (STRAWCZYNSKI, 2011). 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 24 février 2010 lors du brassage partiel et le 13 juillet 2010 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	19 janvier 2010	11	13 juillet 2010
2	24 février 2010	12	28 juillet 2010
3	17 mars 2010	13	9 août 2010
4	29 mars 2010	14	26 août 2010
5	6 avril 2010	15	9 septembre 2010
6	19 avril 2010	16	20 septembre 2010
7	3 mai 2010	17	7 octobre 2010
8	17 mai 2010	18	28 octobre 2010
9	9 juin 2010	19	18 novembre 2010
10	28 juin 2010	20	8 décembre 2010

Profondeurs et fréquence d'échantillonnage – station GE3 (Grand Lac)

Afin de déterminer l'évolution de la qualité des eaux du Petit Lac, les prélèvements sont effectués à 10 profondeurs au point GE3 :

0 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 50 et 70 m

La fréquence d'échantillonnage est mensuelle.

Les prélèvements et les analyses sont effectués, également selon des techniques normalisées, par le Service de l'écologie de l'eau de Genève.

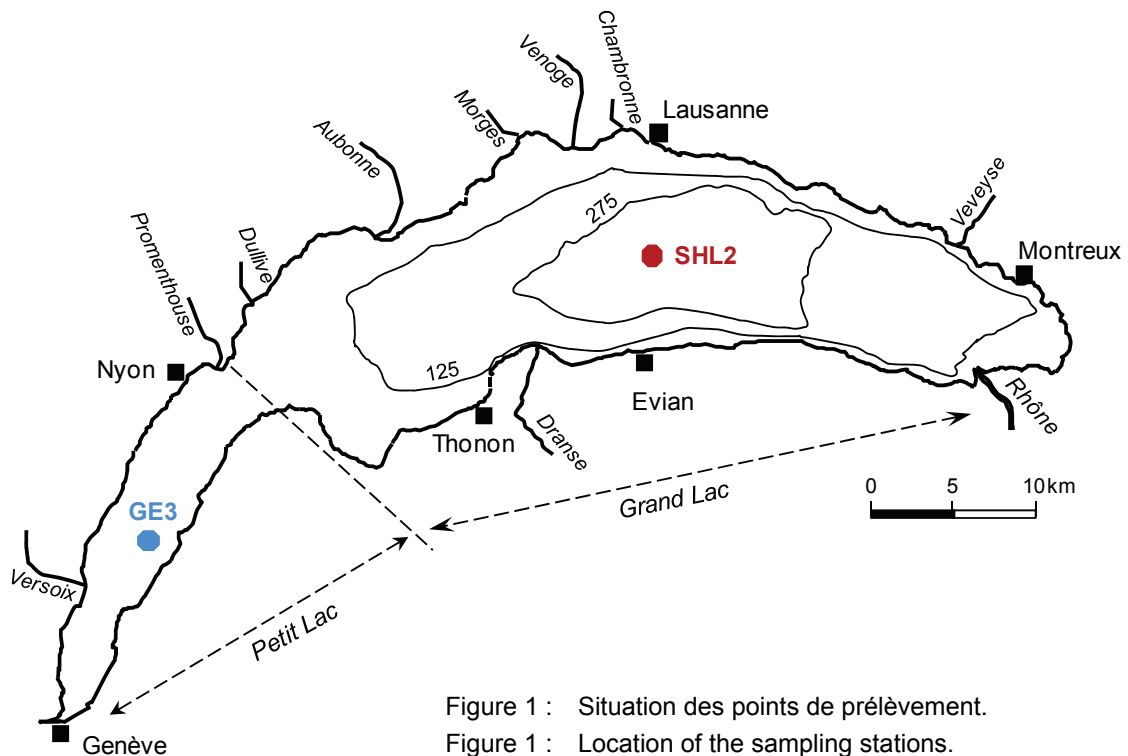


Figure 1 : Situation des points de prélèvement.

Figure 1 : Location of the sampling stations.

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

L'hiver 2009-2010 a été plus froid que les années précédentes, la température de l'air a été négative durant la majorité du mois de janvier (QUETIN, 2011).

Cet hiver froid n'a cependant pas permis une homogénéisation thermique. Le minimum de température est atteint le 24 février 2010, avec 6.24°C en surface. Ce refroidissement est moins important qu'en 2009 et du même ordre que les années antérieures. La température des eaux du fond du lac est stable toute l'année entre 5.53 et 5.58°C.

Ce refroidissement des couches supérieures du lac et les vents de début d'année ont permis un brassage partiel atteignant presque 200 mètres entre le 24 février et le 17 mars 2010.

Ce brassage permet une réoxygénation partielle de la colonne d'eau avec 10.12 mgO₂·L⁻¹ à 150 m le 24 février, plus en profondeur la concentration chute pour atteindre 2.69 mgO₂·L⁻¹ au fond. A partir du mois de mars, la stratification thermique débute avec un épilimnion jusqu'à 15 m.

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

Comparativement aux vingt dernières années, l'année 2010 est une année froide et sèche (QUETIN, 2011). La température annuelle moyenne de la colonne d'eau est donc faible par rapport à la tendance, seule la température à 50 m augmente par rapport à 2009 ; ceci est à mettre en relation avec la faible stabilité de l'épilimnion en 2010.

L'année 2010 se comporte comme l'année 2009 dans la dynamique de stratification : la température diminue constamment 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 22.5°C le 13 juillet 2010.

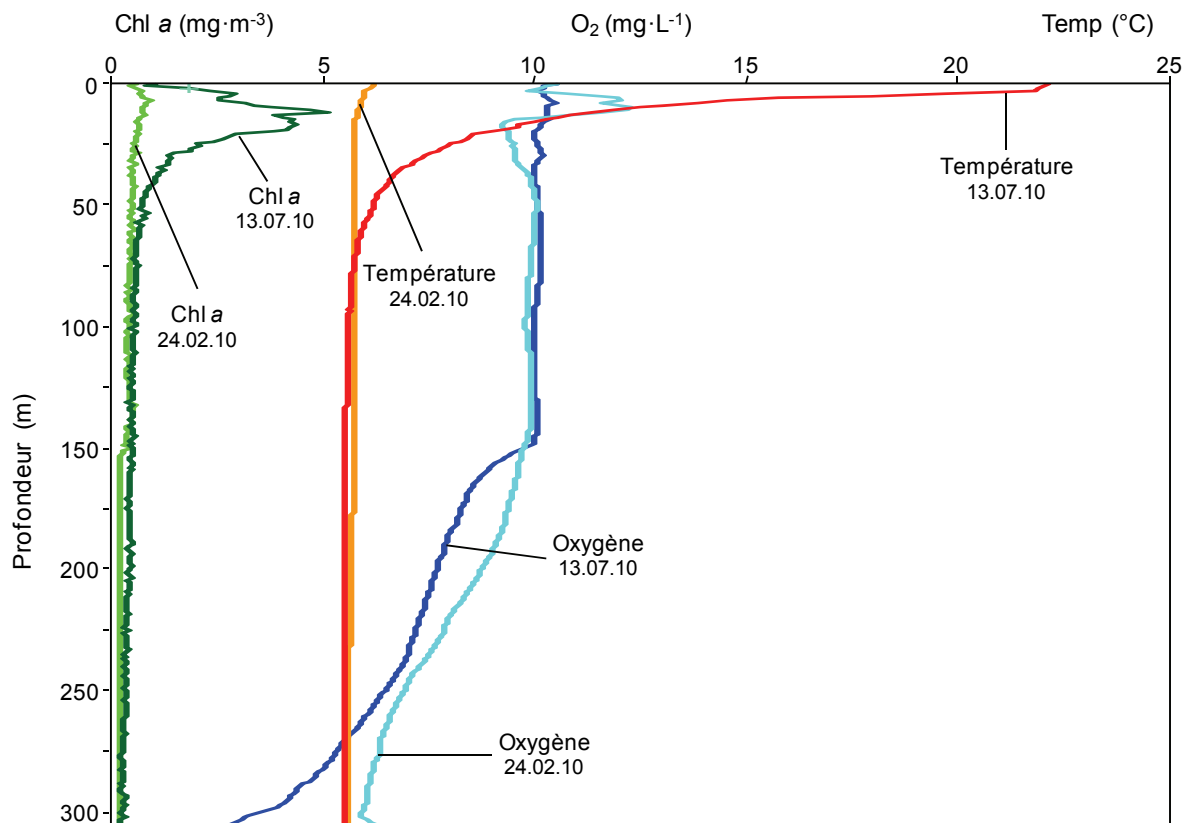


Figure 2 : Profil physico-chimique réalisé à la station SHL2 à l'aide de la sonde multiparamètre lors du brassage (24.02.2010) et lors de la stratification thermique (13.07.2010).

Figure 2 : Multi-parameter Water Quality Logger profile at SHL2 : 24.02.2010 and 13.07.2010.

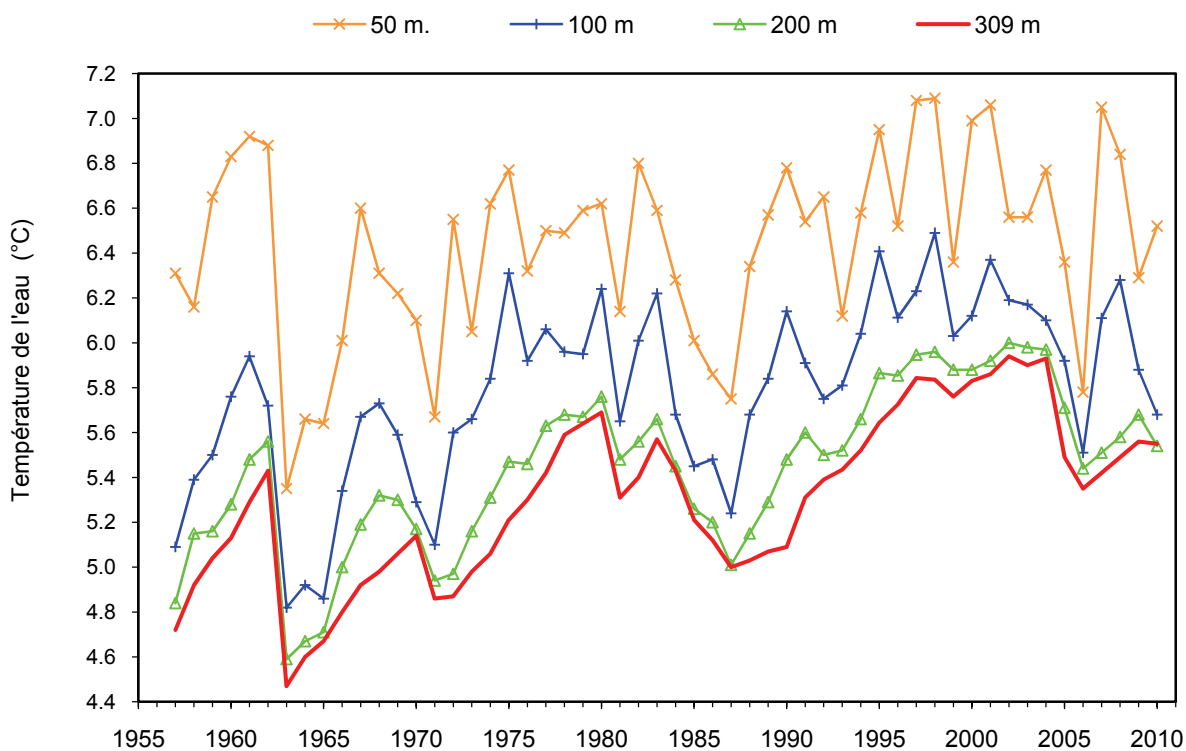


Figure 3 : Evolution de la température moyenne de l'eau aux profondeurs 50, 100, 200 et 309 mètres dans le Léman – Grand Lac (SHL2).

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

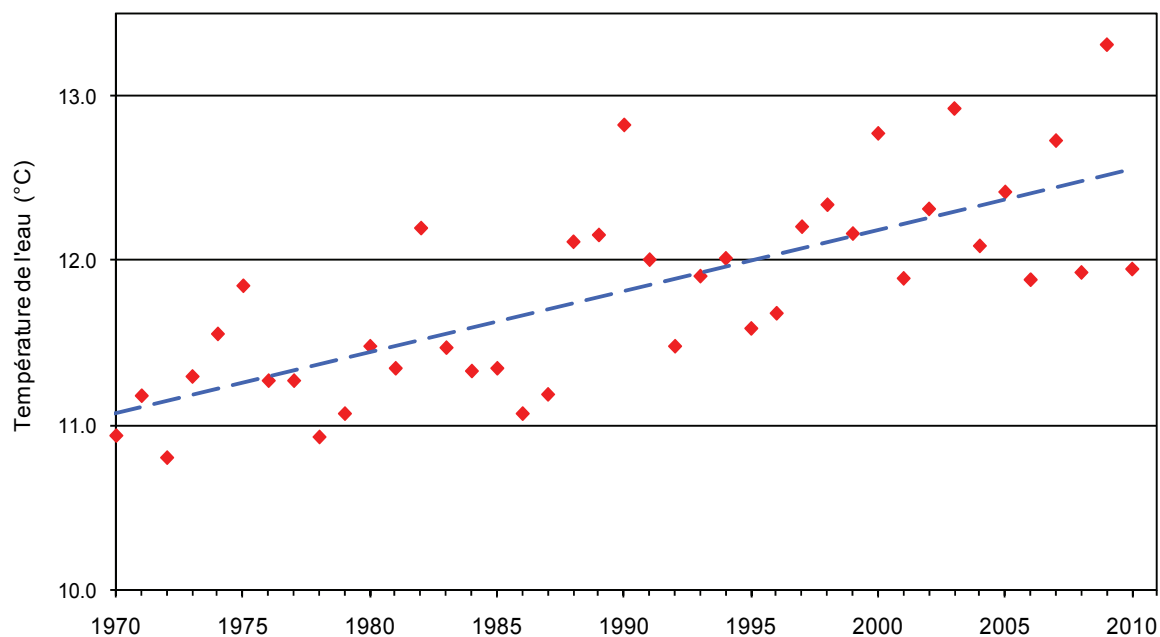


Figure 4 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du Léman à 5 mètres de profondeur – Grand Lac (SHL2).

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

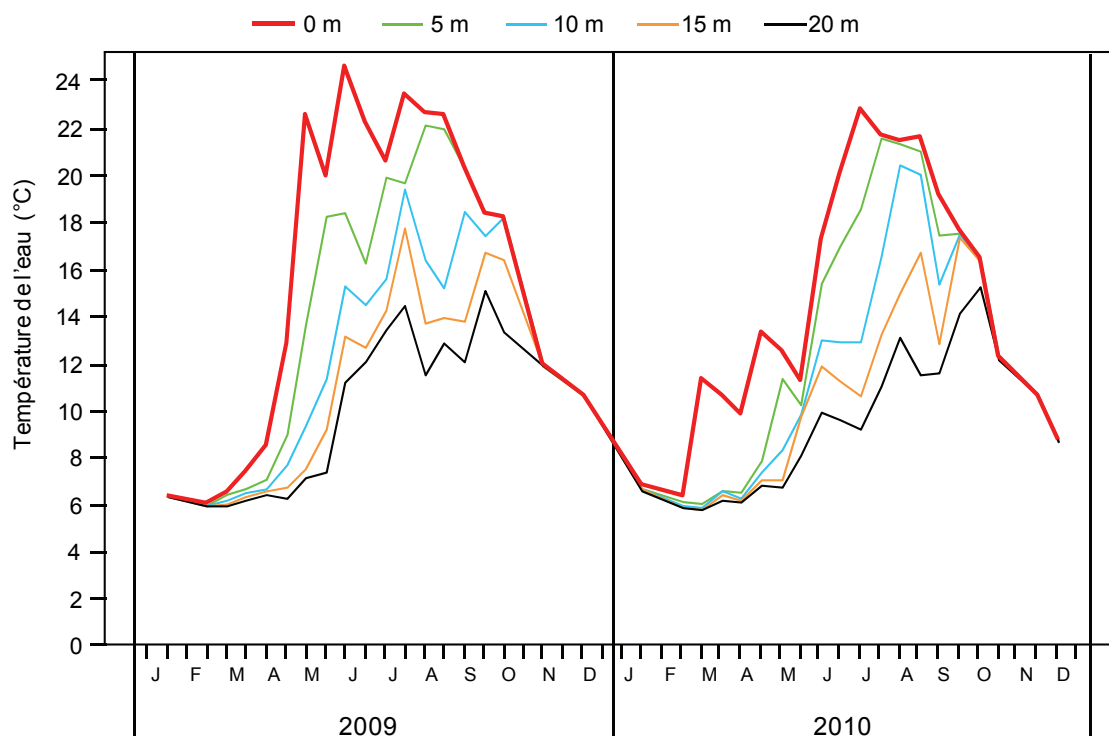


Figure 5 : Température de l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) Léman – Grand Lac (SHL2).

