

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN

PHYSICAL-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA

Campagne 2007

PAR

Jérôme LAZZAROTTO

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

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'année 2007 se distingue par un hiver 2006-2007 relativement chaud, un brassage des eaux très limité et une production primaire importante dès janvier. Cependant, l'oxygénation des eaux du fond est restée relativement élevée jusqu'en fin d'année (des minima de 2.9 mgO₂/L en octobre et 4.3 mgO₂/L en décembre) grâce aux deux brassages complets des années précédentes. La masse d'eau dans laquelle se produit le relargage du phosphore fin 2007 est relativement restreinte.

La production primaire importante en début d'année et ce faible brassage hivernal entraînent en début d'année des concentrations faibles en phosphate et silice dans les eaux superficielles comparativement aux années précédentes. Cela n'a pas empêché la formation d'une importante biomasse phytoplanctonique. Il est relevé une forte consommation des nutriments, notamment du phosphore, et ceci jusqu'à une profondeur dépassant 50 m jusqu'en fin d'année.

La phase des eaux claires est observée entre le 21 mai et le 4 juin avec une transparence qui atteint 9.1 m.

Le stock moyen de phosphore diminue de 6 % par rapport à 2006 pour atteindre 2300 tonnes de P, soit une concentration moyenne de 26 µgP/L.

La température des eaux du fond reste constante et semblable aux années précédentes avec des valeurs entre 5.4 et 5.5°C en 2007.

ABSTRACT

The year 2007 was distinguished by the relatively warm winter of 2006-2007, by very limited water churning and by considerable primary production from January. However, oxygenation of the bottom water remained fairly high through until the end of the year (with minimum values of 2.9 mgO₂/L in October and 4.3 mgO₂/L in December) due to the complete churning in the preceding years. The mass of water into which phosphorus had been discharged was relatively low at the end of 2007.

The high primary production at the beginning of the year plus this low winter churning meant that at the beginning of the year, concentrations of phosphorus and silica were lower in the surface water than in preceding years. This did not prevent the formation of a considerable phytoplanktonic biomass. High nutrient consumption was recorded, notably of phosphorus, and this continued down to a depth of more than 50 m up to the end of the year.

The clear-water phase was observed between 21 May and 4 June, with a transparency that reached 9.1 m.

The mean phosphorus content was 6% lower than in 2006, reaching 2300 tonnes of P, i.e. a mean concentration of 26 µgP/L.

The temperature of the bottom water remained constant, and similar to that in the preceding years, with temperatures of between 5.4 and 5.5°C in 2007.

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 traitera 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.

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).

Les concentrations moyennes pondérées sont calculées de la façon suivante :

$$C = \frac{\sum (C_i \cdot V_i)}{V}$$

avec

C_i = concentration dans la strate

V_i = volume de la strate

V = volume total du Grand 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.

Il y a eu 18 campagnes de prélèvements en 2007, réparties selon les dates indiquées dans le tableau 1. Trois campagnes n'ont pas pu être effectuées pour des raisons météorologiques.

Les prélèvements sont effectués selon des méthodes normalisées à INRA UMR CARRTEL de Thonon-les-Bains, 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 allant de 0 à 3 m par rapport à la longueur de câble pour les prélèvements à partir de 50 m jusqu'au fond. Avant 50 m, les écarts sont négligeables.

Les échantillons sont analysés par le laboratoire de la Station d'Hydrobiologie Lacustre (INRA Thonon-les-Bains). Les méthodes utilisées sont validées bi-annuellement par des analyses inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. En 2007, les résultats des différents laboratoires sont concordants (STRAWCZYNSKI, 2008).

De plus, lors de chaque campagne, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH, turbidité, chlorophylle *a* in vivo et transmission de la lumière sont réalisés à l'aide d'une sonde multiparamètre immergable (BLANC et al., 1993). La figure 2 représente deux profils de sonde effectués à deux périodes distinctes : le 22 mars 2007 lors du brassage et le 19 juillet 2007 lors de l'activité phytoplanctonique importante.

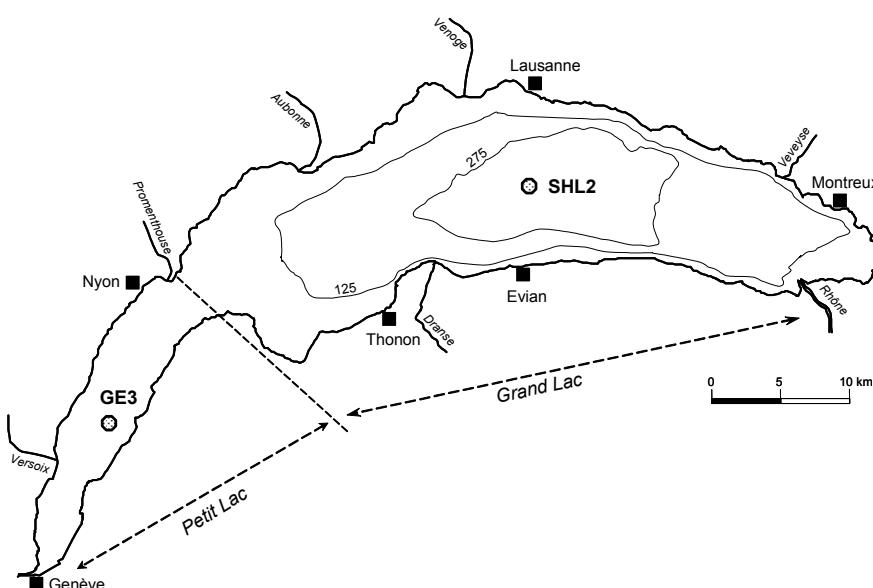


Figure 1 : Situation des points de prélèvement.

Figure 1 : Location of the sampling stations.

Tableau 1 : Dates des campagnes de prélèvement.

Table 1 : Dates of the sampling surveys.

Campagne n°	Date	Campagne n°	Date
1	lundi 15 janvier 2007	10	lundi 9 juillet 2007
2	mardi 20 février 2007	11	mercredi 25 juillet 2007
3	mardi 6 mars 2007	12	lundi 6 août 2007
4	jeudi 22 mars 2007	13	lundi 27 août 2007
5	lundi 2 avril 2007	14	lundi 17 septembre 2007
6	lundi 16 avril 2007	15	lundi 1 ^{er} octobre 2007
7	lundi 21 mai 2007	16	lundi 15 octobre 2007
8	lundi 4 juin 2007	17	lundi 19 novembre 2007
9	mardi 12 juin 2007	18	mercredi 5 décembre 2007

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

L'hiver 2007-2008 a été chaud, plus chaud que la plupart des hivers depuis le début du suivi du lac. La température de l'air a été très supérieure à la moyenne 1951-2007 de plus de 2°C (QUETIN, 2008).

L'hiver n'a donc pas permis l'homogénéisation thermique du lac, mais seulement un refroidissement des eaux superficielles jusqu'à un minimum de 6.7°C lors de la campagne du 6 mars 2007. Cette température minimale hivernale est parmi les plus chaudes depuis le début du suivi. Après deux années consécutives de brassages complets, l'année 2007 se distingue par une homogénéisation limitée des eaux jusqu'à environ 35 m. Ce faible brassage de la colonne d'eau a eu lieu entre le 6 et le 22 avril 2007. Cependant, les couches au-dessous de 100 m ont été très faiblement réoxygénées. Au fond du lac, la concentration en oxygène dissous augmente faiblement et passe de 5.0 mgO₂/L le 20 février à 6.1 mgO₂/L le 6 mars 2007.

Les figures 3 à 7 représentent l'évolution saisonnière et interannuelle de la température de l'air et des eaux du lac.

Après l'hiver relativement chaud, l'été présente des températures en dessous des moyennes avec un maximum de 22.1°C en surface le 6 août 2007, soit la température maximale estivale la plus faible depuis 1996 et inférieure de 1°C aux années précédentes.

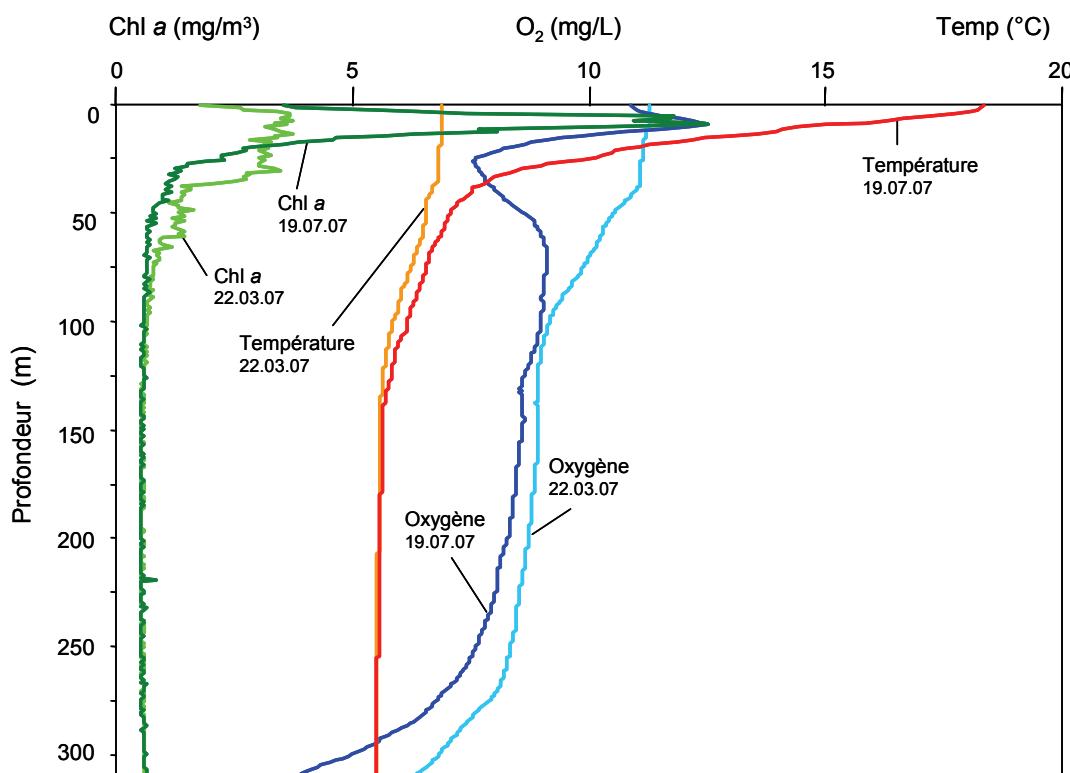


Figure 2 : Profil physico-chimique à SHL2 mesuré avec une sonde multiparamètres lors du brassage partiel (22.03.2007) et lors de la stratification thermique (19.07.2007).

Figure 2 : Multi-parameter Water Quality Logger profile during chumming (22.03.2007) and during thermic stratification at SHL2 (19.07.2007).

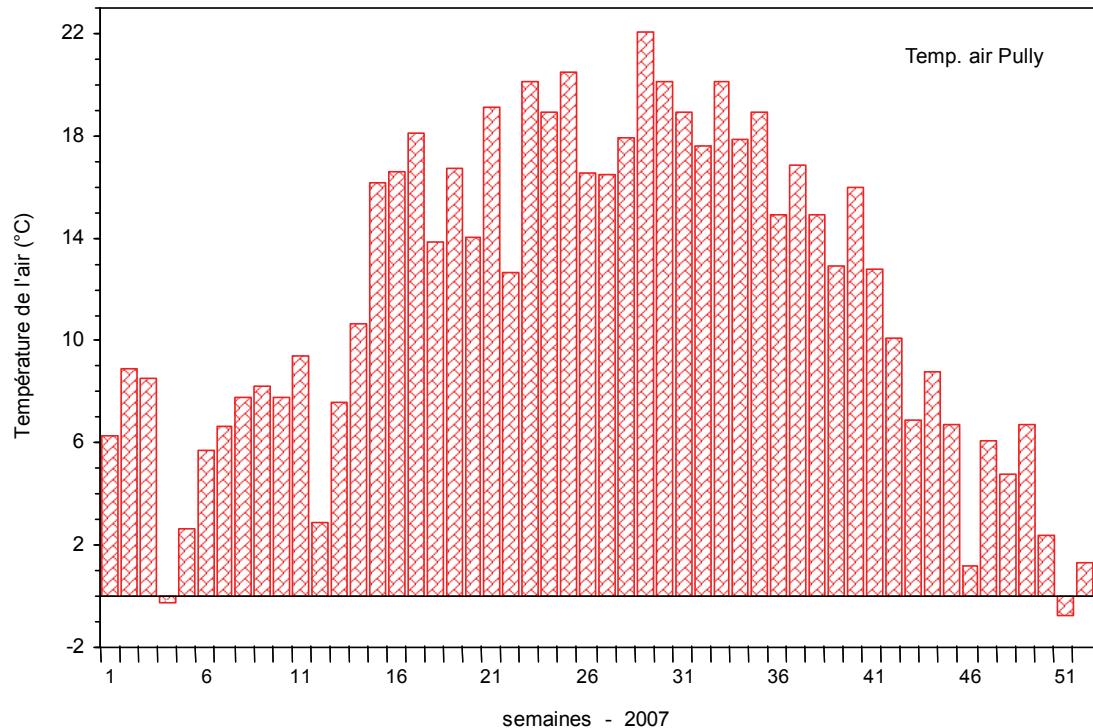


Figure 3 a : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully en 2007.
Figure 3 a : Mean weekly air temperature at the Pully station in 2007.