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 2010

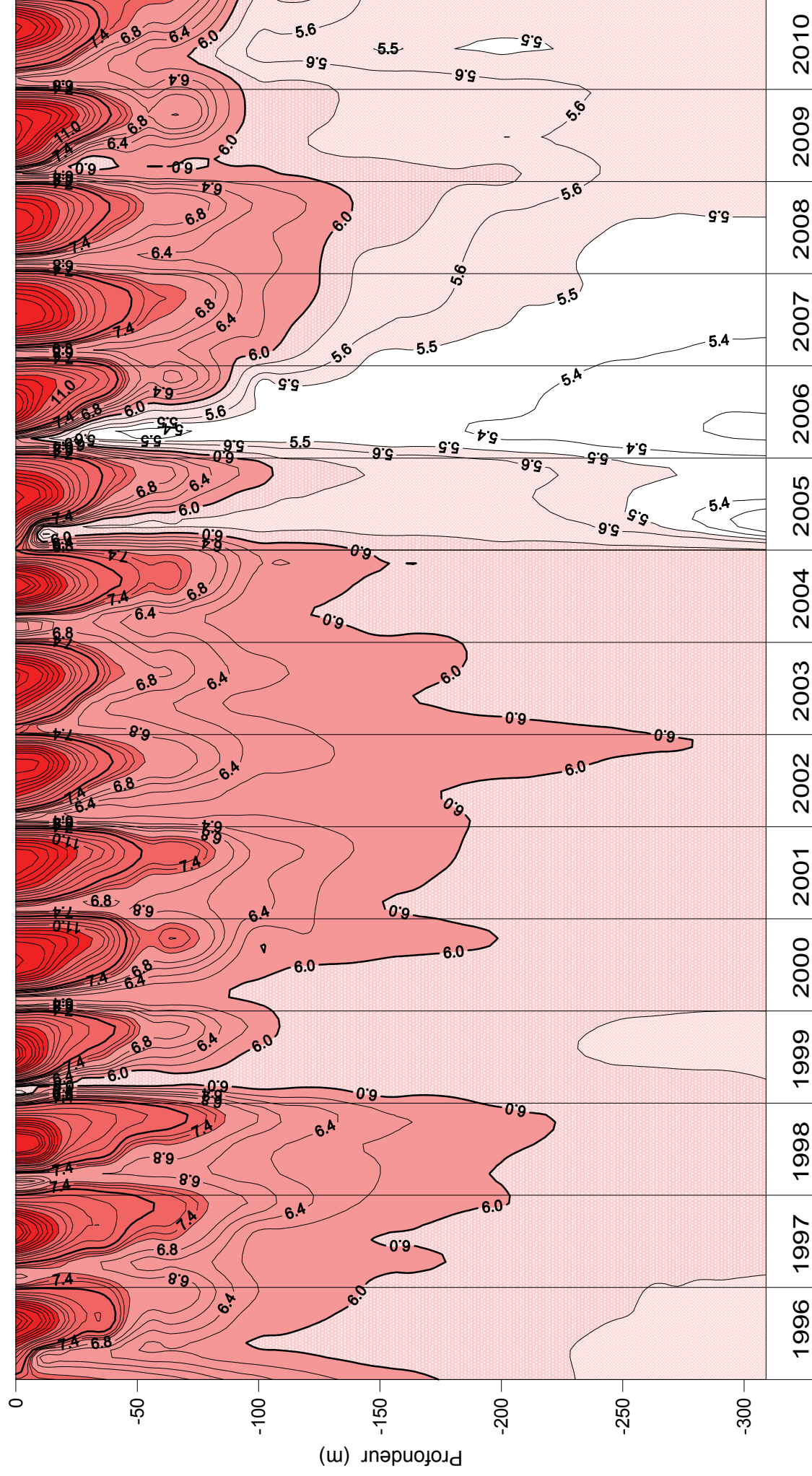


Figure 6 : Température des eaux de Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur de 1986 à 2010.

Figure 6 : Water temperature in lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth from 1986 to 2010.

3. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Chaque année, le brassage permet de remettre à disposition les nutriments dans la colonne d'eau superficielle à partir des couches inférieures et de réoxygéner les eaux du fond. Le brassage de l'année 2010 est partiel, la redistribution des nutriments est effectuée sur une plus faible partie de la colonne d'eau, notamment pour le phosphore.

Après le brassage partiel des eaux, la concentration en orthophosphate (phosphore réactif soluble) est homogène jusqu'à 150 m, entre 18 et 20 $\mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$, le 17 mars 2010. Cette concentration chute immédiatement jusqu'à 50 m dès la campagne suivante en fin mars, ce qui coïncide avec l'augmentation de l'activité photosynthétique du phytoplancton (TADONLEKE, 2011).

La figure 8 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 décembre. Depuis 2007, cette couche est significativement plus importante qu'entre 1996 et 2006 (figure 26). L'activité phytoplanctonique est, comme précédemment, limitée par la concentration en orthophosphate de la zone trophogène.

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, soit dans les couches où il est disponible pour l'activité phytoplanctonique. Le stock en orthophosphate, directement biodisponible, en 2010 est plus faible 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. Le stock de phosphore biodisponible est plus explicatif de l'activité phytoplanctonique et son évolution à long terme est plus cohérente avec l'évolution des moyennes annuelles de production primaire et de chlorophylle *a* que l'évolution du stock total, année exceptionnelle de 2007 mise à part (TADONLEKE, 2011 : cf. figure 3).

La consommation de l'azote nitrique est observable après le brassage comme pour l'ion orthophosphate, mais sans atteindre des concentrations aussi faibles (figure 10). Les concentrations en azote nitrique dans les couches superficielles augmentent de janvier à mars pour atteindre un maximum après le brassage avec une concentration entre 540 et 570 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ de 0 à 250 m le 17 mars. Comme pour l'orthophosphate, la concentration en azote nitrique commence à décroître en surface à partir du 29 mars pour atteindre un minimum entre 190 et 220 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ dans la couche 0-10 m le 28 juillet. La chute de concentration est graduelle entre 0 et 20 m comme indiqué sur la figure 11 : la couche 0-10 m subit une consommation quasi similaire mais la consommation est moindre de 10 à 20 m.

La silice dissoute est quant à elle rapidement consommée jusqu'à l'état de trace, comme l'orthophosphate. 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 m (figures 11 et 13). Le brassage n'est pas complet, il atteint une profondeur d'environ 150 à 200 m avec une concentration de l'ordre de 1.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (figure 13).

Les concentrations en carbone organique total (COT) et particulaire dans les couches superficielles évoluent conjointement à la consommation des nutriments et ceci dès le début de l'activité phytoplanctonique. Le COT passe de 0.9 à 1.2 $\text{mgC}\cdot\text{L}^{-1}$ du 17 au 29 mars, puis reste supérieur à 1 $\text{mgC}\cdot\text{L}^{-1}$ toute l'année avec un maximum de 1.6 $\text{mgC}\cdot\text{L}^{-1}$ en début mai.

La figure 18 permet d'observer la dynamique de la matière organique particulaire (C, N et P) et met en évidence le pic printanier d'activité planctonique. A la différence des années précédentes, les paramètres particuliers n'augmentent pas significativement en automne et laissent suggérer que l'activité phytoplanctonique automnale est faible en 2010.

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 9.7 m le 17 mars à 4.3 m le 29 mars. Le minimum de transparence est observé lors de la campagne du 3 mai avec 2.3 m (figure 12). Ce minimum de transparence correspond à une prédominance de nanophytoplancton (RIMET, 2011).

La photosynthèse produit de l'oxygène dissous et une sursaturation des couches superficielles (figure 14 et 15). Cependant cette année, la sursaturation est modérée par rapport aux années précédentes, avec un maximum de 13.5 $\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ à 7.5 m le 3 mai (en même temps que le minimum de transparence). Ceci est lié à la faible stabilité de l'épilimnion.

Suite à cette activité phytoplanctonique printanière, la phase des eaux claires est visible par une réaugmentation de la transparence le 9 juin avec 10.1 m. Cette phase des eaux claires correspond à la consommation du phytoplancton par le zooplancton (PERGA et LAINE, 2011).

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,...) (figure 16). Il est ainsi possible d'observer l'évolution de cette activité dans les couches superficielles jusqu'à 35 m entre le mois d'avril et le mois de juin. Le maximum observé est alors de 54 $\mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ à 20 m le 17 mai.

La phase des eaux claires, ainsi observée, n'est pas aussi marquée que les années précédentes, car l'activité phytoplanctonique ne reprend pas de manière importante ensuite comme nous pouvons l'observer sur la figure 12. La transparence oscille jusqu'à la fin de l'année entre 5.4 et 11 m.

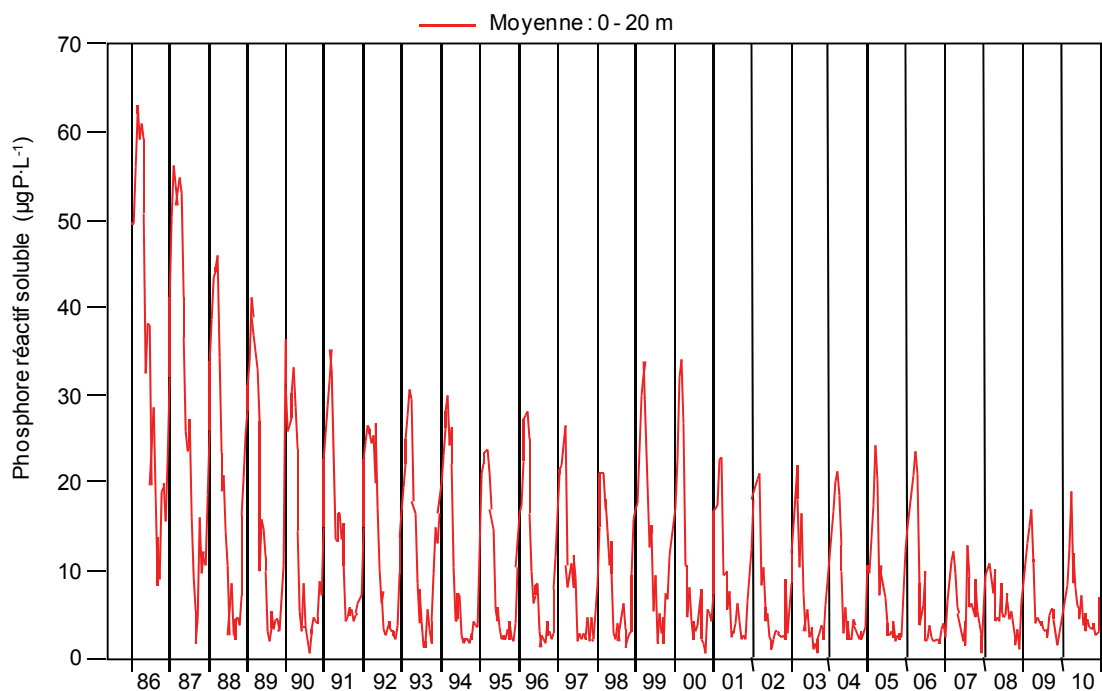


Figure 7 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO_4^{3-}) des eaux de la couche superficielle (moyenne 0-20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 7 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO_4^{3-}) in the water in the surface layers (mean 0-20 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

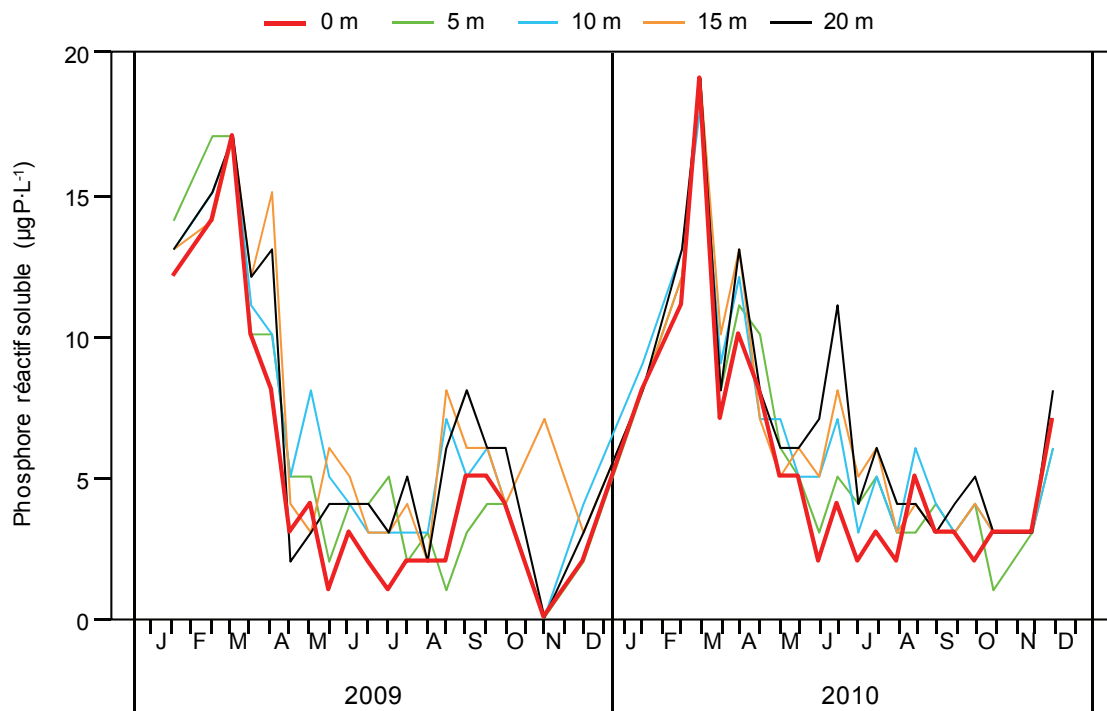


Figure 8 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO_4^{3-}) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 8 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO_4^{3-}) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

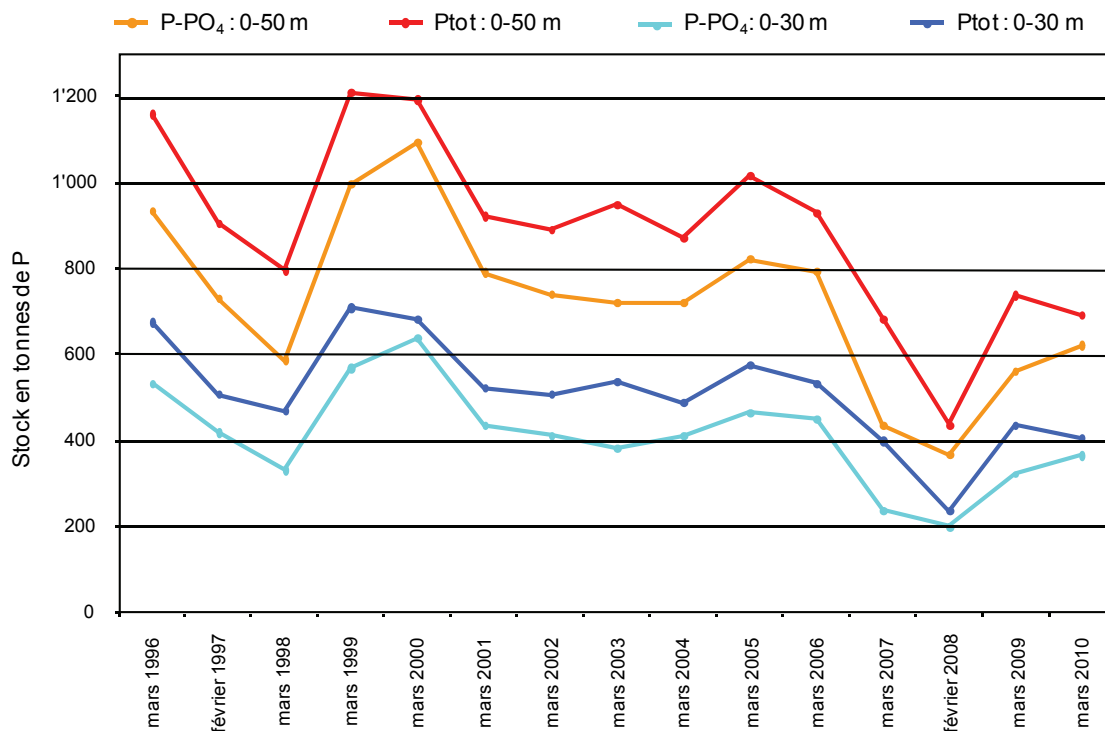


Figure 9 : Stock en phosphore réactif soluble (P-PO₄³⁻) et phosphore total dans les couches 0-30 m et 0-50 m de 1996 à 2010 (Grand Lac – SHL 2) au moment du brassage printanier.