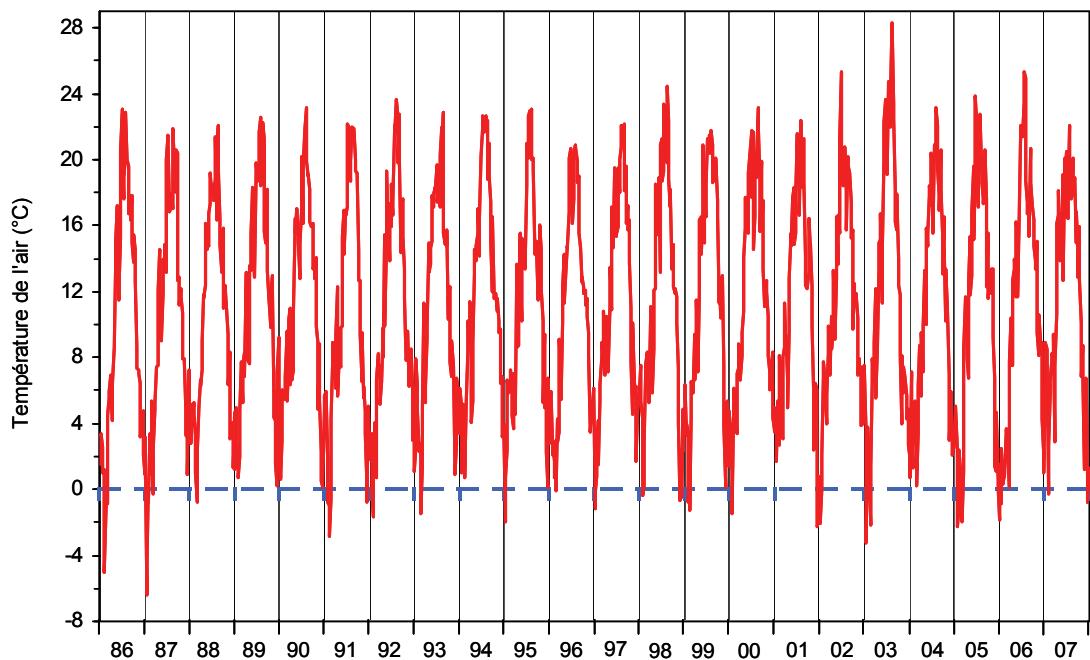


Figure 3 b : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully de 1986 à 2007.
Figure 3 b : Mean weekly air temperature at the Pully station from 1986 to 2007.

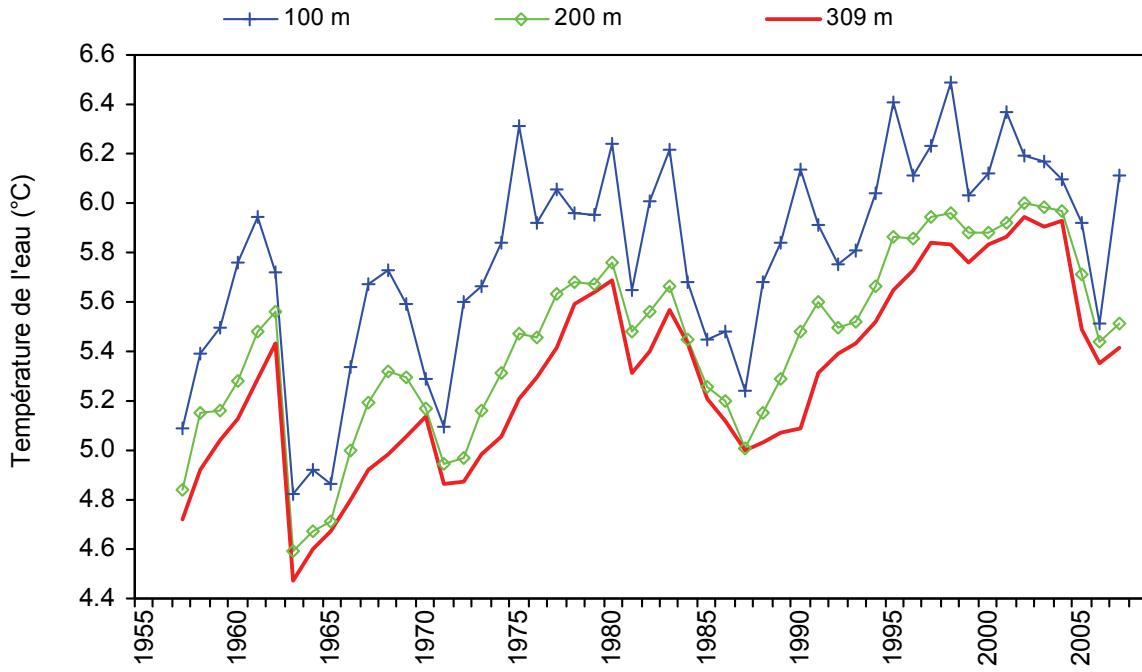


Figure 4 : Evolution de la température moyenne de l'eau à 100, 200 et 309 mètres de profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 4 : Change in the mean annual water temperature at depths of 100, 200 and 309 meters, lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

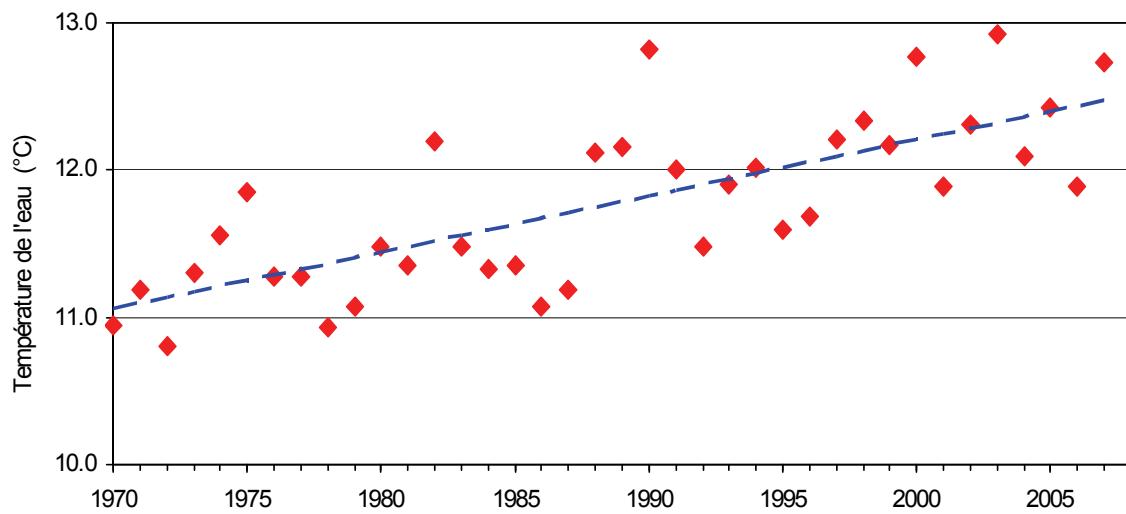


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du Léman à 5 mètres de profondeur - Grand Lac (SHL2).

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

La figure 7 représente l'évolution de la température depuis 1996 de la colonne d'eau du lac en SHL2. Après les deux années 2005 et 2006 avec un brassage complet et un refroidissement important de la colonne d'eau, l'année 2007 présente une colonne d'eau toujours froide par rapport aux années précédant 2005 malgré l'hiver relativement chaud.

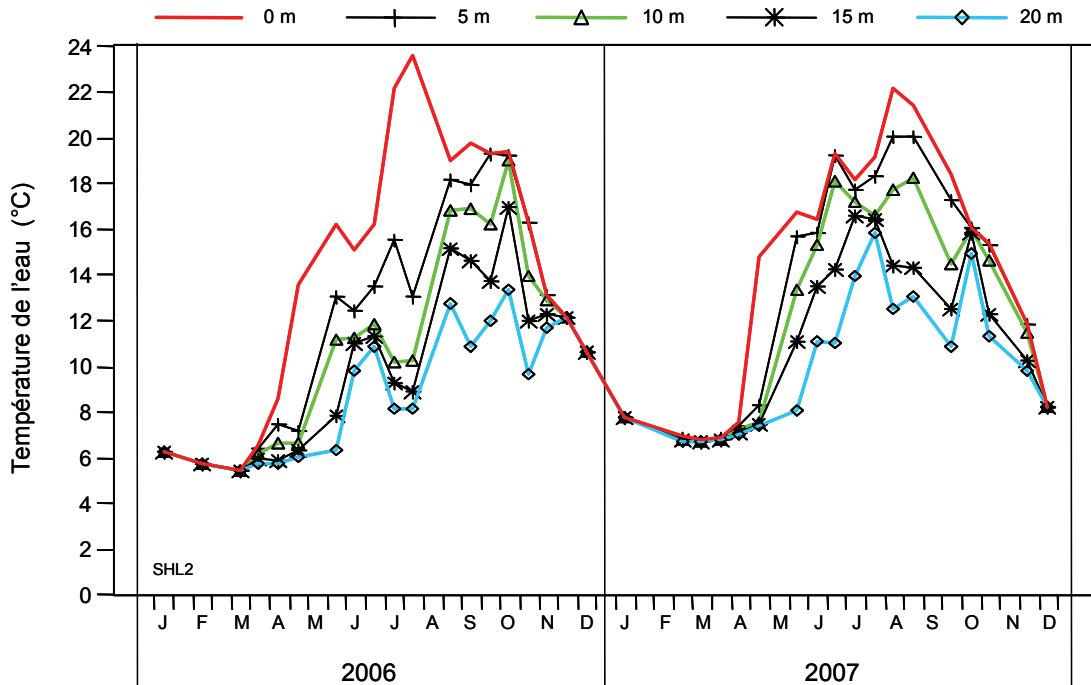


Figure 6 : Température de l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 6 : Temperature of the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 et 20 m) Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

3. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Les températures hivernales en surface ont été clémentes et ont permis une production primaire importante à partir de janvier (TADONLEKE, 2008). Le brassage de la colonne d'eau permet de remettre à disposition les nutriments sur l'ensemble de la colonne d'eau à partir des couches inférieures. Cependant, en 2007, les températures douces ont fortement limité ce brassage et donc cette redistribution, notamment pour le phosphate. Les conditions du début d'année 2007 sont donc très différentes de celles des deux années précédentes. Après le brassage complet de 2006, la concentration homogène en orthophosphate s'est établie à 24 µg/L dans la colonne d'eau ; en 2007, le maximum en surface est observé lors de la campagne du 6 mars avec 12 µgP/L en surface et 39 µgP/L au fond. Il en est de même pour la concentration moyenne en phosphore total qui était de 33 µgP/L le 18 avril 2006 et de 23 µgP/L le 2 avril 2007. Le stock initial en phosphore en surface est donc fortement diminué (de l'ordre de 10 µgP/L) par rapport aux années précédentes du fait du faible brassage et d'une consommation importante dès le début d'année.

Les concentrations en silice en surface en début d'année sont aussi plus faibles cette année que les années précédentes : 1.89 mg/L de SiO₂ le 27 mars 2006 contre 1.41 mg/L le 20 février 2007.

Par contre, le faible brassage de 2007 a suffi pour remettre à disposition en surface la même quantité d'azote nitrique qu'en 2006 : 0.56 mgN/L le 22 mars 2007 (0.57 mgN/L le 15 mars 2006). La dynamique de l'azote nitrique est en effet différente de celle de la silice et du phosphore : les concentrations de phosphore et de silice augmentent au fond du lac à partir de l'été du fait de l'activité microbienne. Le brassage permet de ramener ce stock en surface. L'azote nitrique ne présente pas de concentrations plus importantes au fond du lac mais reste élevé dans toute la colonne d'eau et même en surface dès que sa consommation ralentit.

L'activité phytoplanctonique est visible dès la campagne du 22 mars 2007 avec une consommation du phosphate et de la silice en surface, ainsi que de l'azote nitrique dans une moindre mesure ; cette activité entraîne une augmentation de la concentration en carbone organique total.

Les concentrations diminuent en surface de 12 µgP/L à 8 µgP/L pour le phosphate et de 0,56 mgN/L à 0.50 mgN/L pour l'azote nitrique, alors que les concentrations en carbone organique total et particulaire sont respectivement passées de 1.09 mgC/L à 1.23 mgC/L et de 229 µgC/L à 377 µgC/L. La concentration en surface en silice a commencé à diminuer plus tôt dans l'année en passant de 1.41 mg/L le 22 février à 1.35 mg/L le 6 mars 2007.

La transparence traduit l'absence de particules dans la colonne d'eau, surtout des algues : le maximum de début d'année est observé le 20 février 2007 avec 9.70 m, puis la transparence diminue progressivement jusqu'au mois d'avril.