Figure 9 : Stock of soluble reactive phosphorus (P-PO₄³⁻) and total phosphorus (-) in the water in the surface layers (0-30 and 0-50 m) from 1996 to 2010, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2) at the time of the Spring churning.

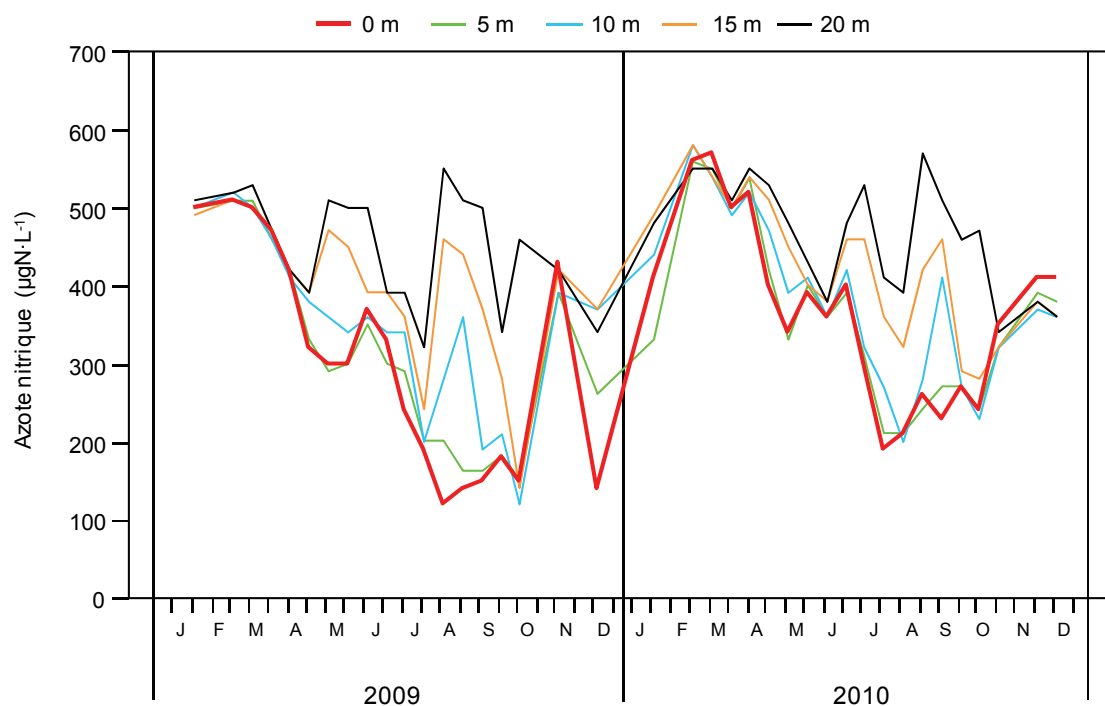


Figure 10 : Concentration en azote nitrique (N-NO₃⁻) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 10 : Concentration of nitrate (N-NO₃⁻) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

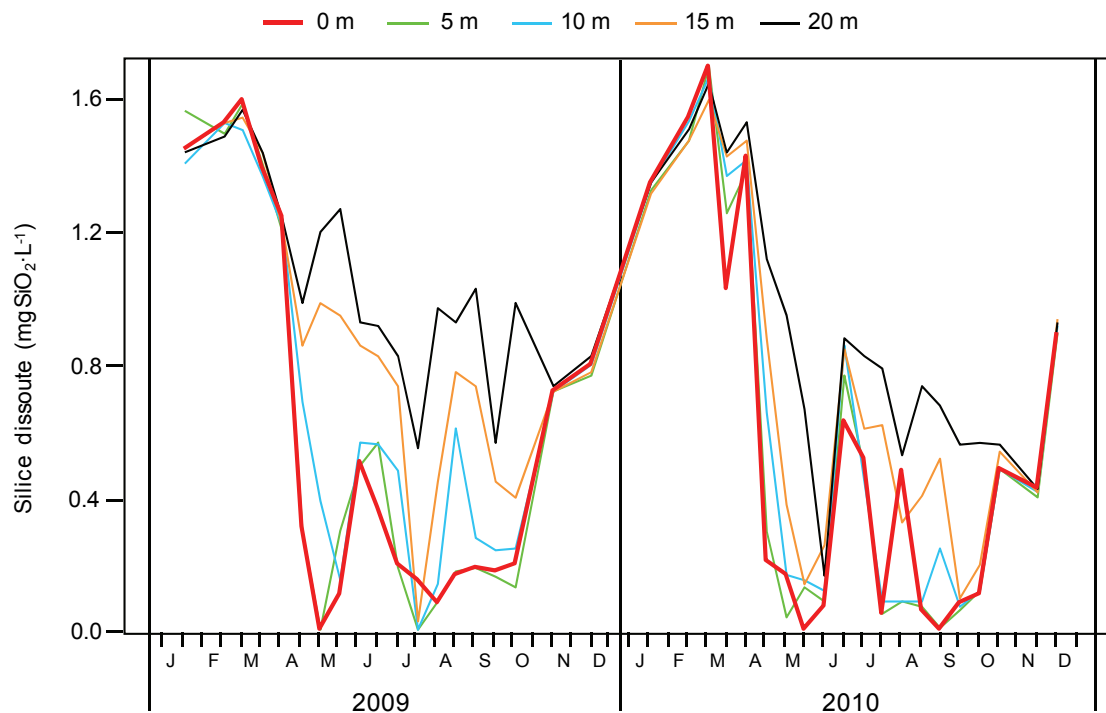


Figure 11 : Concentration en silice dissoute (SiO_2) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 11 : Concentration of dissolved silica (SiO_2) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

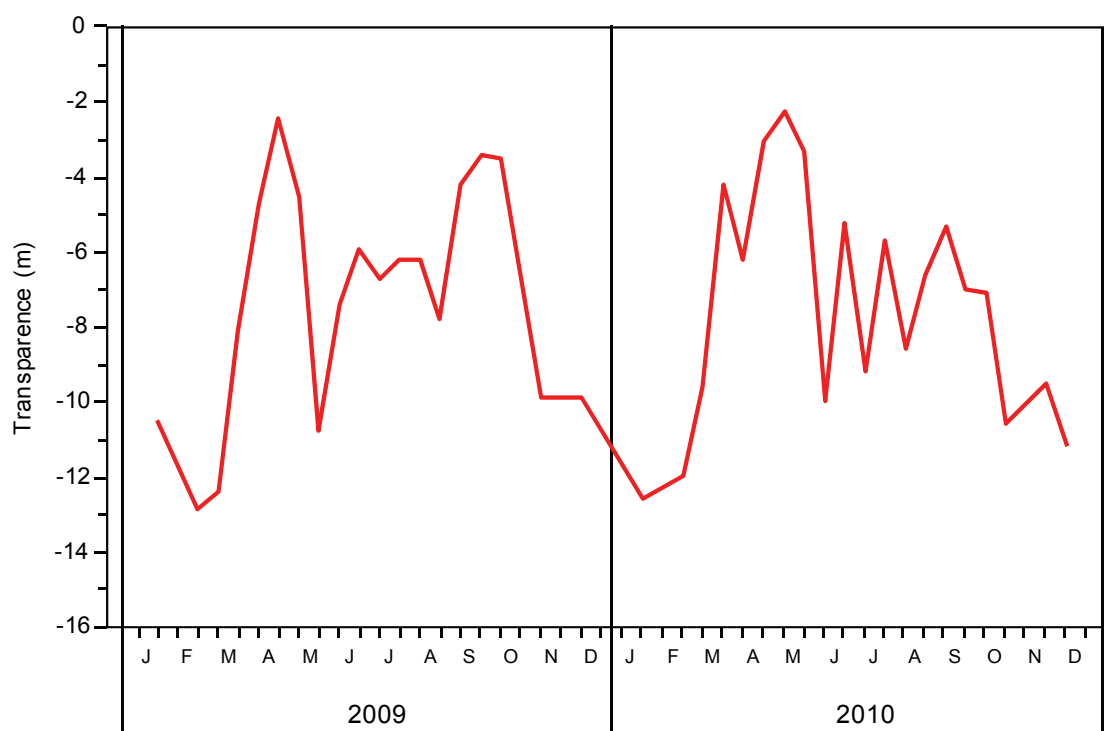


Figure 12 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 12 : Transparency measured using a Secchi disk, Léman - Grand Lac (SHL2).

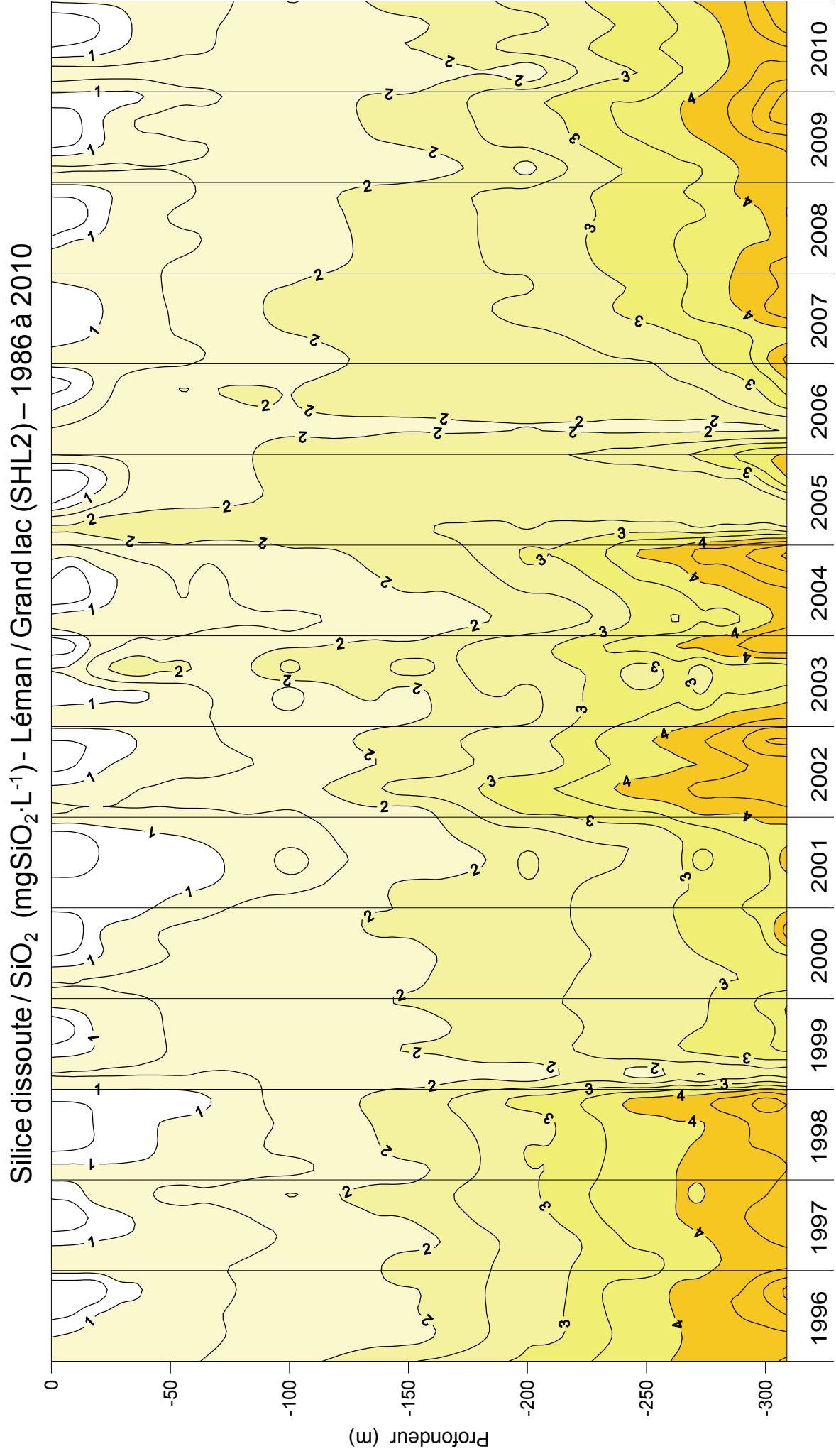


Figure 13 : Concentration en silice dissoute (SiO_2) des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur de 1986 à 2010.
 Figure 13 : Concentration of dissolved silica (SiO_2) in the water of Lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth from 1986 to 2010.

Chlorophylle a (mgChla·m⁻³) - Léman / Grand lac (SHL2) – 1986 à 2010

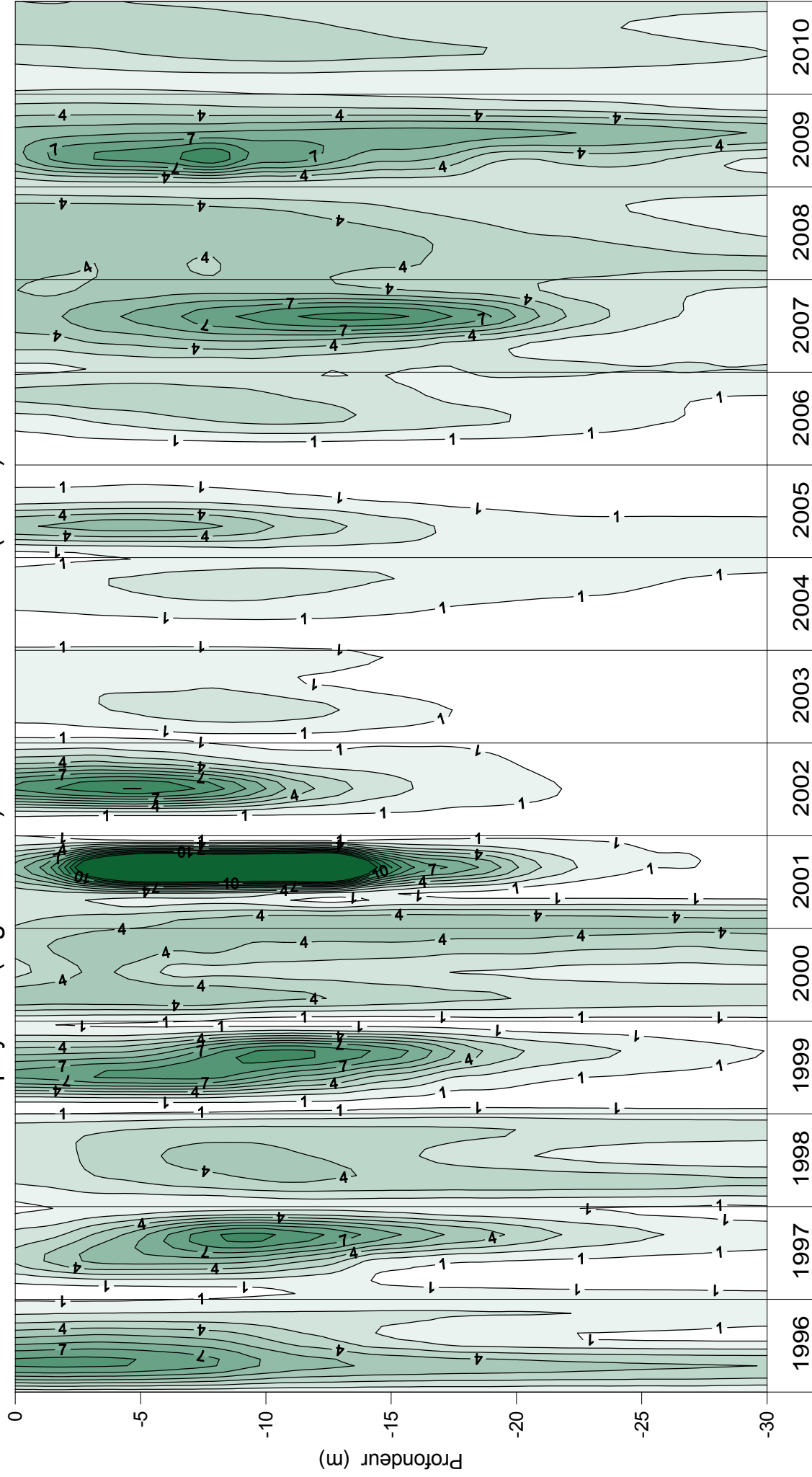


Figure 14 : Concentration en chlorophylle a des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur (0 – 30 m) de 1986 à 2010.
 Figure 14 : Concentration of chlorophyll a in the water of Lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth (0 – 30 m) from 1986 to 2010.

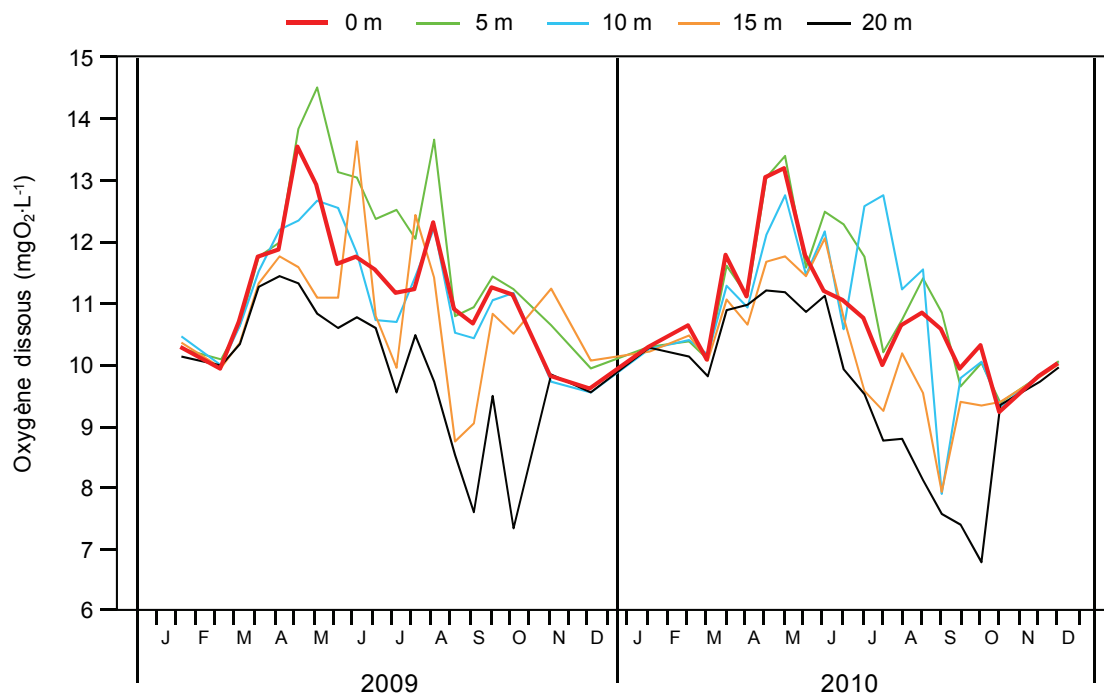


Figure 15 : Concentration en oxygène dissous des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

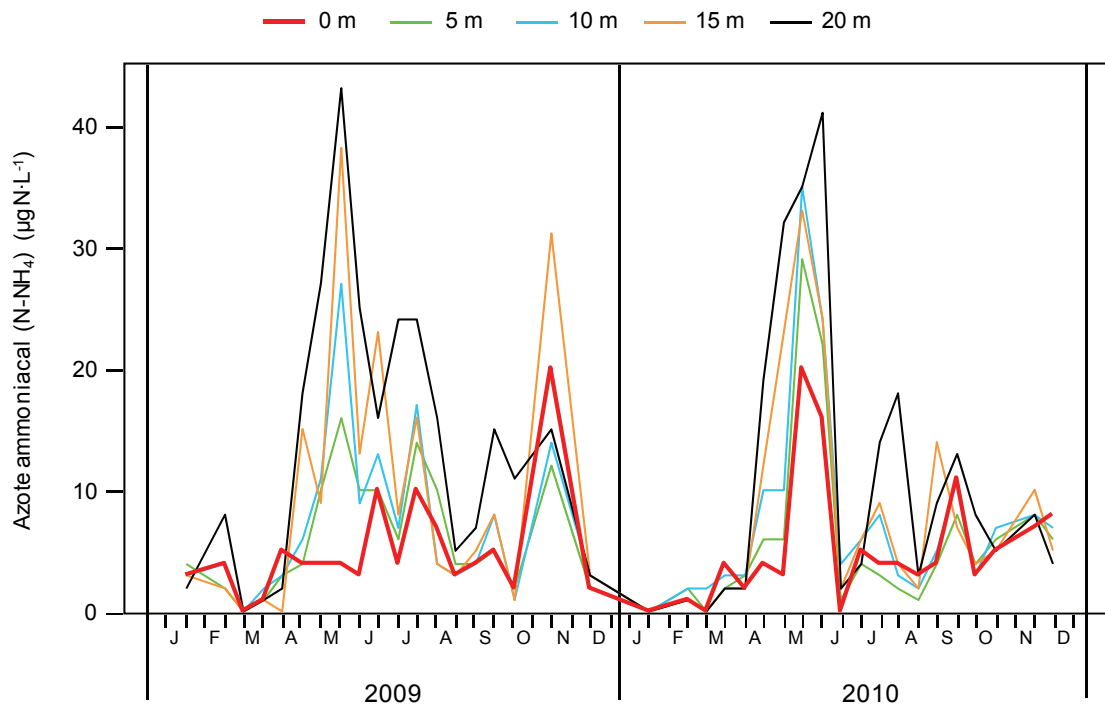


Figure 16 : Concentration en azote ammoniacal des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

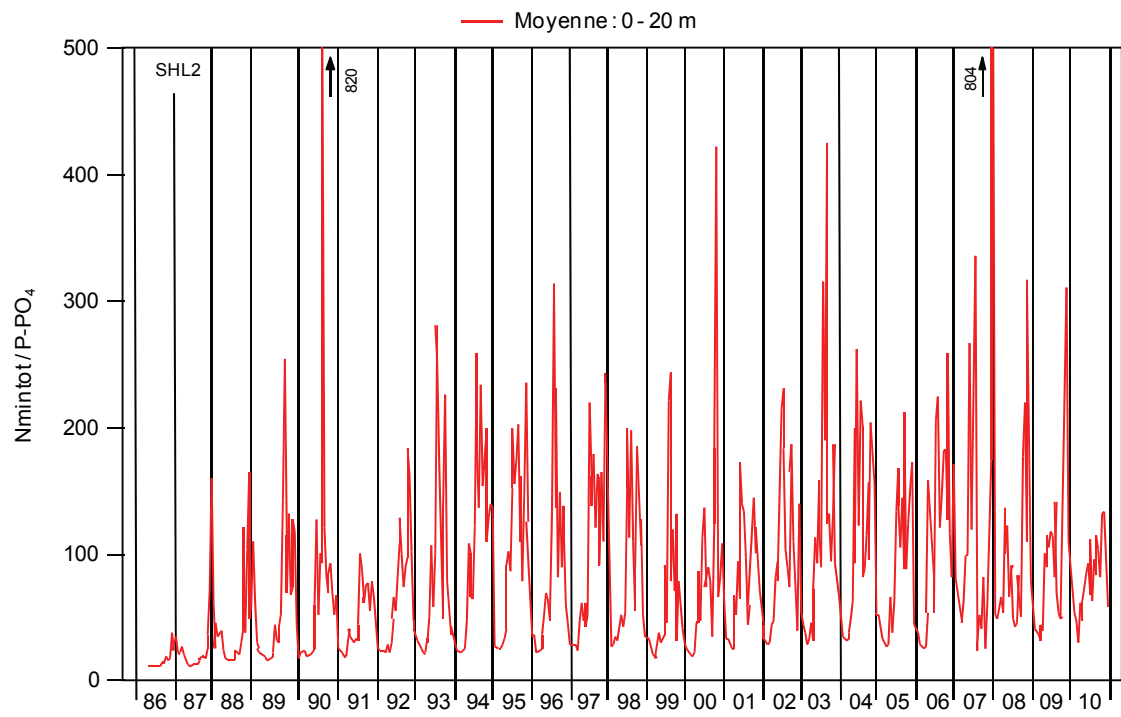


Figure 17 : Rapport Nminéral / P-PO₄, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 17: Nmineral / P-PO₄, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

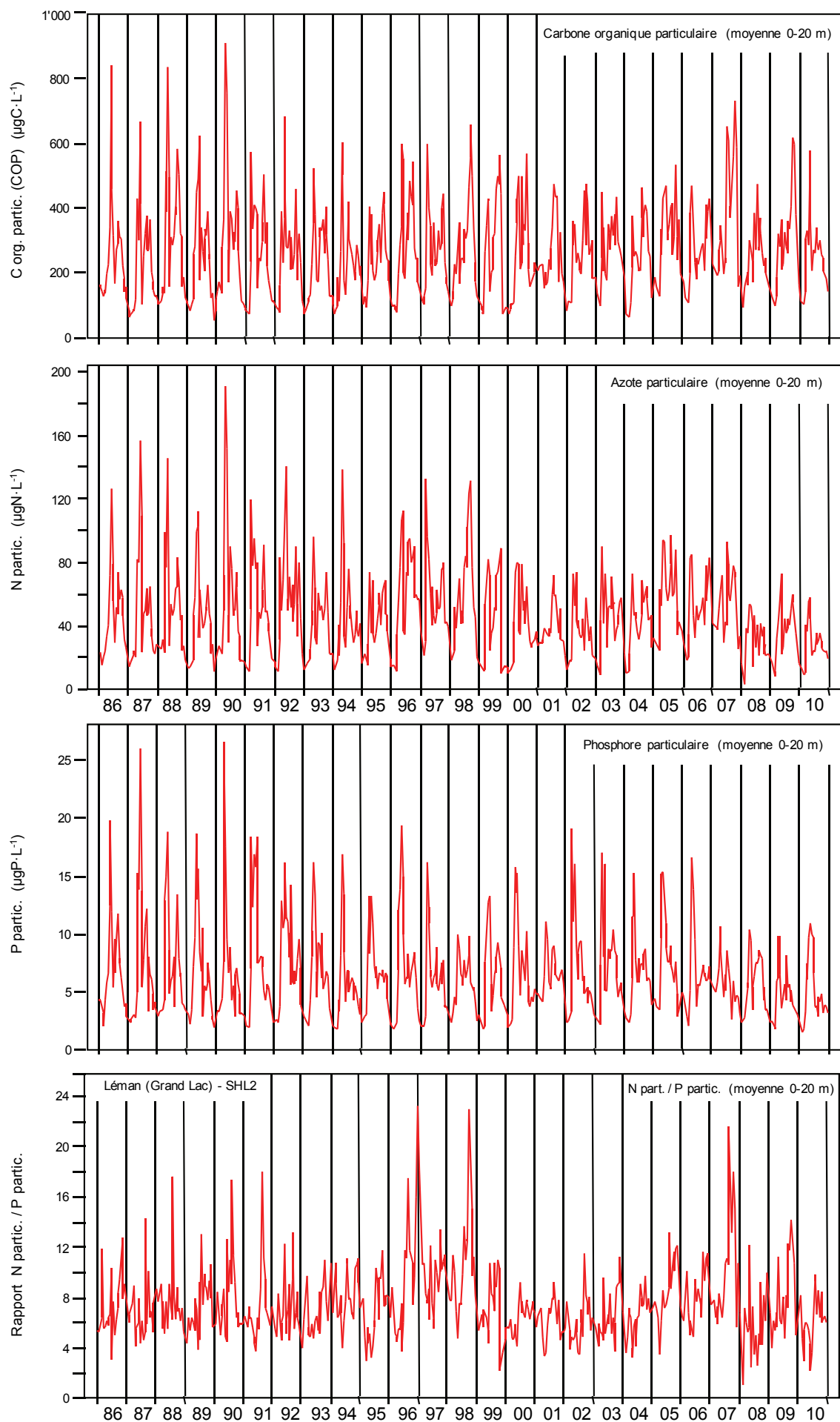


Figure 18: Concentrations en carbone organique, azote et phosphore particulaires des eaux de la couche superficielle (0-20 m) et rapport Nparticulaire / Pparticulaire, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 18: Concentrations of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus in the water in the surface layer (0-20 m) and the Nparticulate / Pparticulate, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

4. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

Le brassage partiel a été du même ordre qu'en 2008 et 2009 et a permis la réoxygénation de la colonne d'eau jusqu'à environ 150 à 200 m de profondeur. Le brassage, quoique partiel, permet la réoxygénation des couches profondes. La concentration atteint $4.69 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ et continue d'augmenter pour atteindre un maximum de $6.26 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ le 13 juillet. 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 $2.78 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ le 29 octobre. 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 21).

A partir du 20 septembre, la concentration des eaux du fond du lac en oxygène dissous est inférieure à $4.0 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ et le reste jusqu'à la fin de l'année (figure 19).

Cette désoxygénation 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 (figure 20) et dans une moindre mesure de silice ; ainsi qu'une augmentation de la turbidité du fait de ce relargage. Cependant en 2010, les relargages de phosphore observés sont minimes et les concentrations en azote ammoniacal au fond du lac sont faibles.

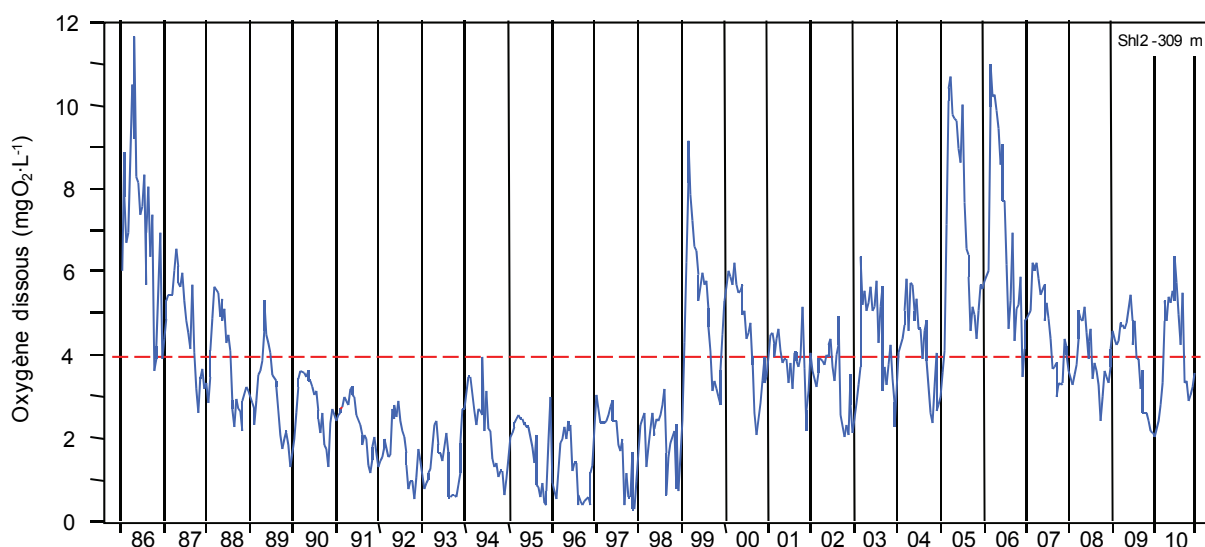


Figure 19 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 19 : Concentration of dissolved oxygen in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

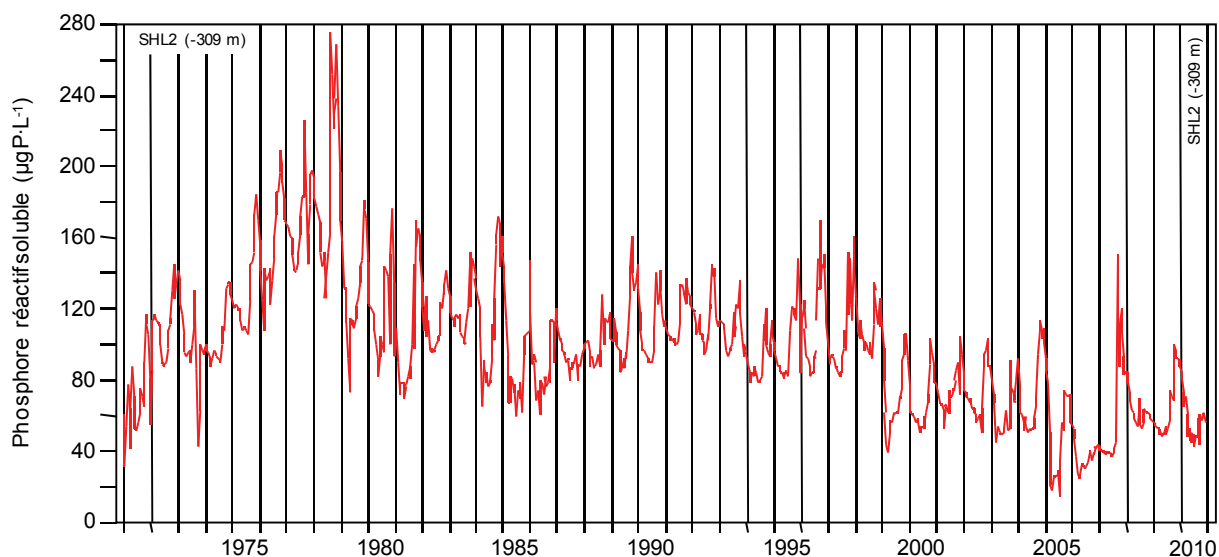


Figure 20 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO_4^{3-}) des eaux du fond à 309 m, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 20 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO_4^{3-}) in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

Oxygène dissous ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) - Léman / Grand lac (SHL2) – 1986 à 2010