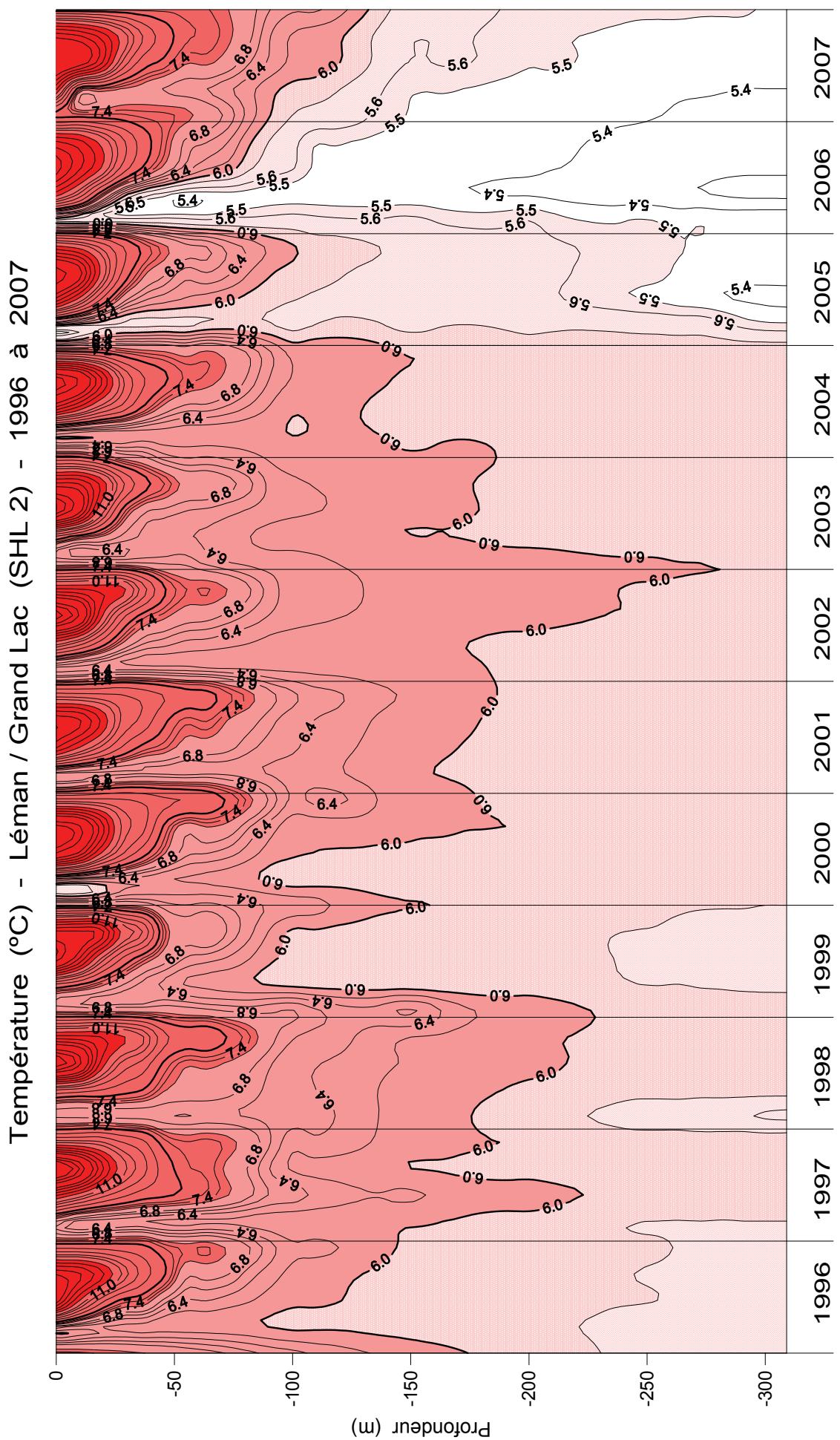


Figure 7 : Température des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de présentation graphique peuvent apparaître (différence de lissage des courbes d'isovaleurs)).

Figure 7 : Water temperature in Lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth (N.B.: depending on how many years are taken into consideration, there may be some very slight differences in the graphical presentation (due to differences in the smoothing of the isothermal curves)).

Figure 7 :

Figure 7 :

Entre mars et juin, l'activité phytoplanctonique progresse et la consommation des nutriments est de plus en plus importante dans les couches superficielles. Le minimum printanier de transparence est observé lors de la campagne du 16 avril avec 3.2 m. La forte concentration d'algues nanoplanctoniques à cette période explique cette faible transparence (*Rhodomonas minuta*; RIMET et al., 2008).

La transparence augmente entre le 21 mai et le 4 juin 2007. Cette période correspond à la phase des eaux claires : les algues en présence sont consommées par le zooplancton (une biomasse importante de cladocères faisant suite aux cyclopoides et calanoïdes ; PERGA et LAINE, 2008). L'activité zooplanctonique entraîne une augmentation de la concentration en azote ammoniacal (excrétions du zooplancton). Il est ainsi possible de suivre l'évolution de cette activité dans les couches superficielles. Lors de la campagne du 16 avril 2007, la concentration en azote ammoniacal est importante entre 5 et 30 m, traduisant l'activité de la biomasse importante de calanoïdes et cyclopoides. Dans la période des eaux claires de 0 à 25 m, les concentrations en azote ammoniacal sont importantes avec un maximum le 12 juin 2007 de 56 µgN/L à 7.5 m. Durant cette période, les cladocères, plus spécifiquement herbivores, sont prépondérants et consomment le phytoplancton. Le phytoplancton a la biomasse la plus faible le 4 juin 2007. A cette même période, la production primaire est faible.

Les concentrations en phosphate en surface sont faibles avec des valeurs quasi-nulles le 21 mai 2007 de 0 à 15 m. La consommation de phosphate est observée jusqu'à 50 m avec 4 µgP/L le 4 juin 2007 à 50 m. La couche 0-50 m restera à une concentration inférieure à 10 µgP/L jusqu'à la fin de l'année mis à part lors de la campagne du 25 juillet 2007. Cet appauvrissement est exceptionnel comme nous pouvons le constater sur la figure 25. Le phosphore est donc encore largement limitant pour la production phytoplanctonique (TADONLEKE, 2008).

Les conditions de ce début d'année dans les couches superficielles sont assez proches de celles des années précédentes mis à part les stocks initiaux en phosphate et en silice plus faibles. Les concentrations sont donc plus faibles pendant l'activité phytoplanctonique.

Suite à cette période, les concentrations en phosphate et silice augmentent le 9 juillet entre 0 et 35 m (jusqu'à 19 µgP/L de phosphate à 5 m et 1.07 mg/L de silice à 0 m) alors que l'activité phytoplanctonique a repris après un affaiblissement entre le 21 mai et le 12 juin et que sa biomasse est très importante.

A partir du 25 juillet 2007, avec le maximum de biomasse phytoplanctonique, les concentrations en nutriments diminuent dans la couche photique pour atteindre des valeurs faibles à quasi-nulles jusqu'à 50 m entre août et septembre pour le phosphate et jusqu'à 10 m en août pour la silice et l'azote nitrique. A la suite de ces minima, les concentrations en nutriments augmentent : la concentration en silice augmente jusqu'à la fin de l'année et passe de 0.01 mg/L le 26 août à 1.22 mg/L le 5 décembre, de même que la concentration en azote nitrique qui passe de 60 µgN/L le 26 août à 470 µgN/L le 5 décembre. Les concentrations en phosphate augmentent au mois d'octobre jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10 µgP/L entre 5 et 20 m, puis rechutent pour atteindre des valeurs quasi-nulles de 0 à 3 µgP/L pour l'ensemble de la couche 0 - 50 m. Le maximum de biomasse automnale est observé le 15 octobre avec majoritairement du microplancton, puis la biomasse du microplancton chute et la biomasse du nanoplancton augmente.

Après la phase des eaux claires, la concentration en azote ammoniacal est inférieure à 10 µgN/L dans les couches superficielles à part au mois d'août et au mois d'octobre 2007 entre 15 et 25 m, ce qui laisse supposer une régénération de l'azote ammoniacal par l'activité bactérienne et le zooplancton et lors de la rechute de la biomasse du microplancton.

Les concentrations en carbone et azote particulaires sont cohérentes avec l'activité et la biomasse phytoplanctoniques observées (figure 17). Ces concentrations augmentent à partir du 22 mars 2007 puis diminuent à partir du 21 mai. Elles augmentent lors de la campagne du 9 juillet avec des maxima : 897 µgC/L et 121 µgN/L à 0 m et enfin augmentent au mois d'octobre, puis chutent à des valeurs plus faibles qu'en début d'année (195 µgC/L et 35 µgN/L le 5 décembre à 0 m).

Le carbone organique total suit cette même tendance avec un maximum le 9 juillet 2007 à 0 m de 1.72 mgC/L et 1.33 mgC/L à 0 m en fin d'année le 5 décembre.

La figure 14 représente la chlorophylle *a* dans la couche 0 - 50 m depuis 1996. L'année 2007 apparaît exceptionnelle avec une concentration en chlorophylle *a* plus importante que les années précédentes, et ce jusqu'à la fin de l'année (TADONLEKE, 2008). De la même manière, la biomasse phytoplanctonique mesurée est la plus importante depuis 2001 (RIMET et al., 2008).

La sursaturation en oxygène dissous dans l'épilimnion entraînée par la production primaire est surtout importante entre le brassage et la phase des eaux claires, à partir du 22 mars 2007 avec un maximum de 14.9 mgO₂/L le 16 avril à 2.5 m, soit beaucoup moins qu'en 2006 où le maximum était de 18.7 mgO₂/L le 24 avril à 2.5 m. Après la phase des eaux claires, la concentration en oxygène dissous présente un autre pic en juillet avec 11.5 mgO₂/L à 0 m le 9 juillet, puis faiblit jusqu'à la fin de l'année avec 9.7 mgO₂/L environ dans les couches superficielles le 5 décembre.

Les températures estivales des couches superficielles en 2007 sont plus faibles que les années précédentes avec un maximum de 22.1°C à 0 m le 6 août contre 23.5°C le 18 juillet en surface (figure 6).

La figure 16 représente le rapport Nminéral/P-PO₄ dans la couche 0 - 20 m, soit le rapport N/P disponible pour la production photosynthétique. Lors du second semestre 2007, ce rapport est nettement plus élevé que les années précédentes et indique que le phosphore est largement limitant et ce dès l'été.

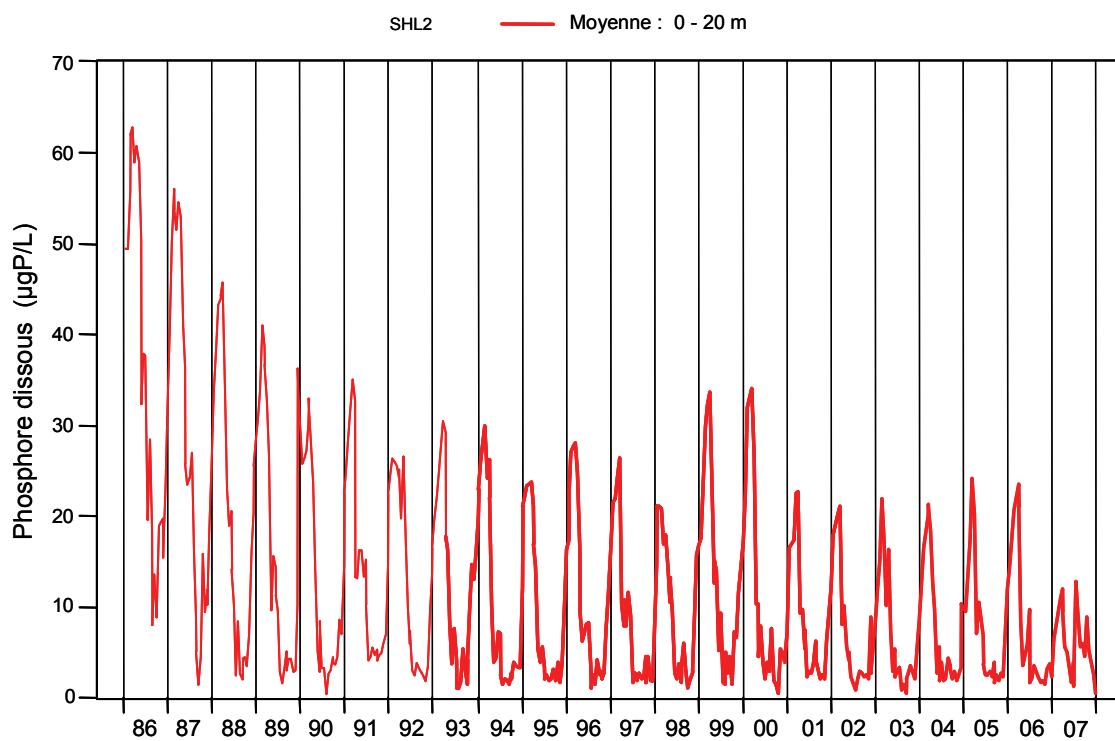


Figure 8 : Concentration en phosphore dissous (PO_4^{3-}) des eaux de la couche superficielle (moyenne 0-20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 8 : Concentration of dissolved phosphorus (PO_4^{3-}) in the water in the surface layers (mean 0-20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