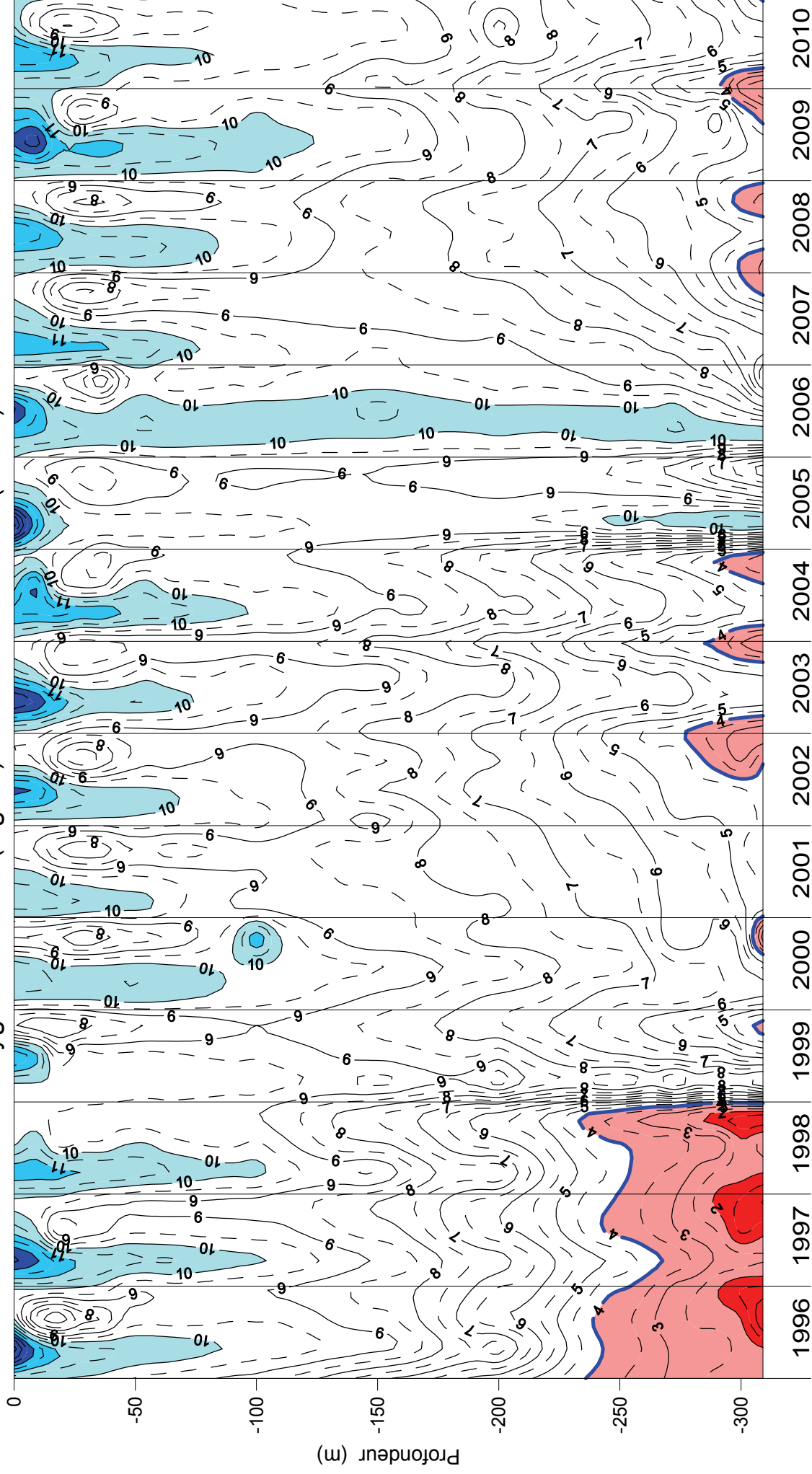


Figure 21 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur de 1986 à 2010.

Figure 21 : Concentration of dissolved oxygen in the water of the lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth from 1986 to 2010.

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

La dynamique de l'année 2010 est proche de celle des années précédentes. On n'observe pas de réoxygénation complète de la colonne d'eau mais une réoxygénation partielle avec le brassage incomplet. Cependant, les eaux du fond subissent une desoxygénation très modérée par rapport aux années précédentes (figure 21). Le minimum atteint est de $2.8 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ le 7 octobre. La figure 23 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.

Sur les figures 19 et 22, 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. »

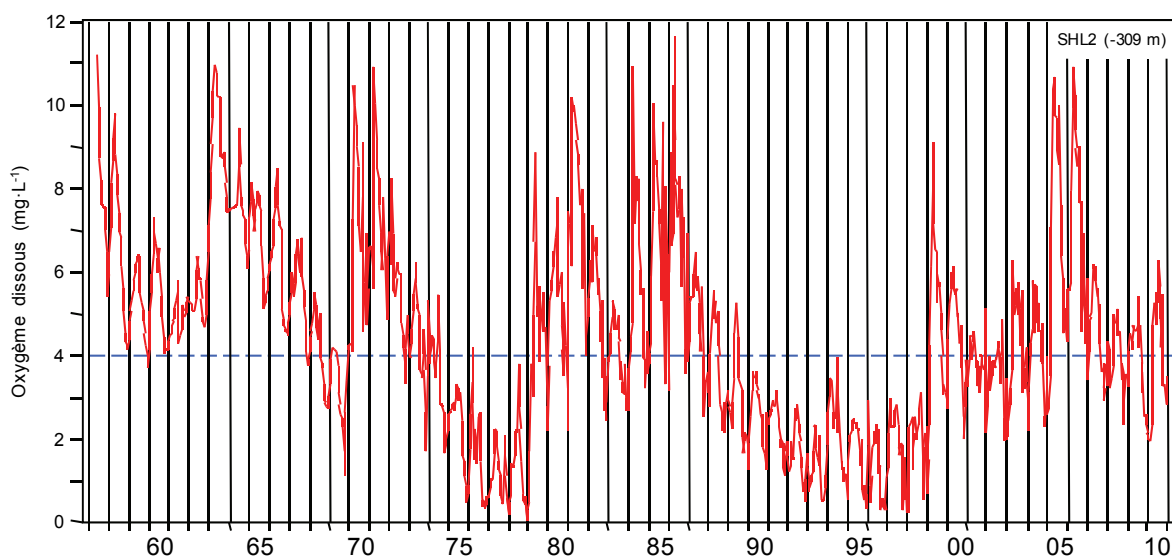


Figure 22 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2) depuis 1957.

Figure 22 : Concentration of dissolved oxygen in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) since 1957.

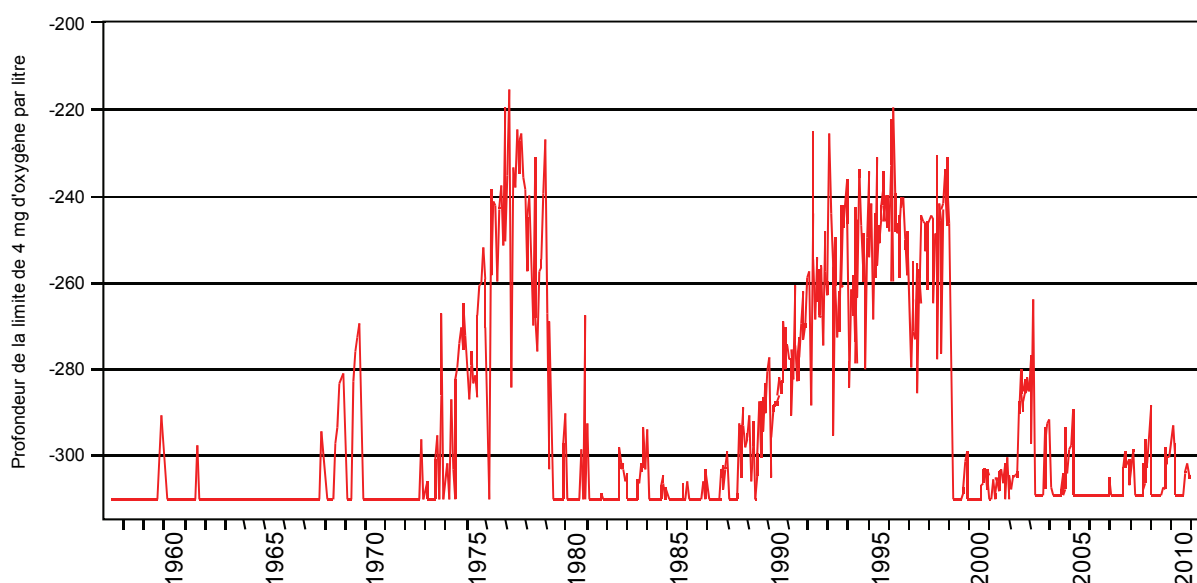


Figure 23 : Evolution de la profondeur de la limite à $4 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ dans le Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 23 : Change in the depth of the $4 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ threshold in lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5.2 Phosphore réactif soluble et phosphore total

Le stock moyen en phosphore total a légèrement diminué par rapport à l'an dernier, soit 1'915 tonnes de P (pour 1'955 tonnes de P en 2009) et une concentration moyenne de $22.4 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ (figure 24).

Le stock en orthophosphate (phosphore réactif soluble) n'a quant à lui pas évolué en 2010 par rapport à 2009 : toujours 1'650 tonnes de P soit $19.3 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

La figure 26 indique l'évolution de la concentration en orthophosphate dans la couche 0-100 m depuis 1996. Cette figure indique un appauvrissement important en phosphate de la zone superficielle à partir du début de l'activité phytoplactonique. Cette dynamique d'appauvrissement s'est accentuée ces dernières années, depuis le dernier brassage complet en 2006.

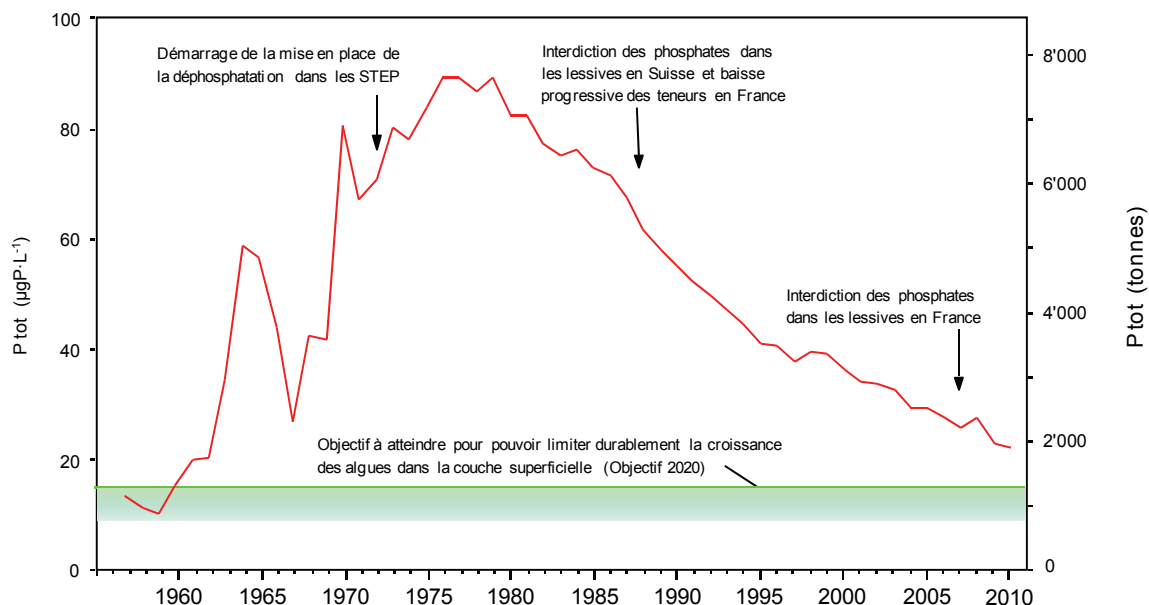


Figure 24 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore total contenu dans le Léman de 1957 à 2010 - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in weighted mean annual total phosphorus concentration and total phosphorus content of the lake Geneva from 1957 to 2010 - Grand Lac (SHL2).

5.3 Transparence

Depuis deux années, la transparence est mesurée simultanément avec deux disques de Secchi : un disque de 30 cm blanc traditionnellement utilisé pour le suivi du Léman et un disque de 20 cm deux quarts blanc et deux quarts noirs (disque utilisé pour les suivis DCE). La comparaison de 31 couples de données indique un écart « robuste » de 20%.

L'évolution de la transparence depuis 1986 est représentée sur la figure 25. La dynamique de l'année 2010 n'est pas habituelle : le début de la période d'eaux claires est marqué, mais le pic automnal d'activité planctonique n'est pas très important (figure 12). Après la chute de transparence due au pic printanier d'activité planctonique, la transparence oscille entre 5 et 10 m jusqu'à la fin de l'année.

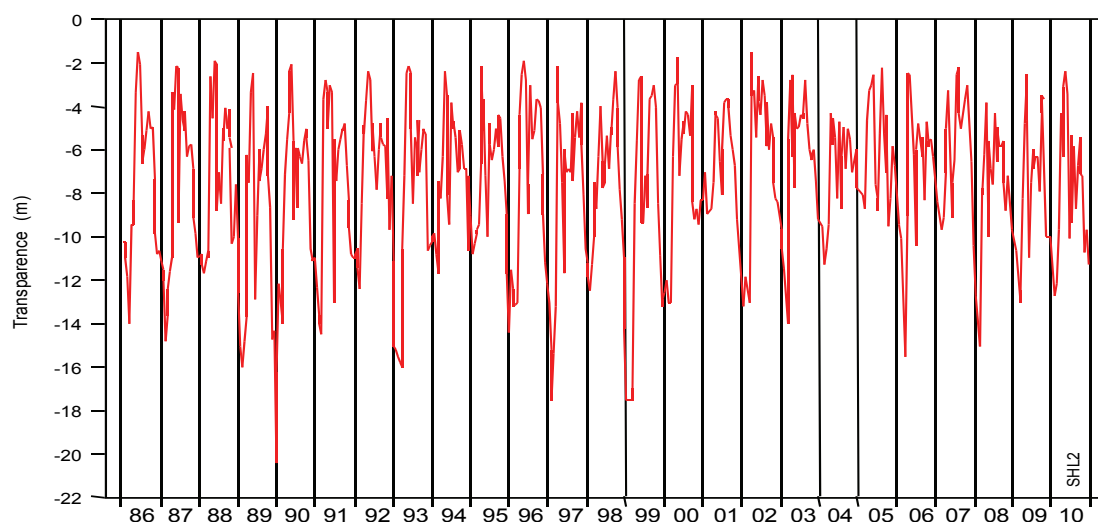


Figure 25 : Evolution de la transparence mesurée avec le disque de Secchi de 1986 à 2010, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 25 : Change in the transparency measured using a Secchi disk from 1986 to 2010, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

Phosphore réactif soluble / P-PO₄ (µgP·L⁻¹) - Léman / Grand lac (SHL2) – 1986 à 2010

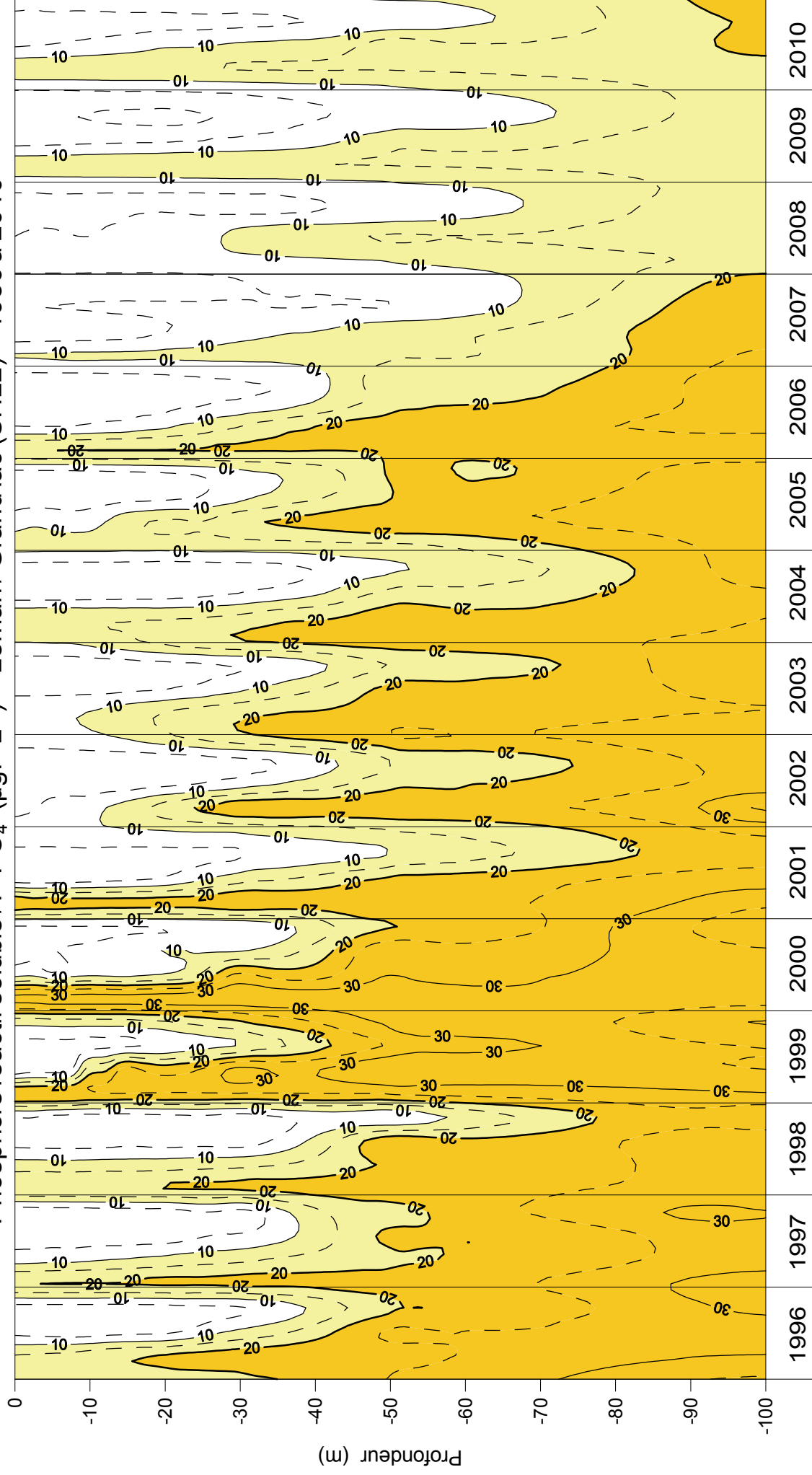


Figure 26 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO₄³⁻) dans les différentes couches du Léman (SHL2) (zone jaune foncée = concentration supérieure à 20 µgP·L⁻¹; zone jaune claire = concentration entre 10 et 20 µgP·L⁻¹) de 1986 à 2010.

Figure 26 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO₄³⁻) in the various layers of Lake Geneva (SHL2) (zone shaded dark yellow = concentration > 20 µgP·L⁻¹; zone shaded light yellow = concentration between 10 and 20 µgP·L⁻¹) from 1986 to 2010.

5.4 Azote nitrique et azote total

Les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique diminuent par rapport aux années précédentes. En 2010, la concentration moyenne en azote total est de $0.63 \text{ mgN}\cdot\text{L}^{-1}$, soit un stock de 53'710 tonnes de N. La concentration moyenne en azote nitrique est de $0.50 \text{ mgN}\cdot\text{L}^{-1}$, soit $2.18 \text{ mgNO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ (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 27).

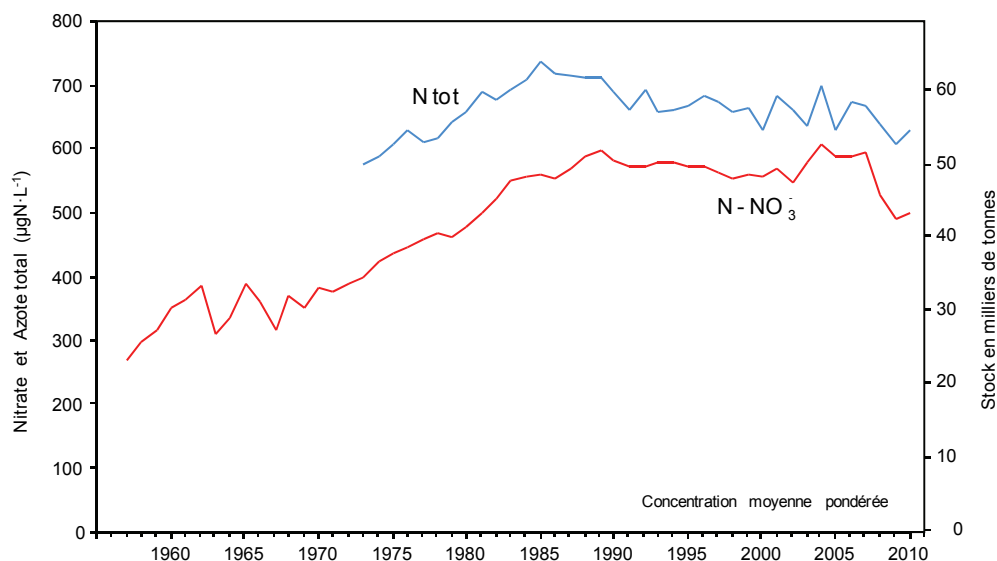


Figure 27 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique contenus dans le Léman de 1957 à 2010, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 27 : 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 2010, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5.5 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 en 2010, le stock en chlorure augmente et atteint 784'240 tonnes soit $9.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, contre $8.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en 2009 (figure 28). La concentration moyenne des apports, $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ cette année (RAPIN et KLEIN, 2011), se rapproche de la concentration moyenne du lac. Si les apports n'évoluent pas de manière importante, la concentration moyenne du lac s'approchera progressivement de 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.

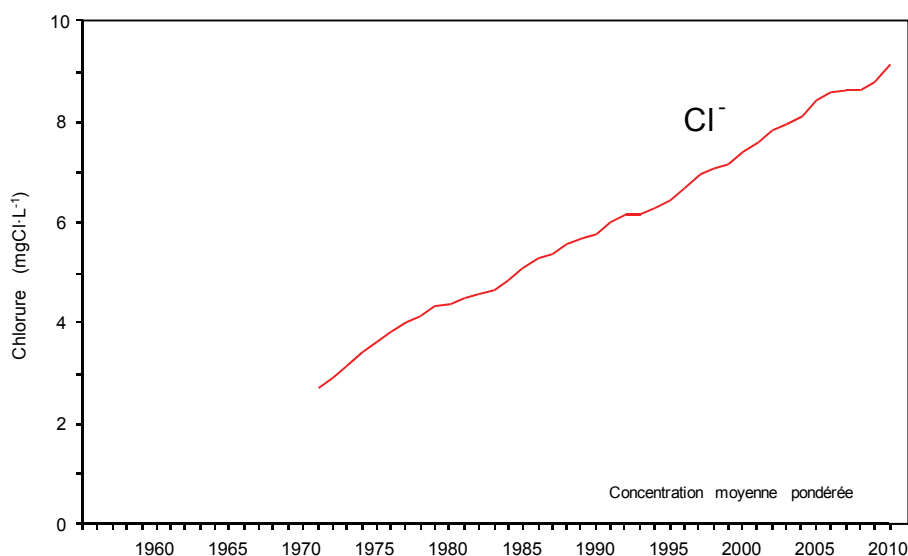


Figure 28 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée en chlorure, pondérée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2010, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 28 : Change in the weighted mean annual concentration of chloride in the entire mass of the water of the lake from 1971 to 2010, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

6. ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU PETIT LAC 2006 - 2010

Les prélèvements sont effectués à la station GE3 (figure 1). Les concentrations moyennes pondérées et les stocks sont calculés suivant la même méthode que pour le Grand Lac. Les résultats sont présentés dans les tableaux 2 et 3.

6.1 Température

Les figures 29 et 30 montrent que, contrairement au Grand Lac, l'homogénéisation thermique des eaux s'effectue chaque année.

La température la plus élevée a été mesurée en surface en juillet 2006 (26.6°C), il s'agit du maximum enregistré en 24 ans. La tendance à la croissance des températures est significative.

La température moyenne annuelle pondérée est plus élevée que dans le Grand Lac, elle varie entre 8.8°C en 2006 et 9.8°C en 2007. Cette différence s'explique par la grande différence de profondeur entre le Petit et le Grand Lac.

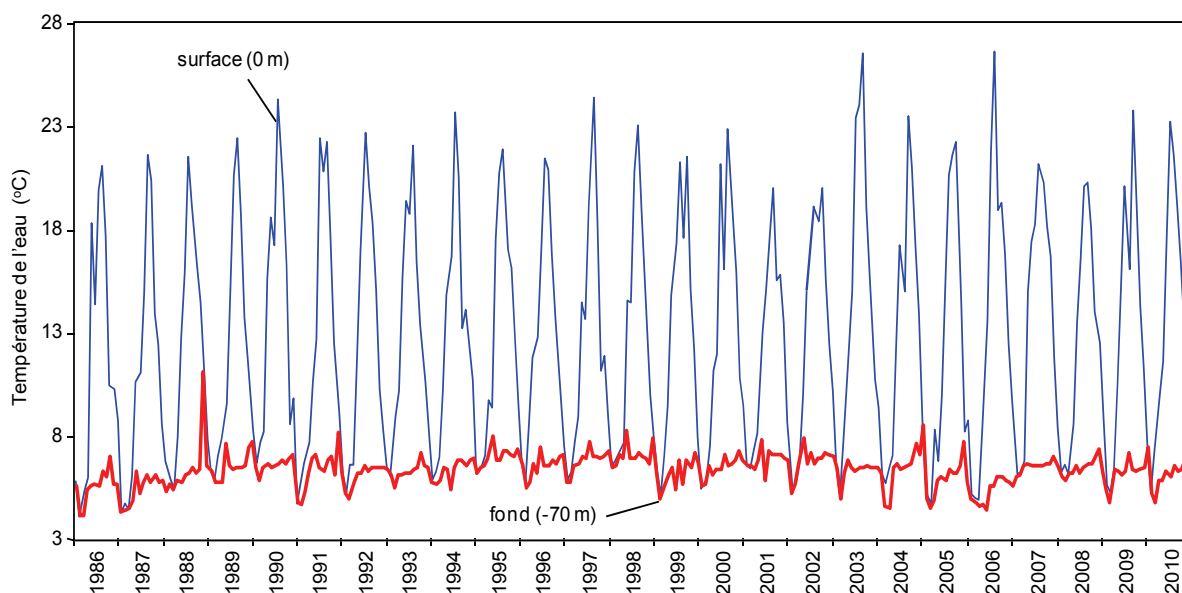


Figure 29 : Évolution de la température des eaux de surface (0 m) et au fond (-70 m), Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 29 : Change in the water temperature in the surface layer (0 m) and at the bottom (-70 m), Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

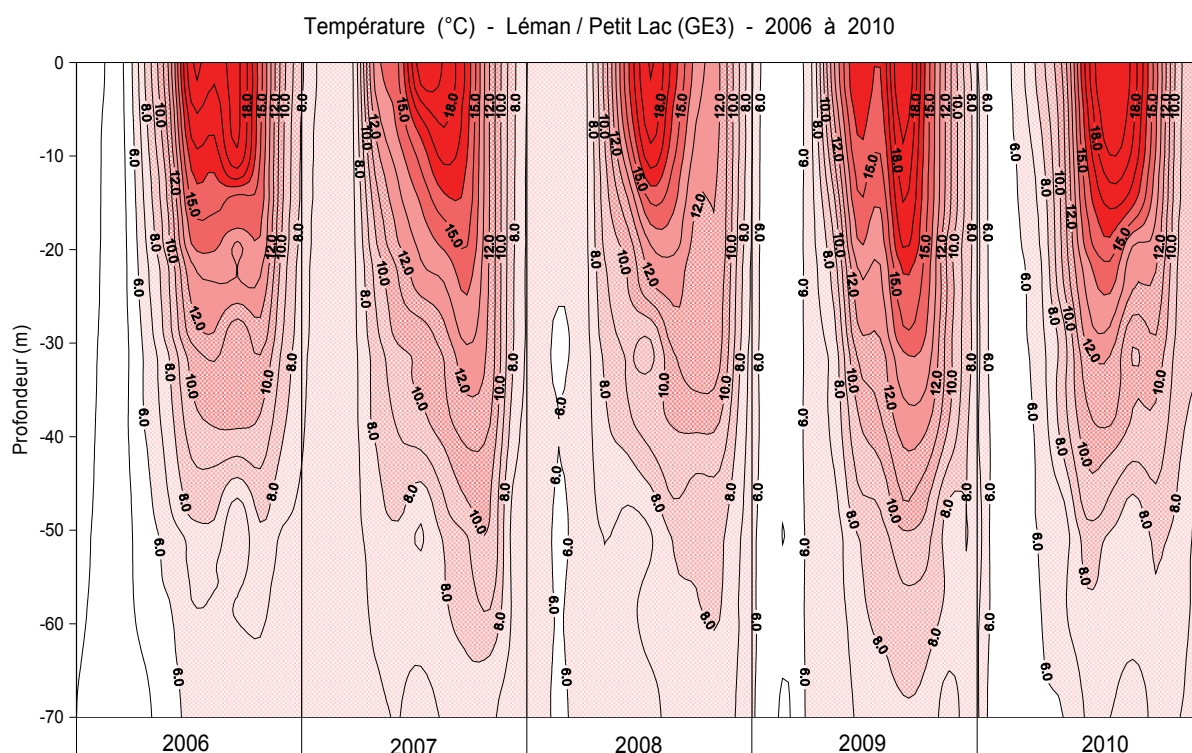


Figure 30 : Température des les eaux du Léman - Petit Lac (GE3) en fonction de la profondeur.

Figure 30 : Water temperature in Lake Geneva (Petit Lac – GE3) as a function of depth.

6.2 Oxygène dissous

Contrairement à celles du Grand Lac, les eaux du Petit Lac s'homogénéisent chaque année (figure 31) et présentent toujours des teneurs en oxygène dissous très supérieures à l'exigence suisse pour les eaux des lacs (minimum de $6.9 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ par rapport aux $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ exigés dans l'Ordonnance suisse du 28 octobre 1998, OEaux).

On notera les concentrations élevées d'oxygène en début d'année. Ce phénomène est lié, dans un premier temps, au refroidissement des eaux de surface puis à l'activité photosynthétique des organismes. Il est visible même en profondeur jusqu'à 30 m voire jusqu'au fond. Durant la seconde partie de l'année, une stratification thermique s'installe, on observe alors une diminution nette de l'oxygène dans les couches de surface, notamment associée à l'augmentation de la température de l'eau et à la minéralisation de la matière organique.

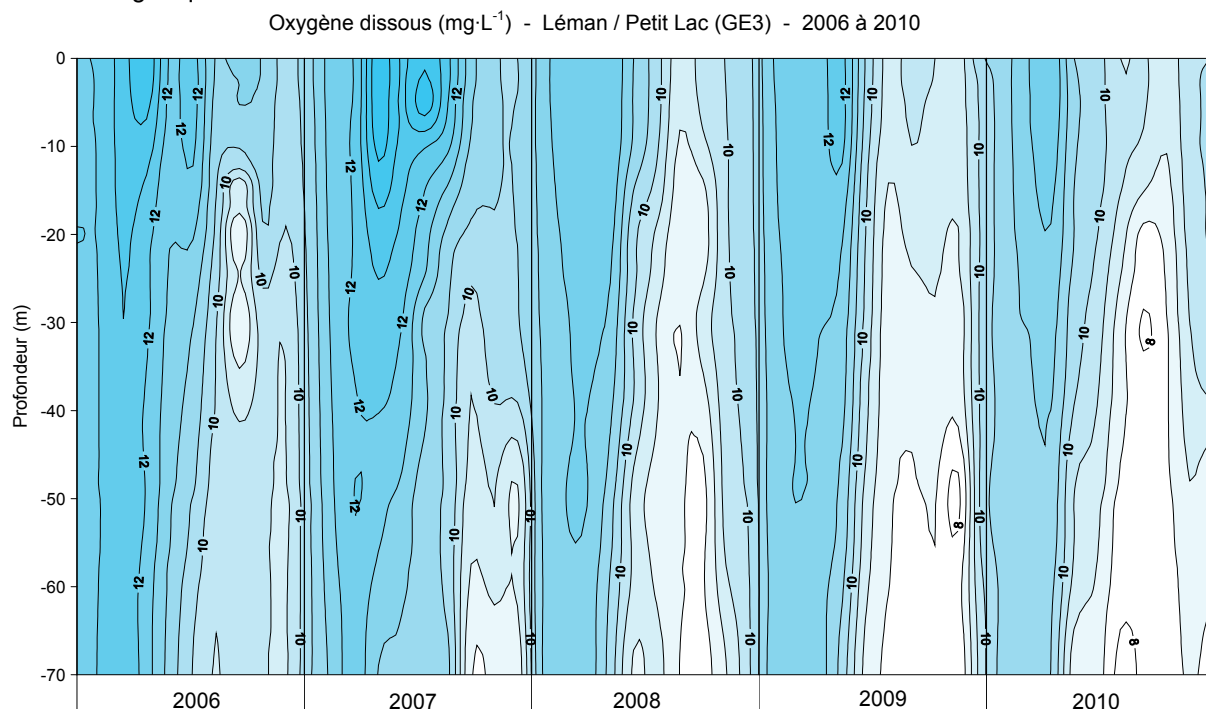


Figure 31 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman - Petit Lac (GE3) en fonction de la profondeur.