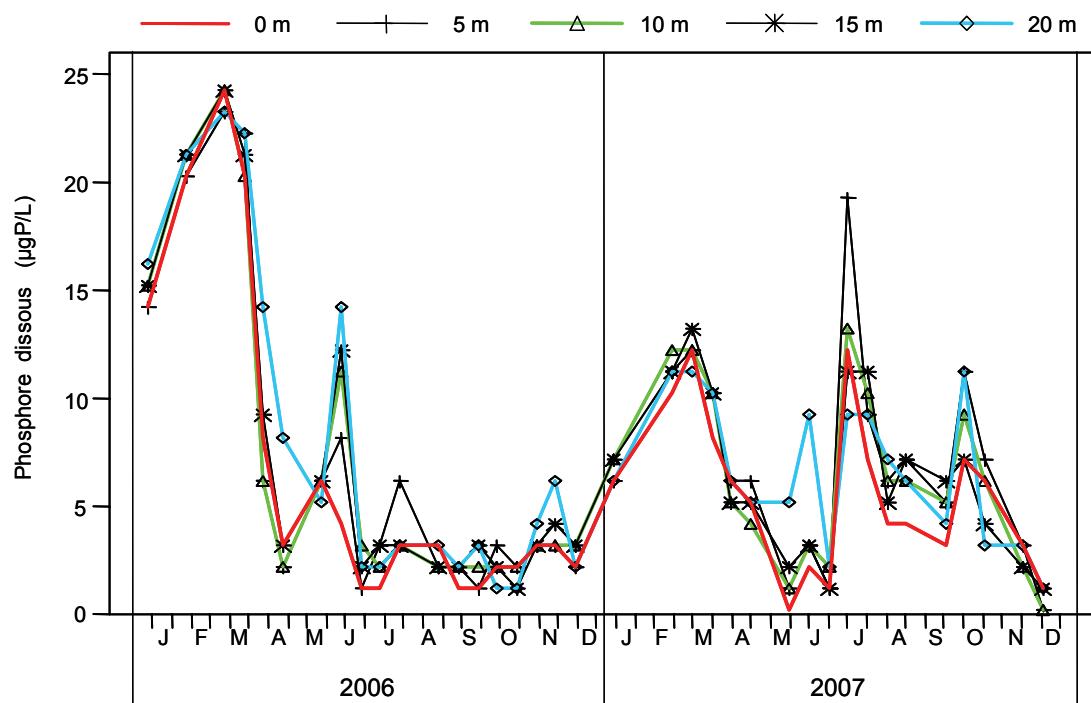


Figure 9 : Concentration en phosphore dissous (PO_4^{3-}) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 9 : Concentration of dissolved phosphorus (PO_4^{3-}) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

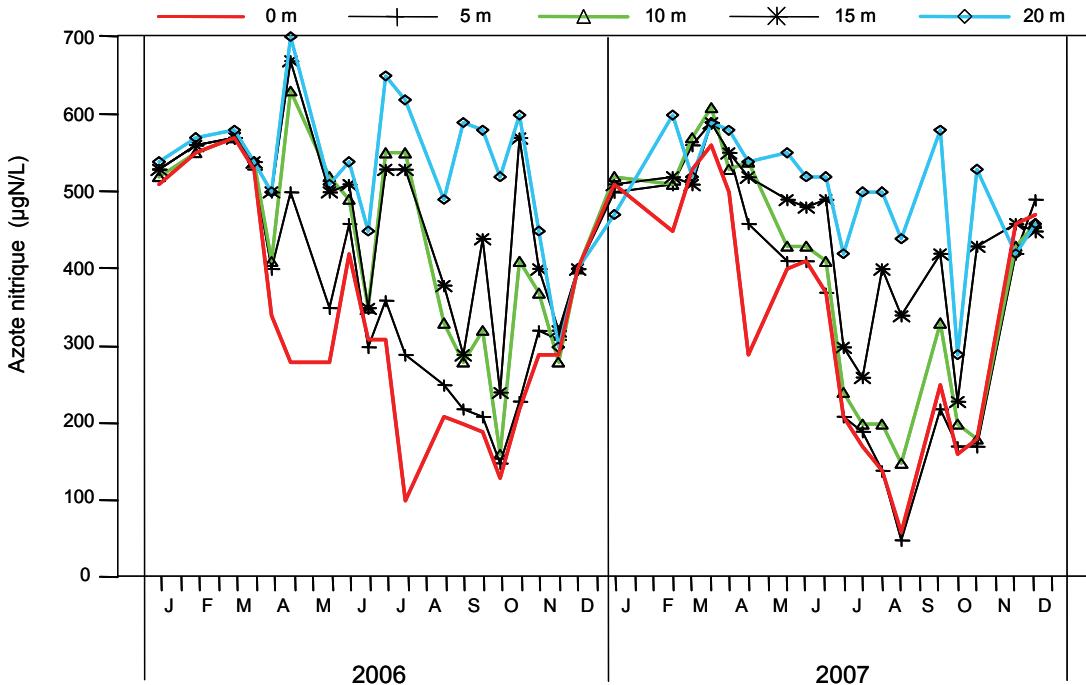


Figure 10 : Concentration en nitrate (NO_3^-) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

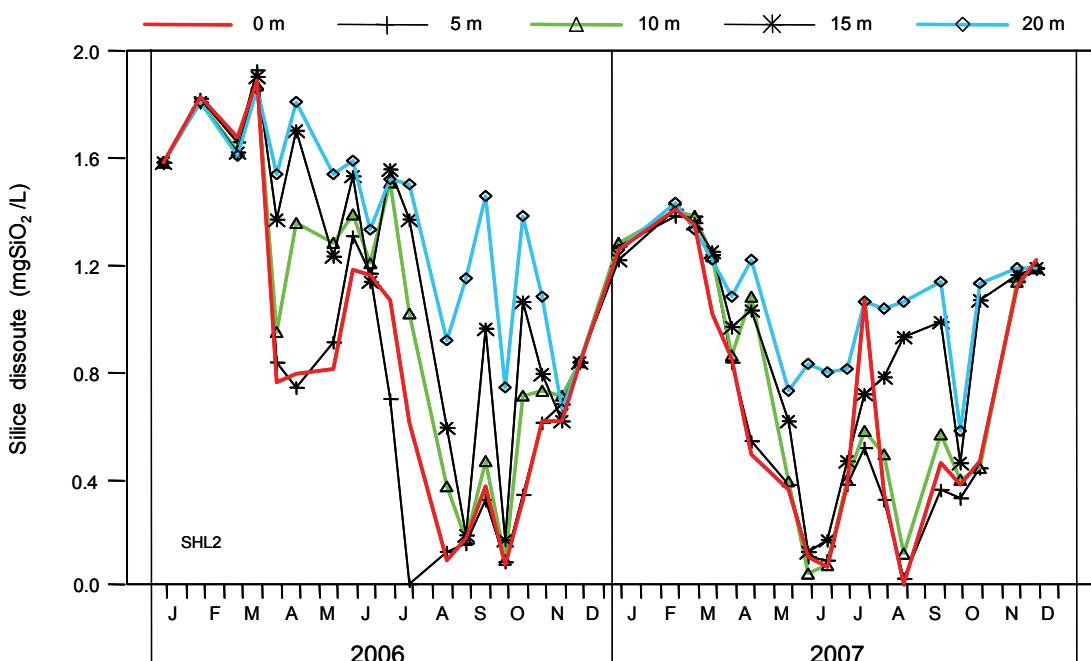


Figure 11 : Concentration en silice (SiO_2) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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).

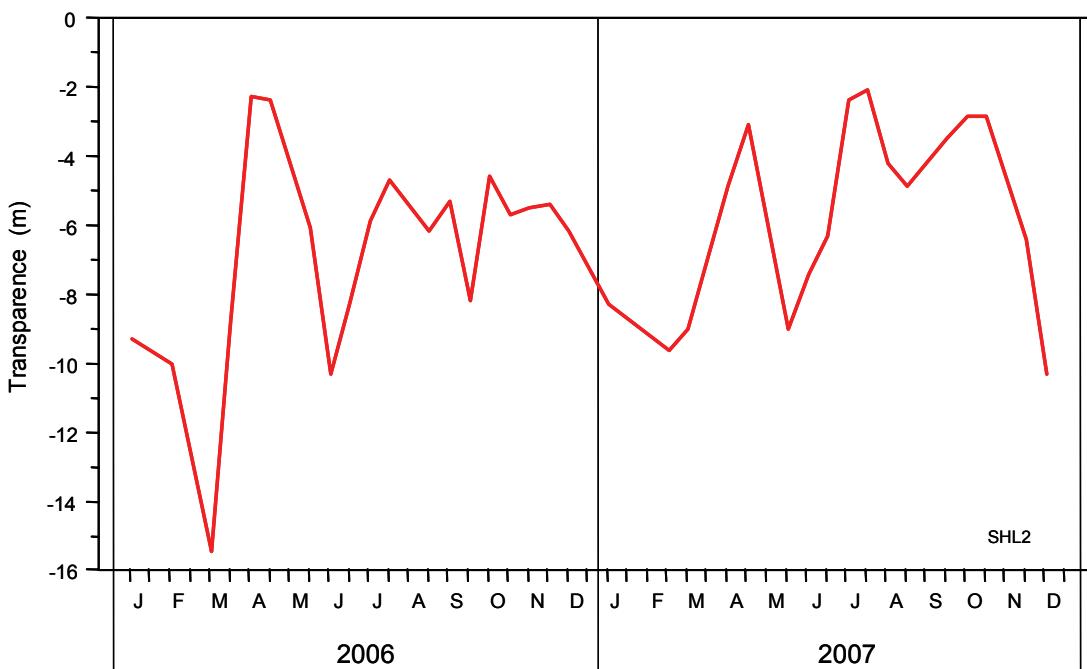


Figure 12 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

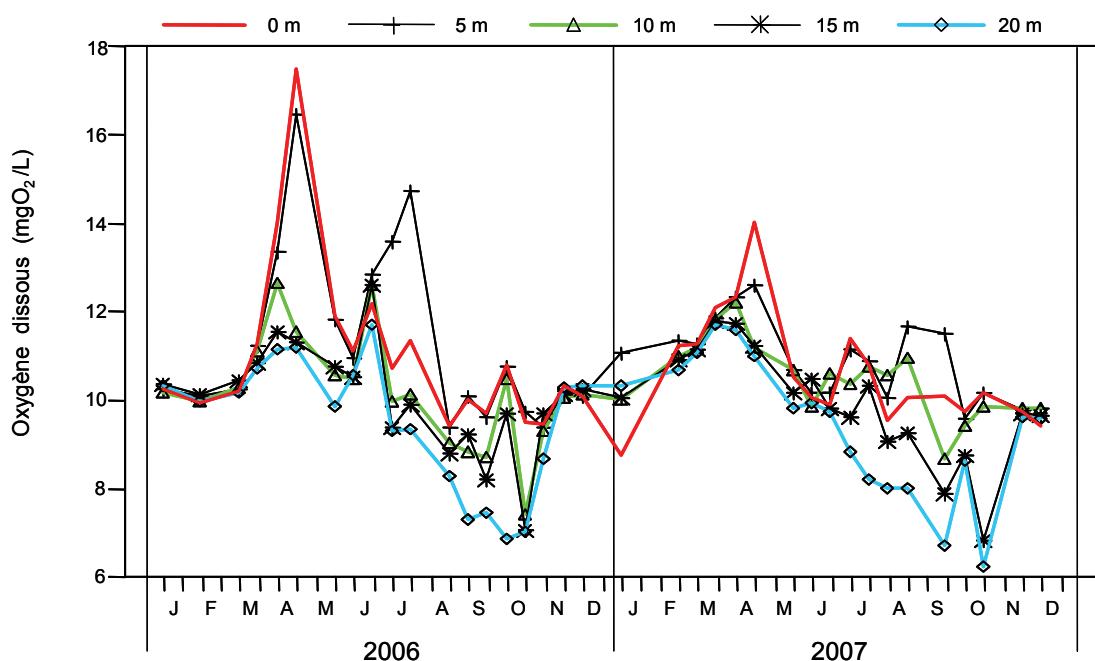


Figure 13 : Concentration en oxygène dissous des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 13 : Concentration of dissolved oxygen in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

Chlorophylle a (mgChla / m³) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2007

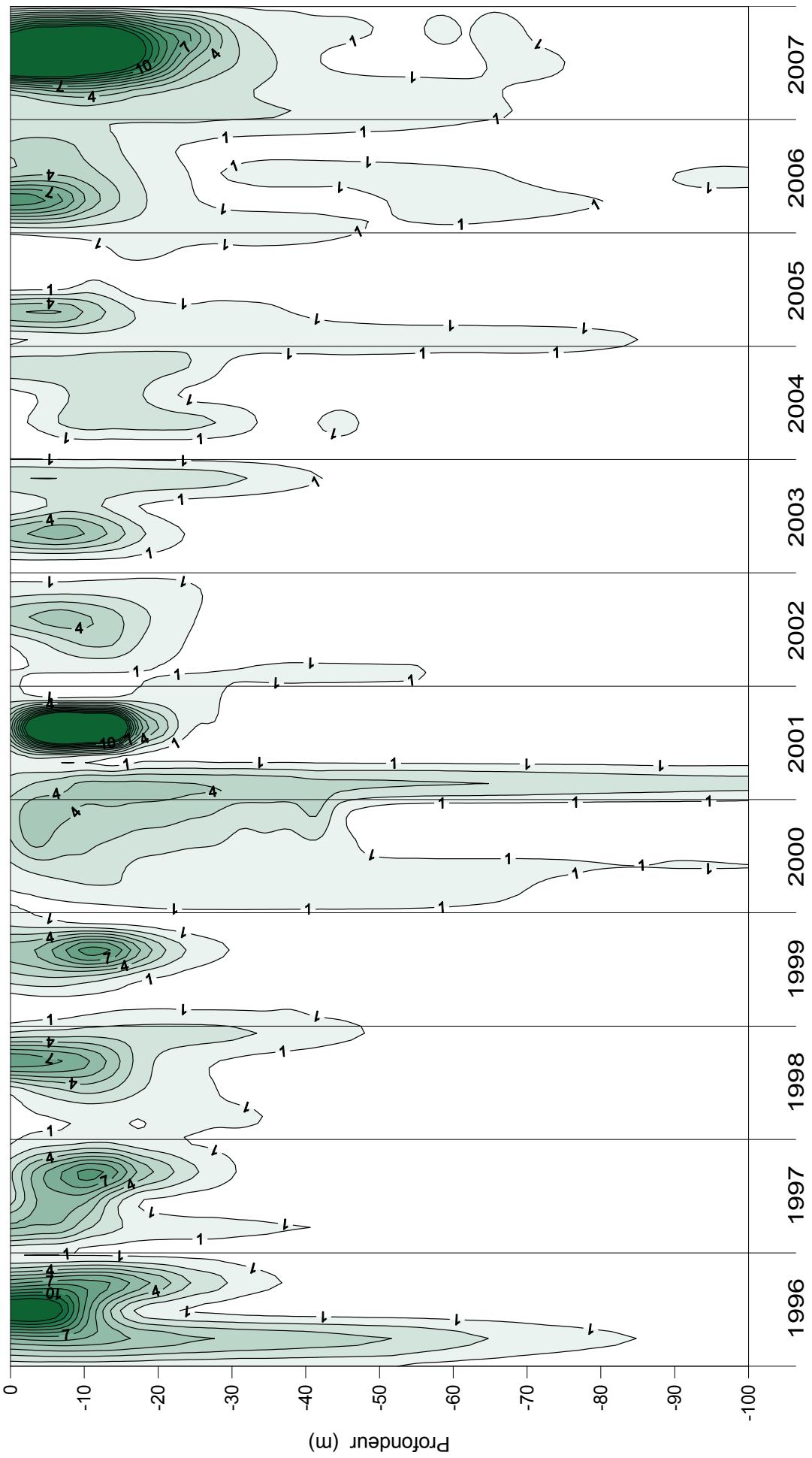


Figure 14 : Concentration en chlorophylle a dans les différentes couches du Léman (Grand Lac - SHL2). (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 14 : Concentration of chlorophyll a in the various layers of Lake Geneva (Grand Lac - SHL2). (N.B.: depending on how many years are taken into consideration, there may be some very slight differences in the graphical presentation (due to differences in the smoothing of the isothermal curves)).

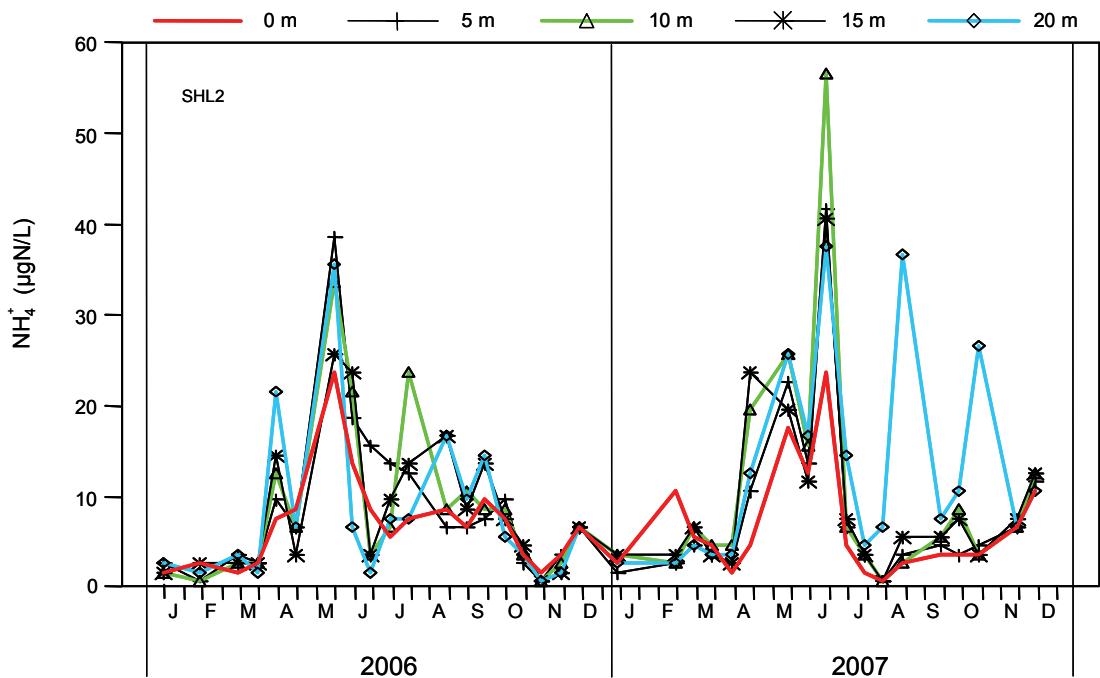


Figure 15 : Concentration en azote ammoniacal des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

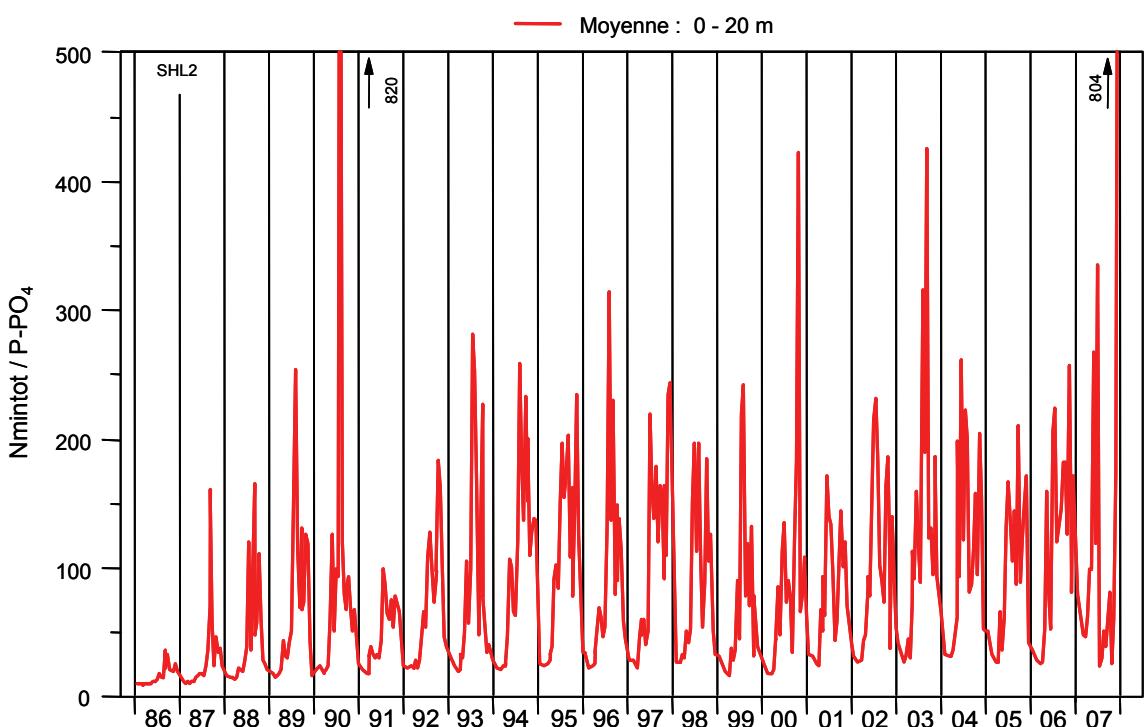


Figure 16 : Rapport Nminéral / P-PO₄, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 16 : Nmineral / P-PO₄, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

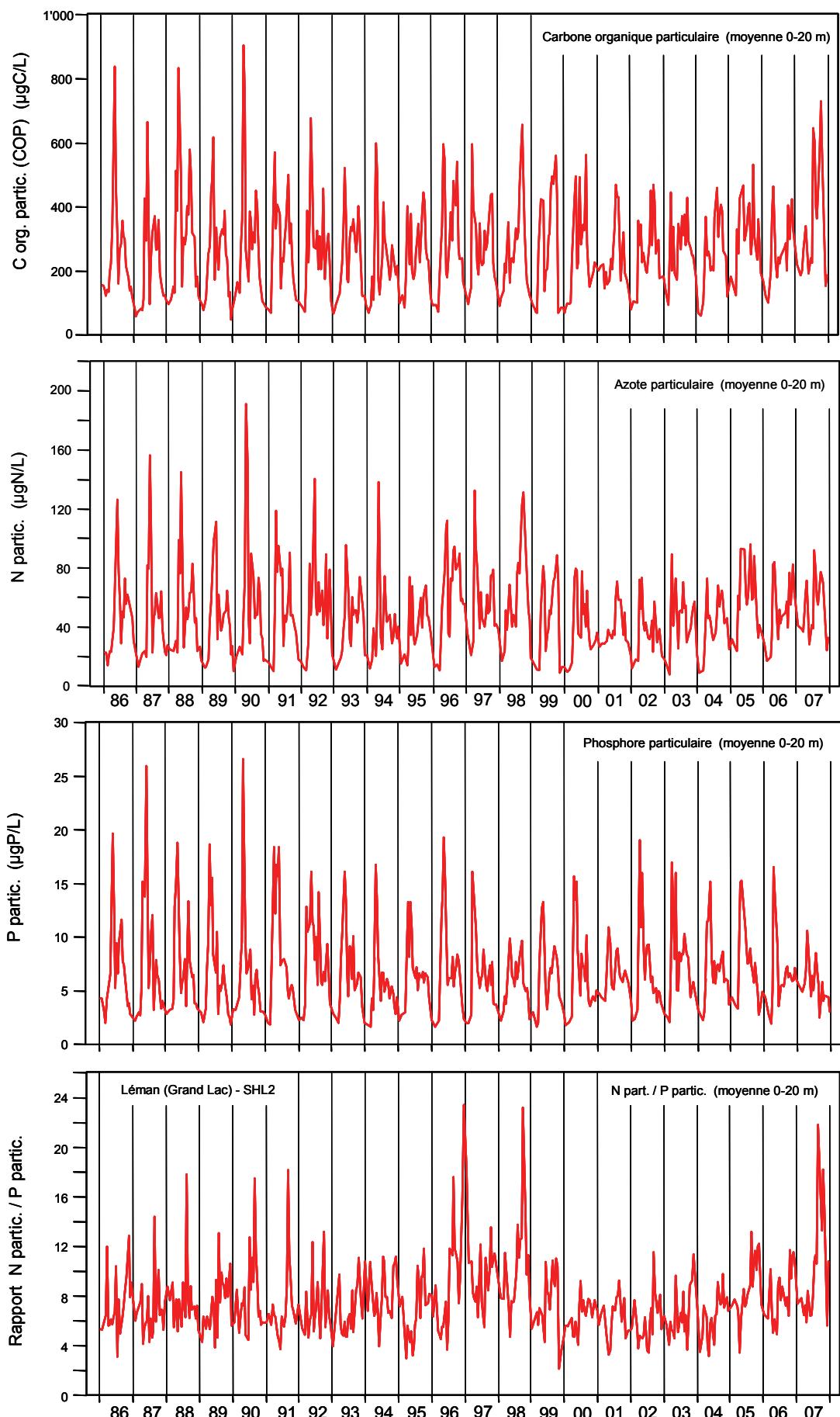


Figure 17 : Concentrations en carbone organique, azote et phosphore particulaires des eaux de la couche superficielle (0-20 m) et rapport Nparticulaire / Pparticulaire, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 17 : 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

Après les deux brassages complets consécutifs en 2005 et 2006, les eaux du fond du lac étaient bien réoxygénées. A la suite de ces deux années, la concentration en oxygène dissous du fond du lac est de 4.7 mgO₂/L au mois de janvier. Le brassage de mars 2007 était très faible et n'a pas permis d'homogénéiser au-delà de 35 m la colonne d'eau. Ce brassage a légèrement réoxygéné le fond du lac pour atteindre au maximum 6.1 mgO₂/L le 6 mars. L'activité bactérienne dans la zone du fond du lac entraîne la désoxygénéation. Cependant, cette désoxygénéation est limitée cette année, notamment du fait du stock initial relativement important en oxygène dissous en début d'année. Le minimum est atteint le 1^{er} octobre 2007 avec 2.9 mgO₂/L, puis la concentration en oxygène dissous réaugmente jusqu'à la fin de l'année pour atteindre 4.3 mgO₂/L le 5 décembre. L'épaisseur de la couche désoxygénée en dessous de 4 mgO₂/L est faible comme il est possible de l'observer sur la figure 23.