Figure 31 : Concentration of dissolved oxygen in the water of Lake Geneva (Petit Lac - GE3) as a function of depth.

6.3 Phosphore total et phosphore réactif soluble

Les figures 32 et 33 montrent clairement que la zone à faible teneur en phosphore a tendance à s'enfoncer au cours de ces dernières années. La baisse régulière des teneurs en phosphore entre 1985 et 1995 (figure 34) s'est stabilisée depuis les années 95. Les concentrations en phosphore réactif soluble oscillent autour de $10 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ entre 1995 et 2010 et pour le phosphore total autour de 15 à $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.

Globalement, la baisse des concentrations moyennes pondérées de phosphore dans le Petit Lac tend à s'équilibrer après une diminution de 77% depuis 1986 pour le phosphore total et de 84% pour l'orthophosphate (tableau 2 et figure 34).

Tableau 2: Concentrations et rapports des différentes formes du phosphore dans les couches de surface (moyenne de 0 à 20 m) et du fond (-70 m) du Petit Lac (GE 3).

Table 2 : Concentration of forms phosphorus and the relationship between P-PO₄ and Ptot in the water of Lake Geneva (Petit Lac - GE3).

Années	P-PO ₄ 0-20m $\mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$	Ptot 0-20m $\mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$	P-PO ₄ /Ptot surf %	P-PO ₄ fond $\mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$	Ptot fond $\mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$	P-PO ₄ /Ptot fond %
2001	3.2	16.9	19.0	25.8	37.6	68.5
2002	3.7	15.9	23.2	18.5	32.3	57.3
2003	4.9	18.9	25.9	22.9	33.3	68.9
2004	6.9	18.0	38.6	23.6	30.0	78.7
2005	6.3	16.0	39.6	25.3	32.4	78.1
2006	4.2	16.0	26.3	28.3	35.7	79.2
2007	7.6	14.5	52.6	23.0	27.8	82.6
2008	4.8	10.9	44.1	15.4	18.9	81.5
2009	5.2	12.3	42.5	15.0	20.8	72.0
2010	5.1	11.9	42.7	15.8	21.5	73.5

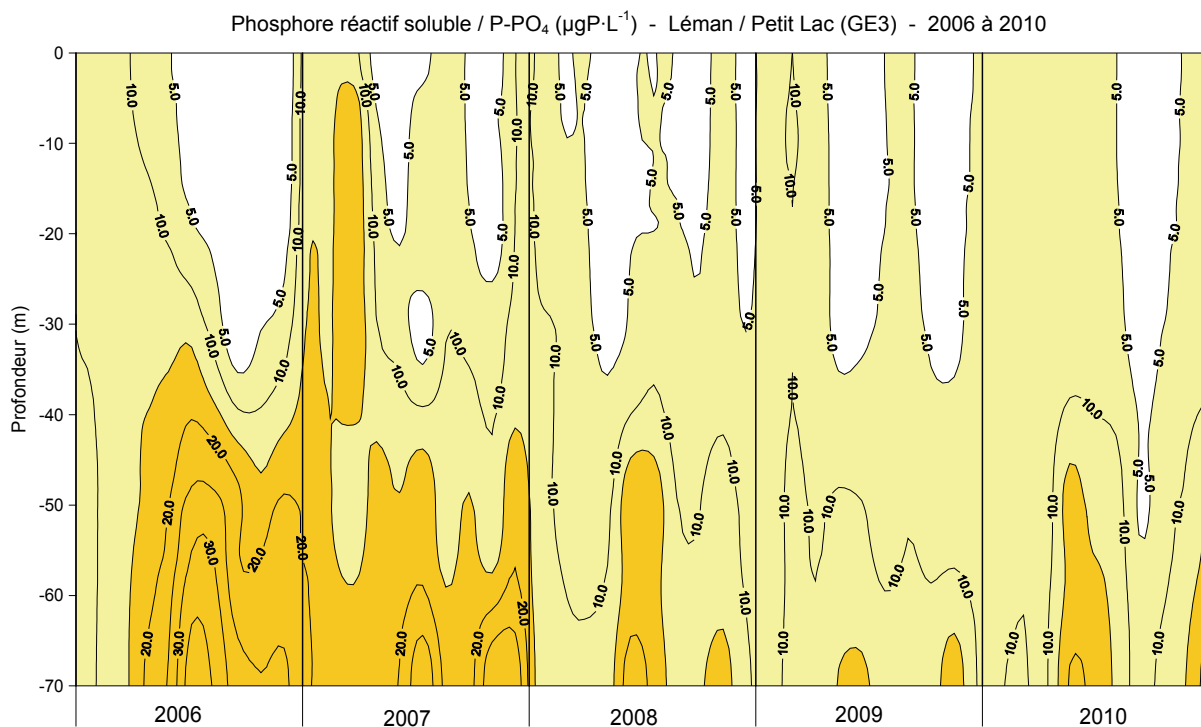


Figure 32 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO₄³⁻) des eaux du Léman - Petit Lac (GE3) en fonction de la profondeur.

Figure 32 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO₄³⁻) in the water of Lake Geneva (Petit Lac - GE3) as a function of depth.

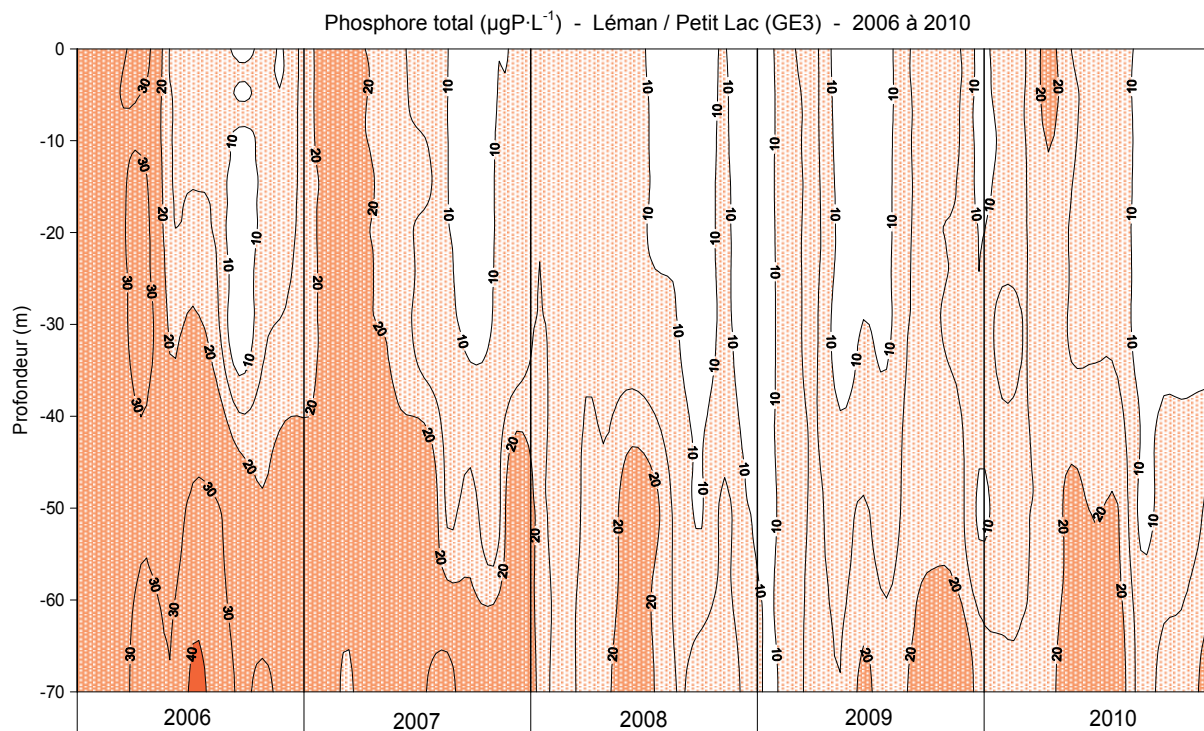


Figure 33 : Concentration en phosphore total des eaux du Léman - Petit Lac (GE3) en fonction de la profondeur.

Figure 33 : Concentration of total phosphorus in the water of Lake Geneva (Petit Lac - GE3) as a function of depth.

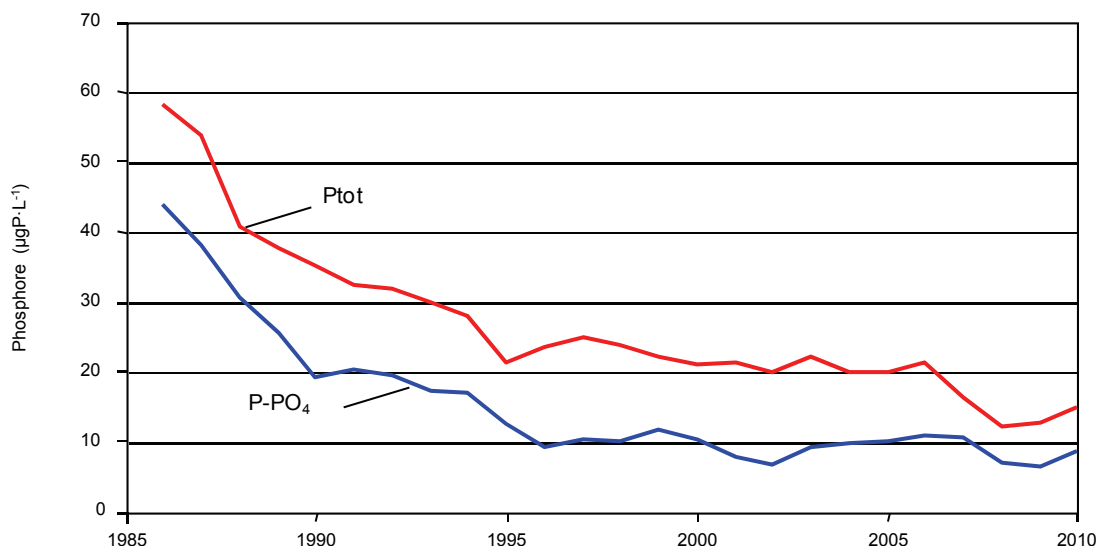


Figure 34 : Evolution de concentration moyenne annuelle pondérée des formes du phosphore dans les eaux du Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 34 : Change in weighted mean annual phosphorus concentration of the Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

Les concentrations, en début d'année, de l'orthophosphate (phosphore réactif soluble - forme disponible pour les algues) sont légèrement inférieures à $10 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ depuis 2008 alors qu'elles atteignaient un maximum de $27 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ en janvier 2007, suite au brassage complet dans le Grand Lac en 2006. On notera, par contre, que les périodes où le phosphore est presque entièrement épuisé sont de moins en moins fréquentes. L'influence des organismes se fait sentir jusqu'à 30 m depuis 2008 (figures 35). L'année 2007 apparaît donc comme charnière pour la qualité des eaux.

Dans le tableau 2, nous présentons les concentrations et rapports des différentes formes du phosphore dans les couches de surface (0 à 20 m) et au fond (-70 m). En surface, la part de l'orthophosphate augmente par rapport au phosphore total depuis 2007 où le PO_4 avait subitement augmenté. Ainsi, c'est la brutale diminution des concentrations en phosphore total qui explique la variation du rapport. A moins 70 m, les concentrations sont stabilisées et le rapport phosphore réactif soluble / phosphore total reste relativement constant au cours des années, il varie entre 60 et 80%.

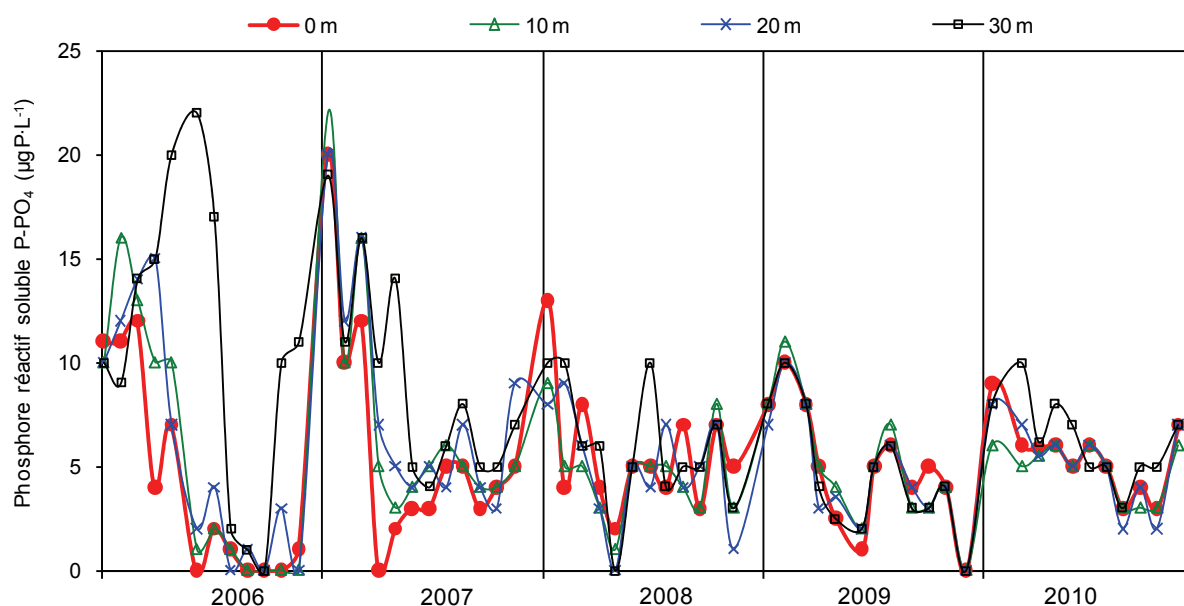


Figure 35 : Concentration en phosphore réactif soluble (P-PO_4^{3-}) des eaux des couches superficielles (0, 10, 20 et 30 m), Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 35 : Concentration of soluble reactive phosphorus (P-PO_4^{3-}) in the water in the surface layers (0, 10, 20 and 30 m), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

6.4 Azote nitrique, total et ammoniacal

Le stock d'azote nitrique dans le Petit Lac a peu évolué au cours des ces cinq dernières années (Tableau 5) : avec un minimum de 1'574 tonnes en 2007 et un maximum de 1'720 tonnes en 2008 (1'659 t en 2010).

On n'observe plus de consommation quasi totale de l'azote par les organismes planctoniques dans les couches superficielles (figure 36) comme dans les années 90 et de 2000 à 2005. Le phosphore est donc bien le nutriment limitant.

Le stock d'azote total est relativement stable (Tableau 5). Le stock d'azote ammoniacal reste lui très variable, mais ce paramètre présente des variations très rapides par rapport au pas de temps de nos mesures, il est donc très difficile de l'interpréter (Tableau 5).

Dans l'optique d'une limitation de la croissance planctonique le rapport N/P demeure particulièrement intéressant à considérer. Nous présentons dans le Tableau 3 ce rapport annuel moyen en surface (0-20m) et au fond (70m). Il varie fortement en fonction de l'activité biologique au cours de l'année, en particulier en été et automne, l'interprétation de ce rapport est faite dans la partie biologie. On notera que ce rapport a diminué fortement en 2006 puis est remonté depuis 2007 en raison de la diminution du phosphore.

Tableau 3: Rapport des concentrations annuelles moyennes pondérées de l'azote total et du phosphore total en surface (0-20m) et au fond (70m).

Table 3 : Ratio of the mean annual weighted concentrations of total nitrogen and total phosphorus at the surface (0-20 m) and at the bottom (70m).