Le 27 août 2007, la concentration en oxygène dissous au fond du lac descend en dessous de 4 mgO₂/L. Cette désoxygénéation 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 et dans une moindre mesure de silice, ainsi qu'une augmentation de la turbidité du fait de ce relargage et remise en suspension des sédiments.

L'azote ammoniacal et le phosphore total au fond du lac présentent des maxima le 27 août lors de la désoxygénéation importante avec 52 µgN/L et 150 µgP/L, ainsi qu'un maximum de turbidité avec 13.2 mg/L SiO₂, alors que la turbidité est de l'ordre de 1 mg/L SiO₂ jusqu'au mois de juillet. Le relargage en phosphore total continue jusqu'à la fin de l'année et est significatif jusqu'à 290 m.

La concentration en silice augmente de façon continue pour atteindre un maximum de 5.30 mg/L le 15 octobre au fond du lac.

Malgré le faible brassage, la masse d'eau subissant le relargage de phosphore total en fin 2007 est restreinte comme nous pouvons le constater sur la figure 20. Cependant, des concentrations aussi importantes que les maxima observés le 27 août de 150 µgP/L en phosphore total et de 136 µgP/L de phosphate n'ont pas été observées depuis 1997. Ces maxima sont corrélés avec le maximum de turbidité et d'azote ammoniacal ainsi qu'une forte concentration en manganèse.

La température des eaux du fond reste constante et similaire aux années précédentes avec des valeurs entre 5.4 et 5.5°C.

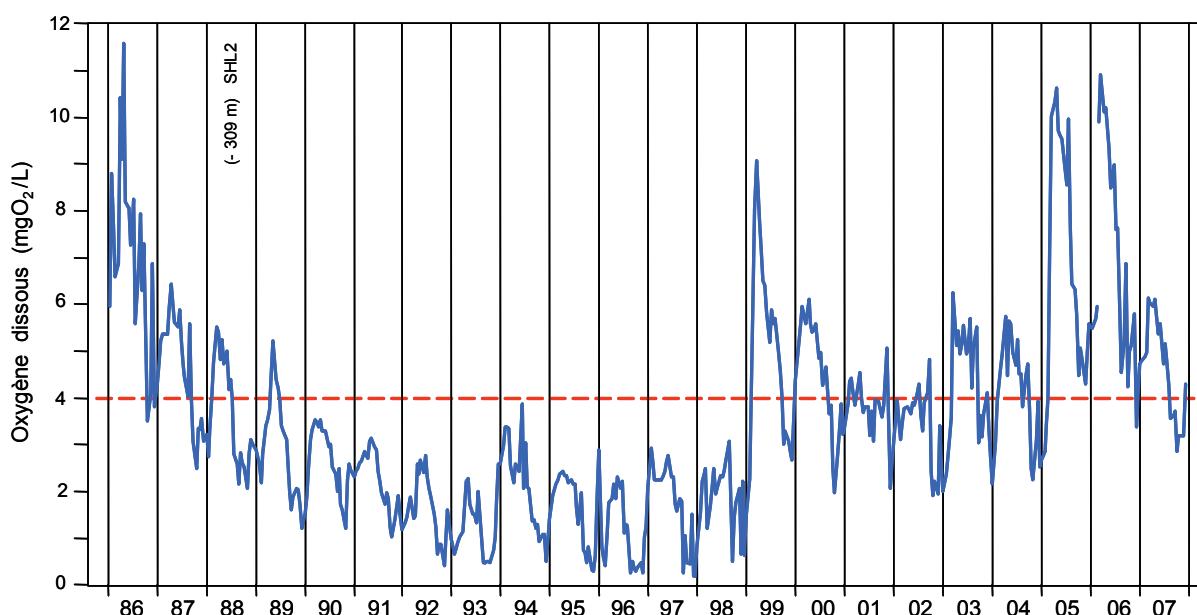


Figure 18 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 18 : Concentration of dissolved oxygen in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

Oxygène (mg/L) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2007

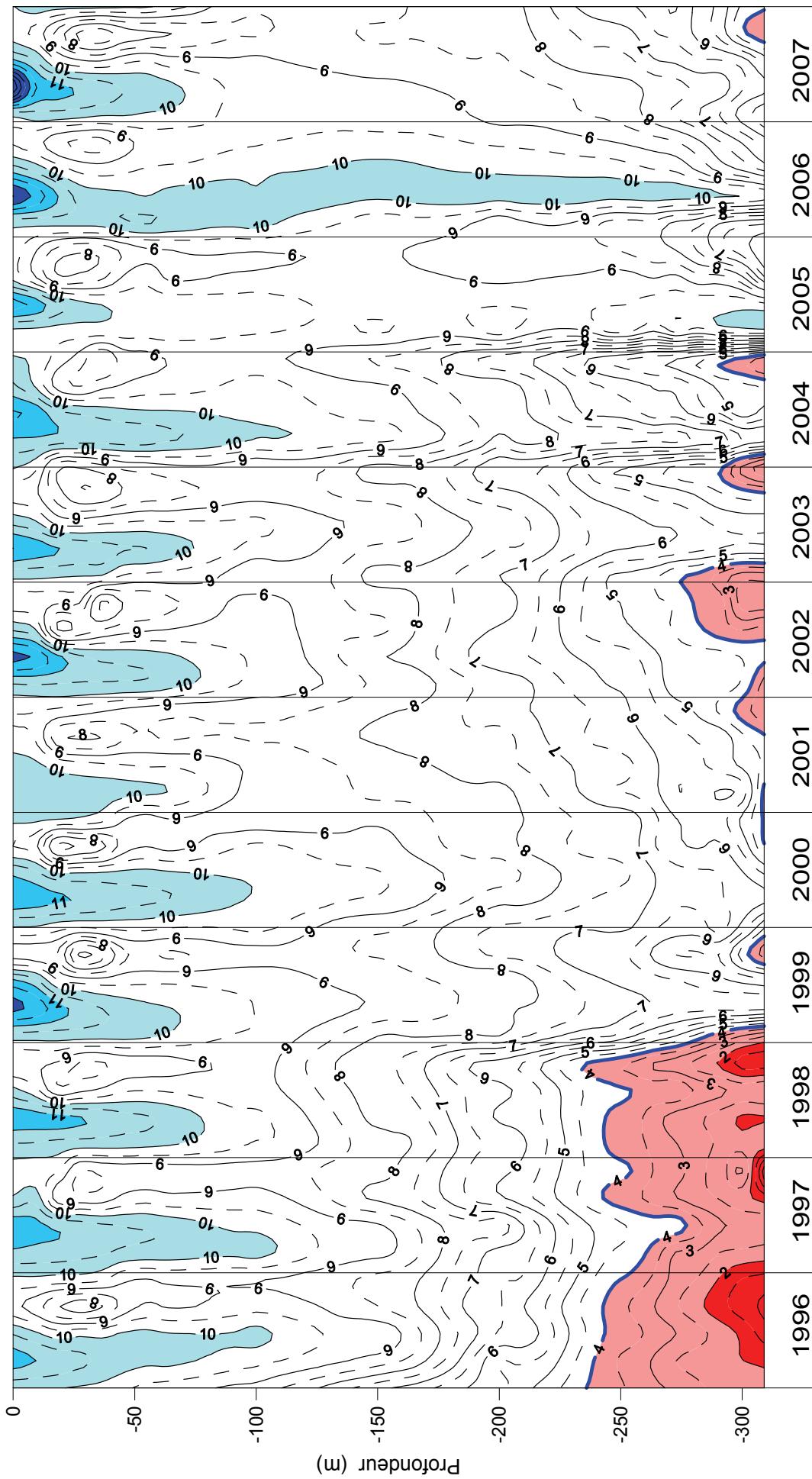


Figure 19 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur. (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 19 : Concentration of dissolved oxygen in the water of Lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth. (N.B.: depending on how many years are taken into consideration, there may be some very slight differences in the graphical presentation (due to differences in the smoothing of the isothermal curves)).

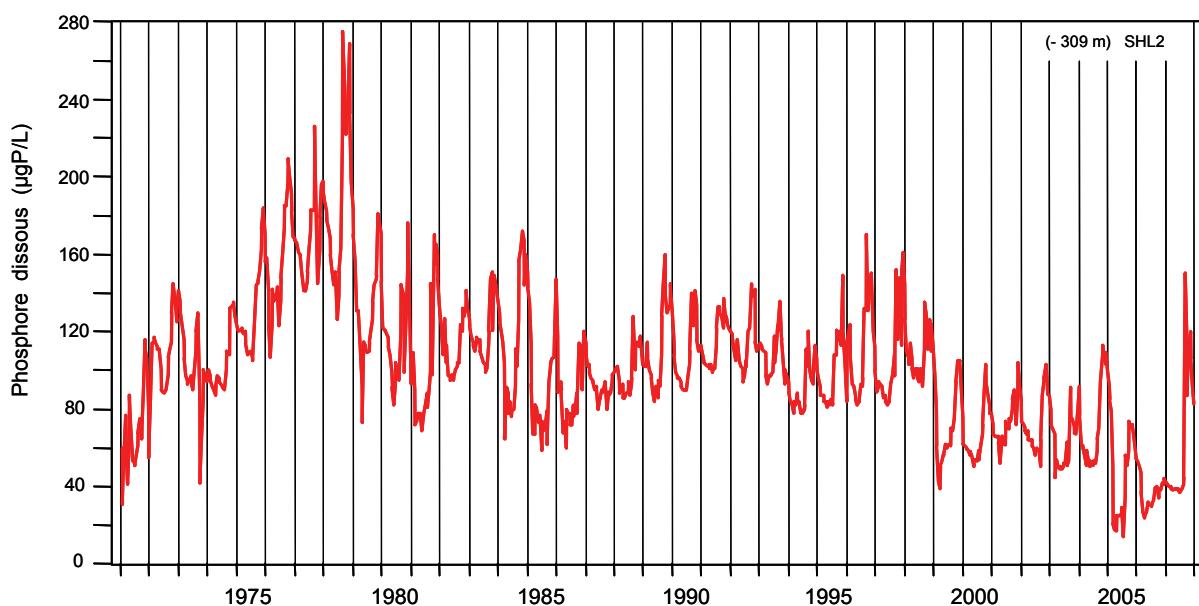


Figure 20 : Concentration en phosphore dissous (PO_4^{3-}) des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).
Figure 20 : Concentration of dissolved phosphorus (PO_4^{3-}) in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

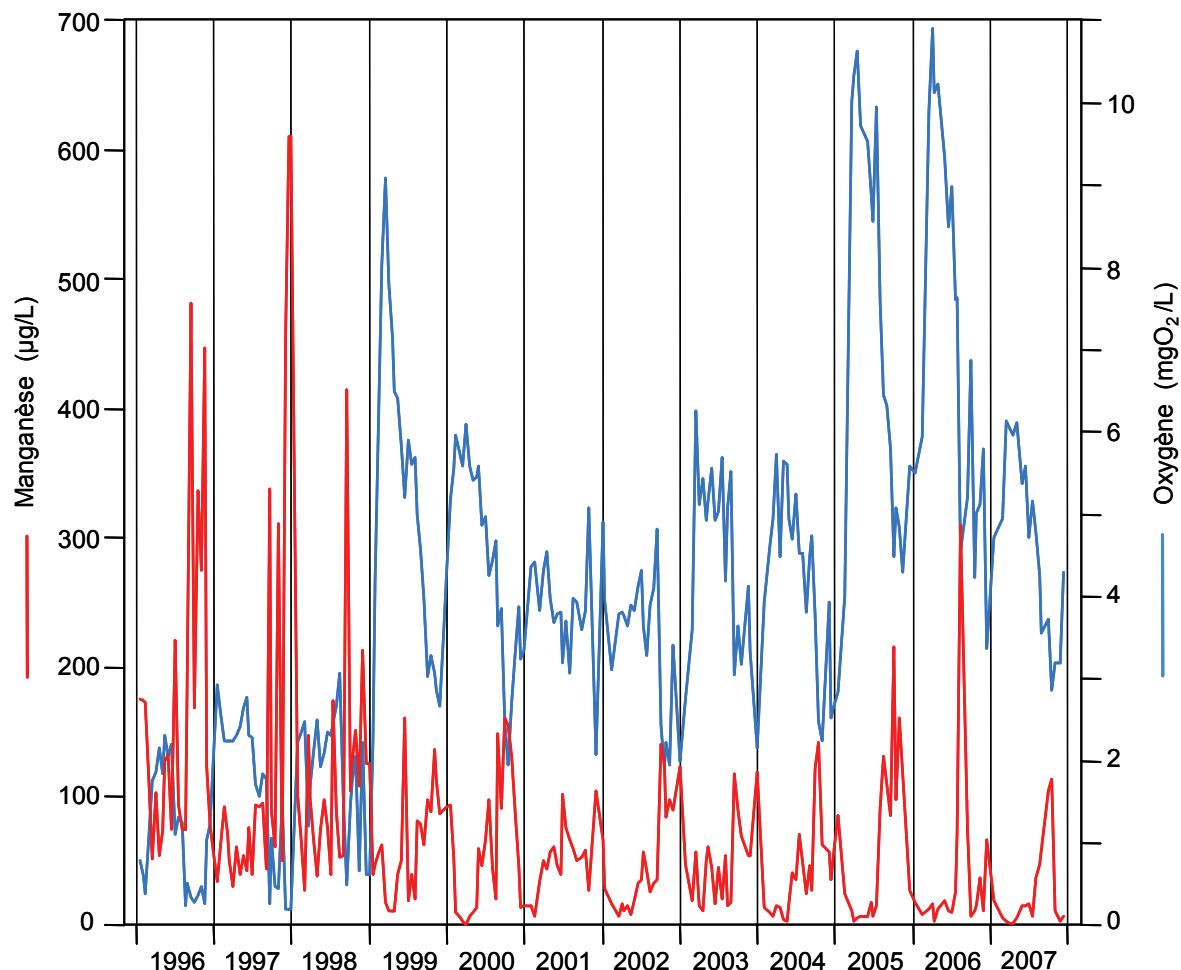


Figure 21 : Comparaison des concentrations en manganèse total et en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).
Figure 21 : Comparison of the changes in the concentrations of total manganese and dissolved oxygen in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

Les résultats des moyennes pondérées et des stocks sont présentés dans les annexes 1 et 2.