Années	N/P 0-20 m	N/P fond
2001	35	18
2002	36	22
2003	31	21
2004	35	24
2005	39	23
2006	12	20
2007	41	23
2008	47	31
2009	24	30
2010	47	30

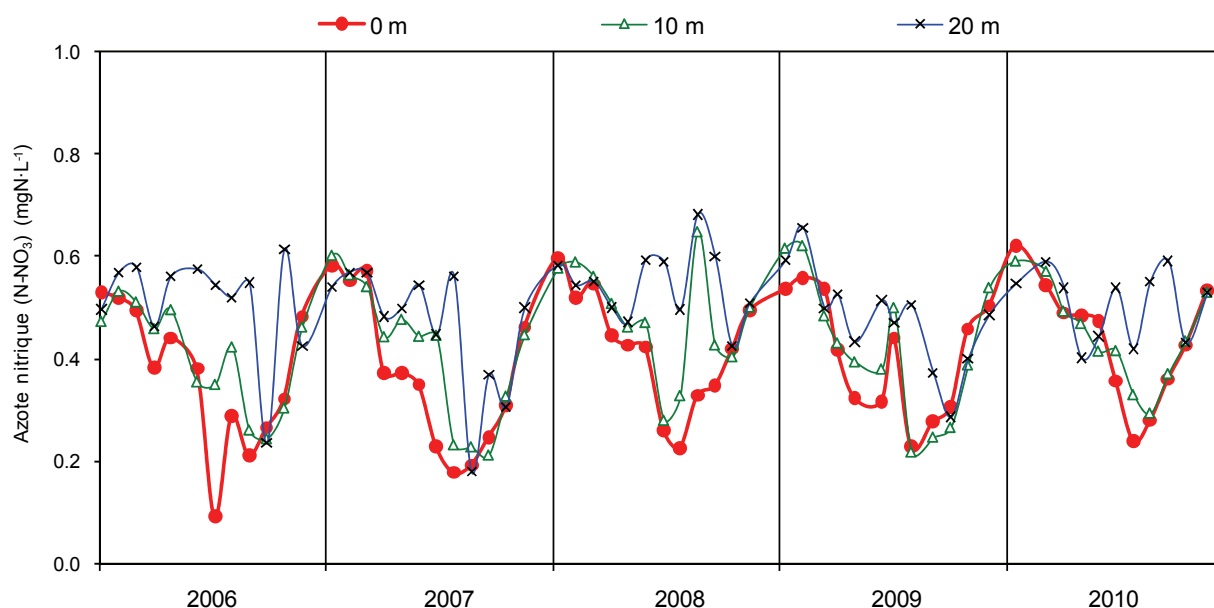


Figure 36 : Concentration en azote nitrique (N-NO_3^-) des eaux des couches superficielles (0, 10 et 20 m), Léman – Petit Lac (GE3).

Figure 36 : Concentration of nitrate (N-NO_3^-) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva – Petit Lac (GE3).

6.5 Chlorure et autres paramètres

L'évolution des concentrations moyennes pondérées en chlorure du Petit Lac (tableaux 4 et 5) suit celle du Grand Lac.

L'évolution des concentrations en surface et fond de la silice dissoute et du carbone organique dissous (COD) sont présentées aux figures 37 et 38. On observe la diminution des concentrations en silice en surface comme au fond. En surface, les chutes de concentrations se situent en été, mais peuvent durer loin dans l'automne comme en 2010 (figure 37). Ceci est lié à la dynamique des populations d'organismes planctoniques utilisant la silice, les diatomées en particulier (voir partie biologique). La dynamique de la silice au fond a changé par rapport aux années précédentes ; en effet, on n'observe plus de reminéralisation en seconde partie d'année depuis 2008.

Le carbone organique dissous est stable au fond. En surface, on note l'apparition d'un pic de concentration en fin d'année associé au pic automnal de l'activité planctonique (LAZZAROTTO *et al.*, 2006) (figure 38).

Pour ces deux paramètres, les moyennes pondérées sur toute l'année présentent peu de variations ces dernières années (Tableaux 4 et 5).

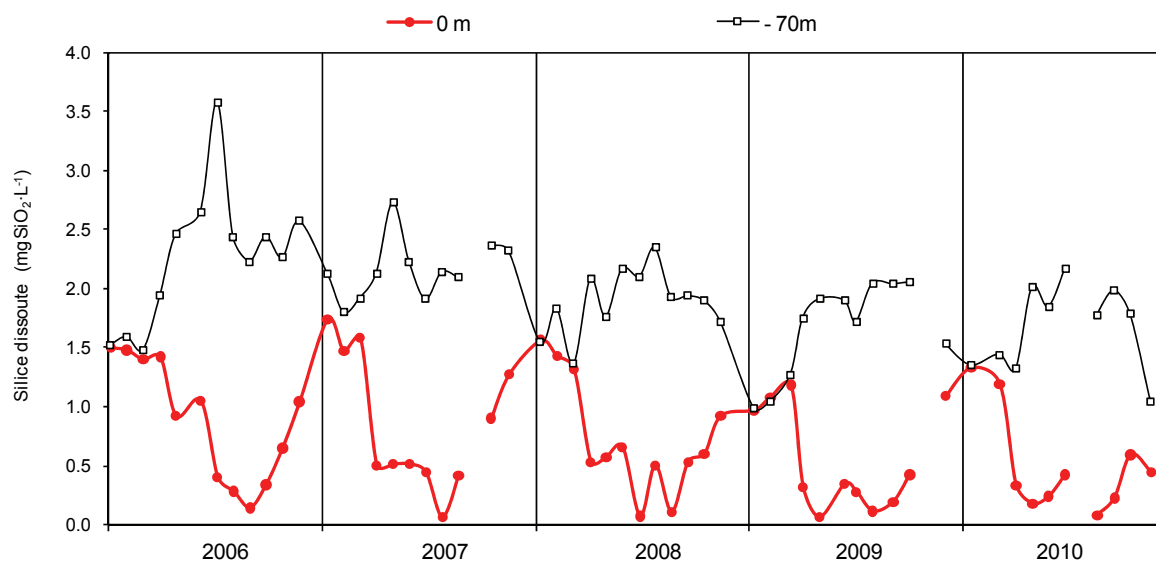


Figure 37 : Concentration en silice dissoute (SiO₂) des eaux des couches superficielles (0 m) et au fond (-70 m), Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 37 : Concentration of dissolved silica (SiO₂) in the water in the surface layers (0 m) and at the bottom (-70 m), Lake Geneva - Petit Lac (SHL2).

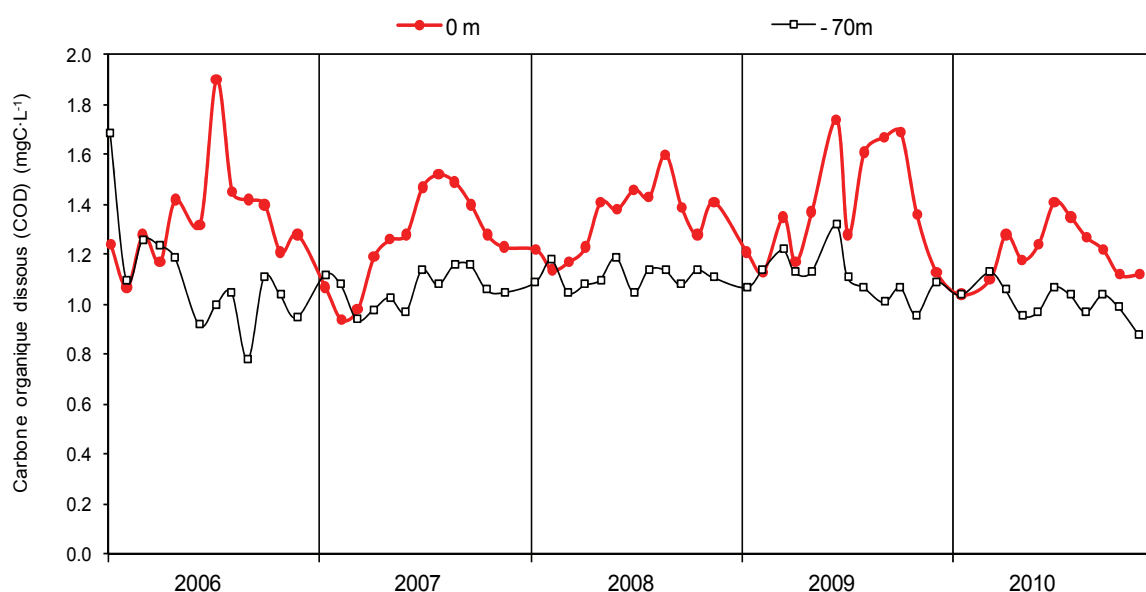


Figure 38 : Concentration en carbone organique dissous (COD) des eaux des couches superficielles (0 m) et au fond (-70 m), Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 38 : Concentration of dissolved organic carbon (DOC) in the water in the surface layers (0 m) and at the bottom (-70 m), Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

7. CONCLUSIONS

Les principales observations en 2010 sont :

– **Pour le Grand Lac :**

- Le brassage de l'hiver 2009 - 2010 a été partiel et a atteint environ 200 m.
- Les consommations des ions orthophosphate (phosphore réactif soluble) et silice sont très importantes dès le mois de mars et continuent toute l'année jusqu'à un état de trace dans les couches épilimniques.
- L'activité phytoplanctonique automnale est faible et ne provoque pas de chute importante de la transparence.
- La réoxygénation des eaux du fond du lac est faible en 2010, mais les phénomènes de relargage du phosphore et de réduction de l'azote ont été limités.

– **Pour le Petit Lac :**

- Par rapport aux années précédentes, l'activité phytoplanctonique automnale est significativement plus importante durant ce quinquennat.
- Le Petit Lac est homogénéisé chaque année et le fond du Petit Lac est bien oxygéné toute l'année.
- La concentration moyenne du phosphore du Petit Lac tend à se stabiliser autour de $10 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$, ce qui est représentatif de la moyenne de la couche déphosphatée du Grand Lac.

– **Pour les stocks :**

- Le stock en phosphore total diminue faiblement : la concentration moyenne est de $22.4 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$.
- Le stock en chlorure continue son augmentation après un léger ralentissement ces dernières années.
- Le stock en azote total est légèrement remonté après la baisse constatée les dernières années.

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, J., RAPIN, F. et NIREL, P., (2006) : Évolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. Int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 31-63.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- PERGA, M.-E. et LAINE, L. (2011) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 131-139.
- QUETIN, P. (2011) : Météorologie. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 19-30.
- RAPIN, F. et KLEIN, A. (2011) : Les apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève et leur qualité. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 157-178.
- RIMET, F. (2011) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 99-107.
- STRAWCZYNSKI, A. (2011) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 191-198.
- TADONLEKE, R.D. (2011) : Production primaire et biomasse chlorophyllienne dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2010, 125-130.

Tableau 4 : Concentrations moyennes pondérées, Léman - Petit Lac (GE3).

Table 4 : Mean weighted concentrations, Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

Année	Oxygène mg·L ⁻¹	P _{tot} µgP·L ⁻¹	P-PO ₄ µgP·L ⁻¹	N _{tot} µgN·L ⁻¹	N-NH ₄ µgN·L ⁻¹	N-NO ₃ µgN·L ⁻¹	Cl mg·L ⁻¹	SiO ₂ mgSiO ₂ ·L ⁻¹	C.O.D mgC·L ⁻¹
1986	11.07	58.3	43.9	-	7.2	469	5.08	1.10	1.0
1987	11.12	53.9	38.1	-	9.6	498	5.12	0.99	1.0
1988	10.88	40.8	30.6	-	3.3	473	5.25	0.91	0.9
1989	10.50	37.8	25.6	-	5.6	503	5.87	0.83	0.9
1990	10.57	35.3	19.2	-	21.0	487	6.36	1.04	0.7
1991	10.79	32.6	20.2	622	5.9	521	7.10	0.95	1.0
1992	10.80	32.0	19.5	559	6.9	542	6.73	0.93	1.0
1993	10.74	29.9	17.1	689	12.6	551	6.52	1.05	1.0
1994	10.61	28.1	16.9	687	7.9	497	6.43	0.96	1.0
1995	10.71	21.4	12.4	682	8.8	483	6.44	1.00	1.0
1996	10.72	23.6	9.2	636	5.4	448	6.66	1.15	⁴⁾ 1.0
1997	10.53	25.1	10.4	659	11.0	481	6.91	1.13	0.9
1998	10.74	23.9	10.1	²⁾ 578	5.0	407	7.22	1.03	1.0
1999	10.61	22.3	11.6	-	10.4	392	⁴⁾ 6.93	1.56	¹⁾ 0.7
2000	11.48	21.2	10.4	627	4.0	463	7.04	2.13	⁴⁾ 0.9
2001	11.53	21.3	7.7	637	3.9	435	7.18	0.96	0.9
2002	10.50	19.9	6.7	631	9.4	366	7.33	1.01	1.0
2003	10.33	22.2	9.2	636	14.7	427	7.40	1.15	0.9
2004	10.63	20.1	9.7	695	10.9	503	8.12	0.96	1.0
2005	10.55	20.0	10.0	662	3.7	467	8.44	1.21	1.2
2006	10.92	21.3	10.8	641	7.6	501	8.70	1.45	1.2
2007	11.19	16.3	10.6	537	13.2	488	8.60	1.33	1.2
2008	10.23	12.2	6.9	543	4.4	533	8.86	1.18	1.2
2009	10.09	12.9	⁴⁾ 6.5	⁴⁾ 585	⁴⁾ 7.2	486	8.67	⁴⁾ 0.97	1.2
2010	⁴⁾ 9.74	⁴⁾ 14.9	⁴⁾ 6.7	⁴⁾ 598	⁴⁾ 11.2	⁴⁾ 514	⁴⁾ 9.14	⁴⁾ 0.90	³⁾ 1.1

¹⁾ valeur établie sur 7 mois de mesures

²⁾ valeur établie sur 9 mois de mesures

³⁾ valeur établie sur 10 mois

⁴⁾ valeur établie sur 11 mois de mesures

Tableau 5 : Stocks en tonnes, Léman - Petit Lac (GE3)

Table 5 : Total content in metric tons, Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

Année	Oxygène tonnes	Ptot tonnes	P-PO ₄ tonnes	Ntot tonnes	N-NH ₄ tonnes	N-NO ₃ tonnes	Cl tonnes	SiO ₂ tonnes	COD tonnes
1986	35'735	188	142	-	23	1'512	16'379	3'561	3'077
1987	35'874	174	123	-	31	1'607	16'532	3'004	3'098
1988	35'121	132	99	-	11	1'526	16'937	2'925	3'017
1989	35'874	122	83	-	18	1'624	18'938	2'694	2'958
1990	34'120	114	62	-	68	1'571	20'518	3'363	2'331
1991	34'819	105	65	2'007	19	1'682	22'896	3'076	3'335
1992	34'857	103	63	1'803	22	1'748	21'703	3'000	3'073
1993	34'652	96	55	2'225	41	1'777	21'047	3'393	3'074
1994	34'228	91	55	2'217	25	1'604	20'765	3'092	3'098
1995	34'569	69	40	2'200	28	1'558	20'771	3'225	3'350
1996	34'605	76	29	2'051	17	1'445	21'484	3'701	⁴⁾ 3'052
1997	33'994	81	33	2'125	35	1'554	22'311	3'632	3'038
1998	34'668	77	33	²⁾ 1'864	16	1'313	23'302	3'340	3'126
1999	34'224	72	38	-	33	1'266	⁴⁾ 22'362	5'020	¹⁾ 2'401
2000	37'031	68	34	2'022	13	1'494	22'734	6'879	⁴⁾ 2'879
2001	37'217	69	25	2'057	13	1'403	23'165	3'111	2'902
2002	33'879	64	22	2'036	30	1'180	23'638	3'271	3'064
2003	33'319	72	30	2'053	47	1'378	23'893	3'718	2'948
2004	34'308	65	31	2'242	35	1'623	26'198	3'097	3'064
2005	34'060	65	32	2'136	12	1'506	27'235	3'899	3'745
2006	35'248	69	35	2'068	25	1'618	28'064	4'684	3'874
2007	36'111	53	34	1'733	42	1'574	27'983	⁴⁾ 4'301	3'730
2008	32'999	39	22	1'754	14	1'720	28'589	3'796	3'832
2009	32'572	41	⁴⁾ 21	⁴⁾ 1'888	⁴⁾ 23	1'569	27'967	⁴⁾ 3'142	3'747
2010	⁴⁾ 31'424	⁴⁾ 43	⁴⁾ 23	⁴⁾ 1'929	⁴⁾ 36	⁴⁾ 1'659	⁴⁾ 29'507	³⁾ 2'890	⁴⁾ 3'552

¹⁾ valeur établie sur 7 mois de mesures

²⁾ valeur établie sur 9 mois de mesures

³⁾ valeur établie sur 10 mois

⁴⁾ valeur établie sur 11 mois de mesures

Concentrations moyennes pondérées - Léman (Grand Lac - SHL2).
Mean weighted concentrations – Lake Geneva (Grand Lac – SHL2).

ANNEXE 1

Année	Oxygène mg·L ⁻¹	P tot. µgP·L ⁻¹	PO ₄ µgP·L ⁻¹	Ntot. µgN·L ⁻¹	Nmintot µgN·L ⁻¹	NH ₄ µgN·L ⁻¹	NO ₂ µgN·L ⁻¹	NO ₃ µgN·L ⁻¹	Cl mgCl·L ⁻¹	C.O.P µgC·L ⁻¹	Npartic µgN·L ⁻¹	Ppartic µgP·L ⁻¹	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

*: valeur interpolée

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

ANNEXE 2

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

Année	Oxygène Tonnes	P tot. Tonnes	P-PO ₄ Tonnes	N tot. Tonnes	Nmintot Tonnes	N-NH ₄ Tonnes	N-NO ₂ Tonnes	N-NO ₃ 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

*: valeur interpolée

Incertitudes élargies* des principales analyses physico-chimiques.

Expanded uncertainties of main physical and chemical analyses.

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