5.1 Oxygène dissous

Les deux brassages complets consécutifs du lac en 2005 et 2006 ont entraîné une forte réoxygénéation de la colonne d'eau avec 10.9 mgO₂/L lors du brassage en mars 2006 et 9.8 mgO₂/L en moyenne sur toute l'année 2006, soit la réoxygénéation la plus importante de ces 20 dernières années. Le brassage de 2007 a été très faible, mais la concentration moyenne sur l'année est de 9.0 mgO₂/L, soit inférieure aux années précédentes mais encore élevée.

Sur les figures 18 et 22, la limite pointillée indique le seuil des 4 mgO₂/L 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 mg/L O₂; 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 23 montre l'évolution de la profondeur de la limite de la concentration de 4 mgO₂/L depuis 1957. Malgré le faible brassage, la désoxygénéation du fond a été limitée et la dynamique du fond est comparable à celle des années 2003 et 2004 grâce aux derniers brassages complets du lac.

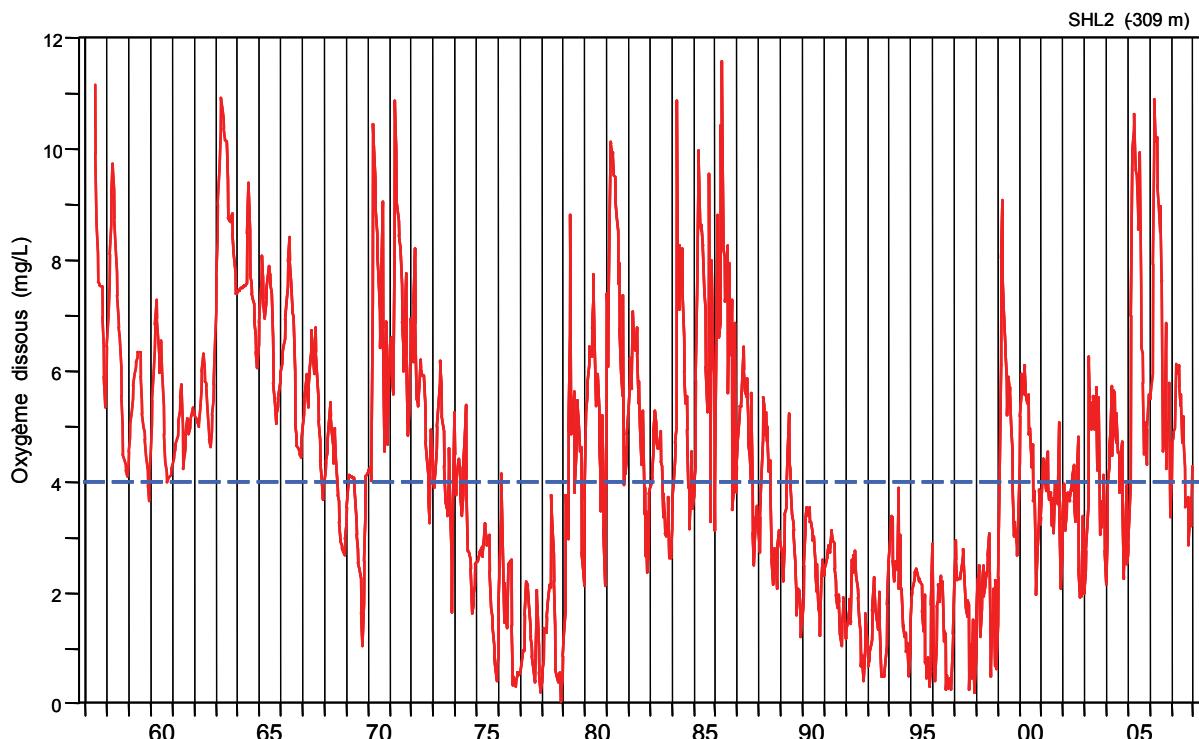


Figure 22 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

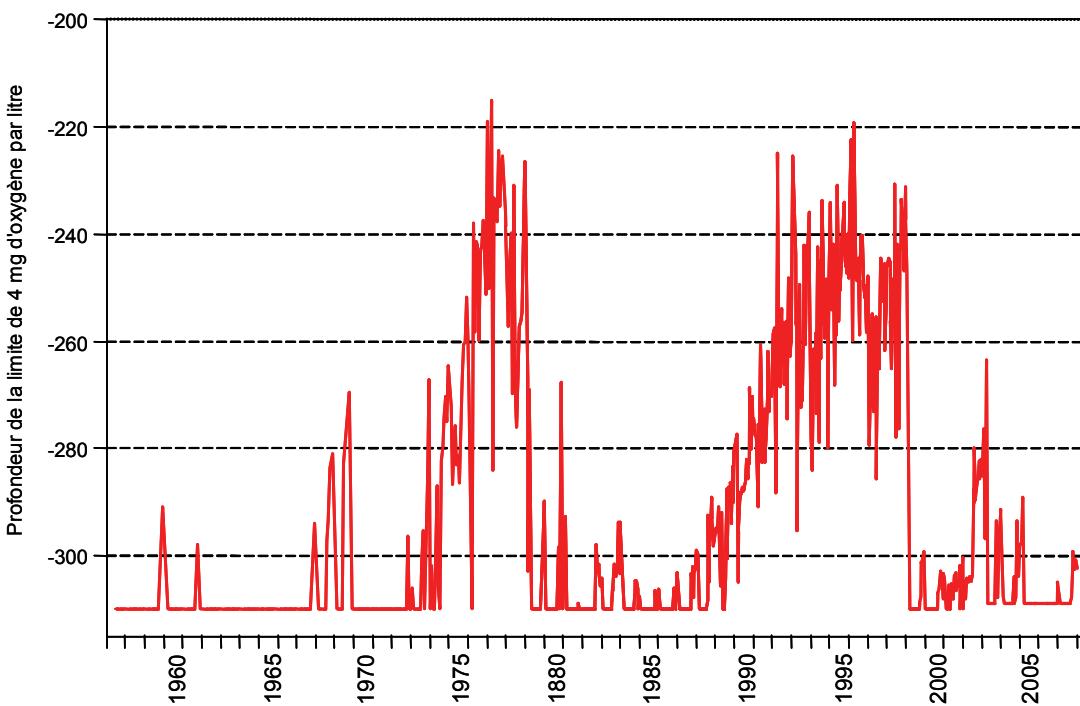


Figure 23 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mgO₂/L dans le Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 23 : Change in the depth of the 4 mgO₂/L threshold in lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5.2 Phosphore dissous et phosphore total

La concentration moyenne annuelle de phosphore continue de diminuer en 2007 et atteint 20.9 µgP/L de phosphate et 25.7 µgP/L de phosphore total, soit une diminution de 7 %. Le stock de phosphore en 2007 est de 2'205 tonnes de P en phosphore total et de 1'795 tonnes de P de phosphate (figure 24).

La tendance depuis 1976 à la diminution continue. Cette tendance est en moyenne de 2.5 % par an. L'objectif est fixé à 20 µgP/L pour limiter raisonnablement la production algale.

La figure 25 indique l'évolution de la concentration en phosphate dans la couche 0 - 100 m depuis 1996.

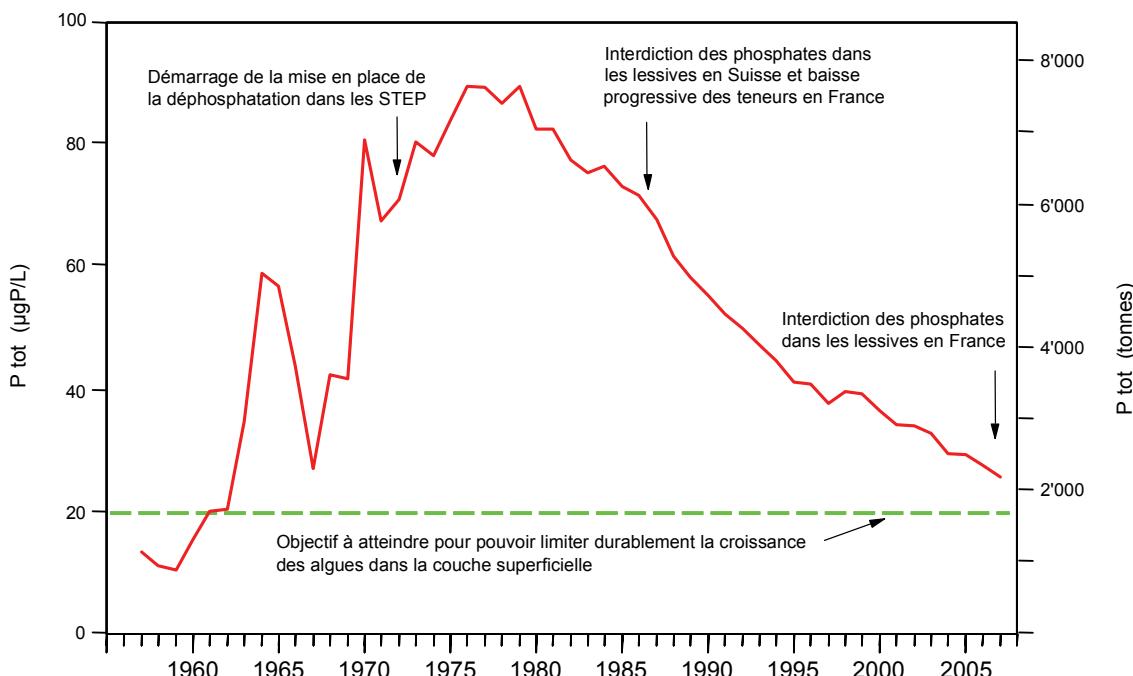


Figure 24 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore total contenu dans le Léman de 1957 à 2007 - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in weighted mean annual total phosphorus concentration and total phosphorus content of the lake Geneva from 1957 to 2007 - Grand Lac (SHL2).

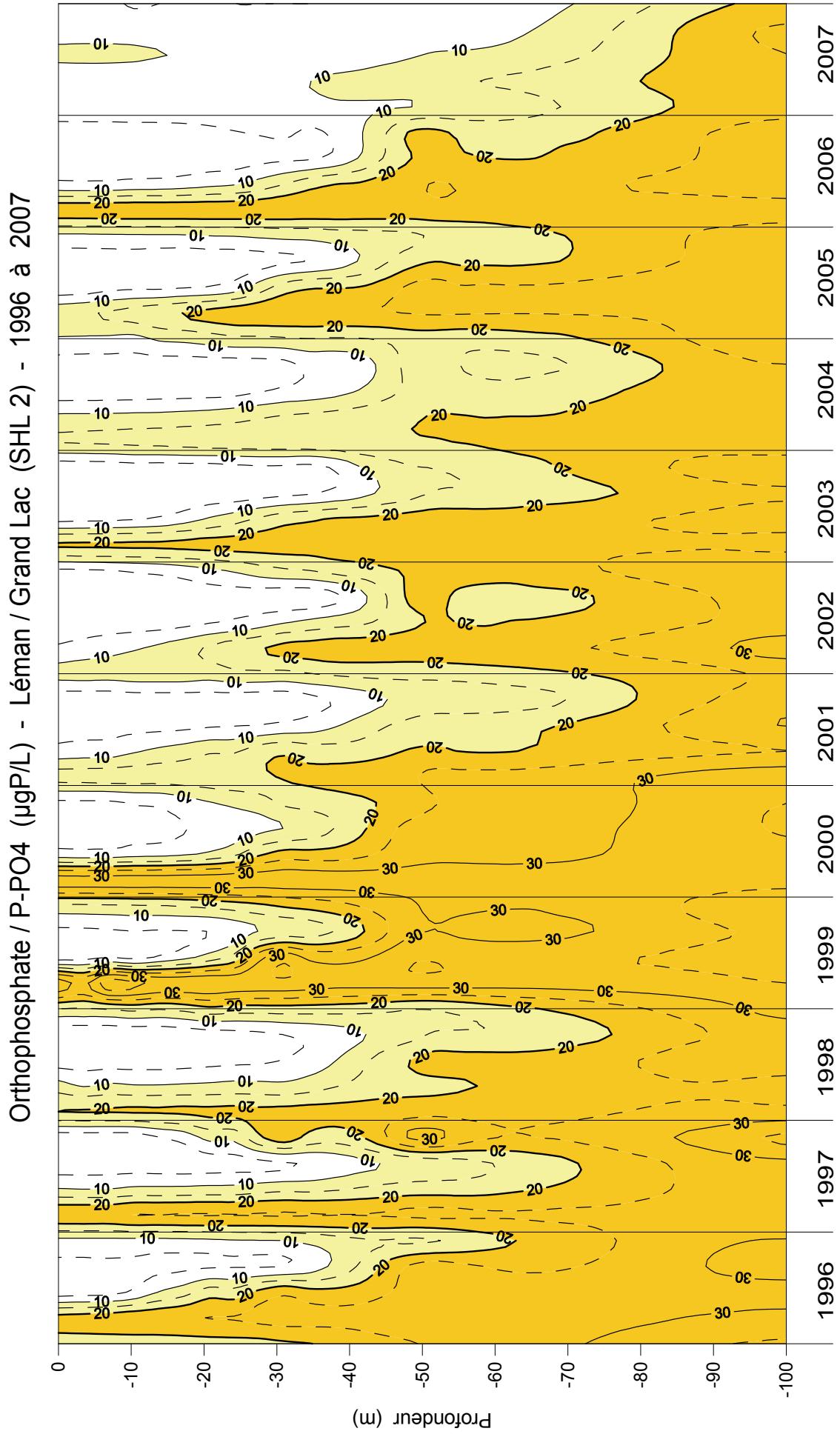


Figure 25 : Concentration of dissolved phosphorus (P-PO_4^{3-}) in the various layers of lake Geneva (SHL2) (dark yellow shaded zone = concentration $> 20 \mu\text{g P/L}$; light yellow shaded zone = concentration between 10 and $20 \mu\text{g P/L}$) (N.B.: depending on how many years are taken into consideration, there may be some very slight differences in the graphical presentation (due to differences in the smoothing of the isothermal curves)).

5.3 Transparence

L'évolution de la transparence depuis 1986 est représentée sur la figure 26. L'année 2007 présente des minima habituels durant le printemps et l'été du fait de l'activité phytoplanctonique, mais le maximum hivernal est faible comme en 2005. De tels maxima hivernaux sont rares dans la chronique.

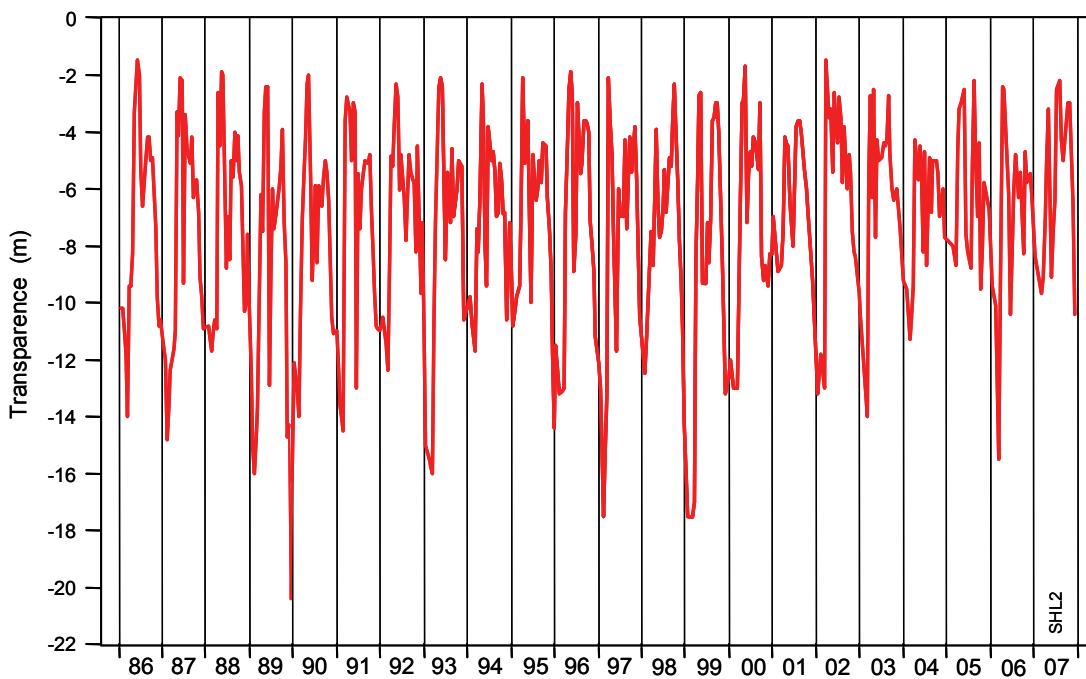


Figure 26 : Evolution de la transparence mesurée avec le disque de Secchi de 1986 à 2007, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 26 : Change in the transparency measured using a Secchi disk from 1986 to 2007, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5.4 Azote nitrique et azote total

La concentration moyenne en azote total est constante depuis les années 1990. En 2007, la concentration moyenne en azote total est de 0.68 mgN/L, soit un stock de 57'980 tonnes de N.

La concentration en azote nitrique est aussi constante avec une teneur moyenne annuelle de 0.59 mgN/L en 2007, soit 2.62 mgNO₃/L (la norme d'eau de consommation en Suisse est de 40 mgNO₃/L et en France de 50 mgNO₃/L).

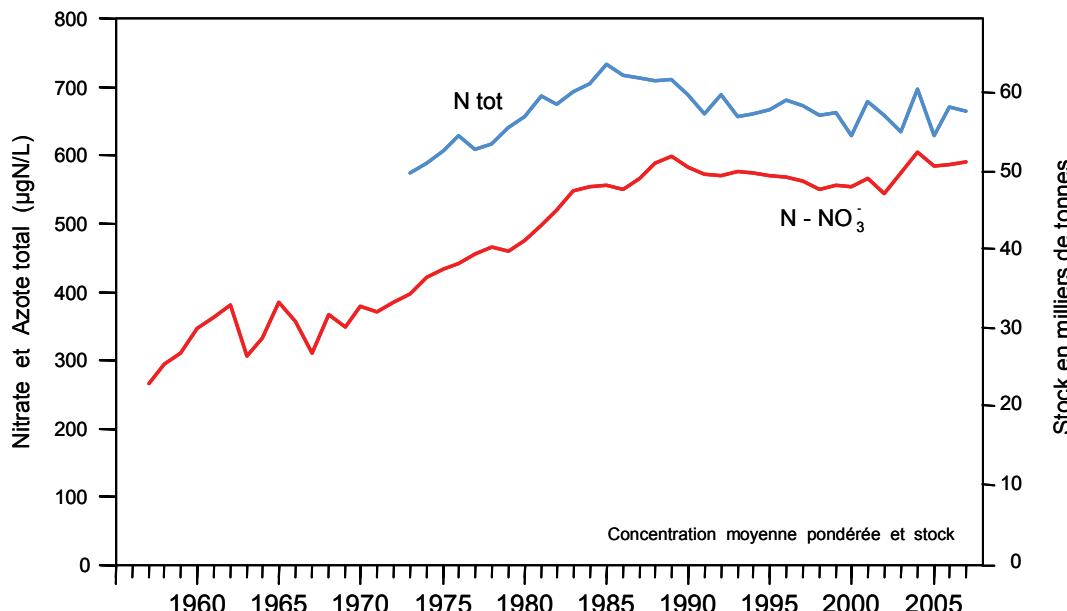


Figure 27 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique contenus dans le Léman de 1956 à 2007, Léman - Grand Lac (SHL2).

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 1956 to 2007, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5.5 Chlorure

Depuis le début des mesures du chlorure dans le Léman en 1971 avec 2.73 mg/L, la teneur du Grand Lac en chlorure est en augmentation quasi linéaire de 2 % par an. En 2007, la concentration moyenne de chlorure est de 8.64 mg/L, soit un stock moyen de 740'610 tonnes de chlorure.

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.

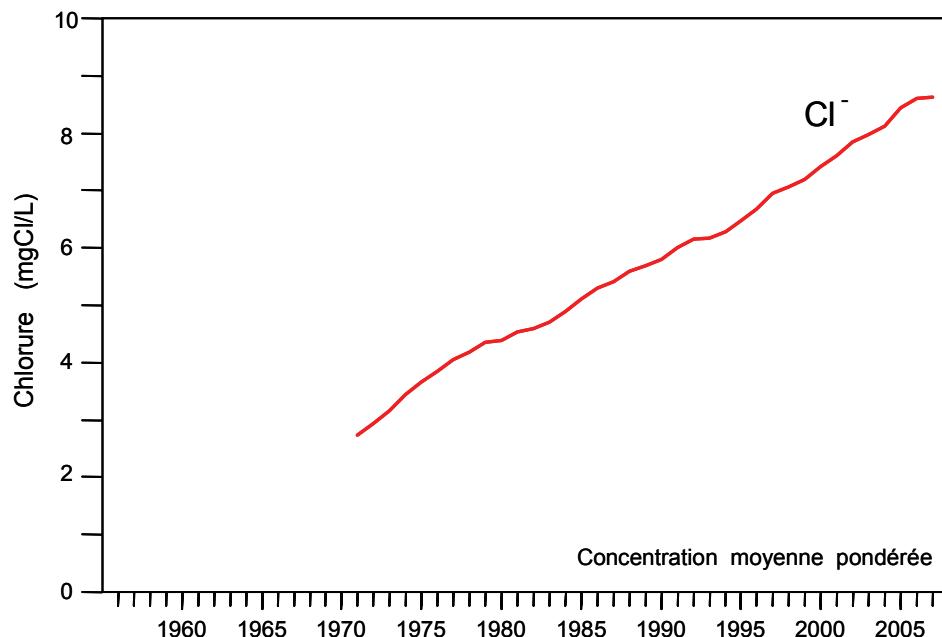


Figure 28 : Evolution de la concentration moyenne annuelle en chlorure, pondérée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2007, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 28 : Change in the weighted mean annual concentration of chloride in the entire mass of the water of the lake from 1971 to 2007, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

6. CONCLUSIONS

Les principales observations en 2007 sont les suivantes :

- L'année se distingue par un hiver chaud ayant permis une production primaire importante dès janvier et un très faible brassage.
- La réoxygénération des eaux du fond par le brassage est quasi-nulle. La concentration maximum atteinte est 6.1 mgO₂/L au mois de mars. Le relargage de phosphore est important à partir du mois d'août et visible jusqu'à 290 m.
- Le phosphore dissous est consommé en quasi-totalité dans les couches superficielles jusqu'à 30 m dès le mois de mai. La couche appauvrie en phosphate est très importante cette année et s'étend jusqu'en fin d'année au-delà de 50 m.

Pour les stocks :

- Le phosphore diminue de 6 % par rapport à 2006 et présente une concentration moyenne de 26 µgP/L en phosphore total, soit un stock de 2'300 tonnes de P.
- Le stock de chlorure est de 740'610 tonnes, soit 8.64 mg/L de Cl⁻.
- L'azote total augmente légèrement et l'azote nitrique est relativement constant par rapport aux années précédentes.

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.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- PERGA, M.-E. et LAINE, L. (2008) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 105-110.
- QUETIN, P. (2008) : Météorologie. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 19-30.
- RIMET, F., DRUART, J.-C. et MOREAU, L. (2007) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 85-95.
- STRAWCZYNSKI, A. (2008) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 163-176.
- TADONLEKE, R. (2008) : Production primaire et biomasse chlorophyllienne dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007, 97-104.

ANNEXE 1
Concentrations moyennes pondérées - Léman (Grand Lac - SHL2)
Mean weighted concentrations

Année	Oxygène mg/l	P tot. µgP/l	PO ₄ µgP/l	N tot. µgN/l	Nminton µgN/l	NH ₄ µgN/l	NO ₂ µgN/l	NO ₃ µgN/l	Cl mgCl/l	C.O.P. µgC/l	Npartic µgN/l	Ppartic µgP/l	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	19.6	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

*: valeur interpolée

ANNEXE 2

Stocks en tonnes - Léman (Grand Lac - SHL2)

Total content in tons

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	50'588	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

* : valeur interpolée