

# ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN

## PHYSICAL-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA

Campagne 2005

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 DU TERRITOIRE, CP 78, CH - 1211 GENÈVE 8

**François RAPIN**

SECRÉTARIAT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN  
CP 80, CH - 1000 LAUSANNE 12

### RÉSUMÉ

*L'hiver 2004-2005 a permis un brassage complet et une réoxygénation totale des eaux du fond, un tel brassage n'a pas été observé depuis 1986. Les concentrations en oxygène dissous des eaux du fond du lac restent supérieures à 4 mgO<sub>2</sub>/L jusqu'à la fin de l'année, ce qui ne s'est pas produit depuis plus de vingt ans.*

*En fin de brassage, le 8 mars 2005, la température du lac était de 5.73 °C tout le long de la colonne d'eau au centre du lac. Une température aussi basse n'avait pas été enregistrée depuis 10 ans. Cependant, la tendance globale au réchauffement de la masse d'eau du lac est toujours vraie à l'échelle des quatre dernières décennies.*

*Dans le Grand Lac, le brassage a permis une redistribution importante des nutriments à partir des eaux du fond; mais, malgré la tendance générale des dernières années, le stock de phosphore n'a pas diminué par rapport à 2004. La concentration moyenne du lac est de 29.4 µgP/L.*

*Le stock d'azote, déjà stabilisé depuis une quinzaine d'années, reste lui aussi constant en 2005. L'azote nitrique est aussi constant depuis les années 1990 avec une teneur moyenne annuelle de 0.58 mgN/L en 2005, soit 2.57 mgNO<sub>3</sub>/L.*

*L'activité phytoplanctonique, accompagnée de la consommation des nutriments en surface, est importante de mars à septembre, masquée pendant une longue et nette période d'eaux claires observée entre le 6 juin et le 4 juillet 2005 du fait du broutage du phytoplancton par le zooplancton. La transparence était de 7.60 m à 8.80 m. Cette période est plus longue et arrive plus tardivement qu'habituellement.*

*Les mesures effectuées sur le Petit Lac de 2001 à 2005 sont présentées dans ce rapport. Le Petit Lac se démarque du Grand Lac par sa plus faible profondeur et par l'existence de brassages complets annuels. Les concentrations en oxygène du fond sont toujours supérieures à 6 mgO<sub>2</sub>/L et le plus souvent supérieures à 8 mgO<sub>2</sub>/L. Les stocks de phosphore sont stables et la concentration moyenne en phosphore total sur les 5 dernières années atteint 21.0 µgP/L.*

### ABSTRACT

*The winter of 2004-2005 produced complete churning and total reoxygenation of the bottom water of the lake; this degree of churning had not been seen since 1986. The concentrations of dissolved oxygen in the bottom water of the lake remained above 4 mg O<sub>2</sub>/L until the end of the year, something that had not happened for more than twenty years.*

*At the end of the churning period, on 8 March 2005, the temperature of the lake was 5.73°C throughout the column of water in the center of the lake. Such a low temperature had not been recorded for 10 years; however, the overall trend towards warming of the mass of water in the lake was still true over the last four decades.*

*In the Grand Lac, the churning produced considerable redistribution of nutrients from the water at the bottom of the lake; however, despite the general trend over recent years, the phosphorus content was no lower than in 2004. The mean concentration in the lake in 2005 was 29.4 µgP/L.*

*The nitrogen content, which had been stable for about fifteen years, also remained unchanged in 2005. Nitric nitrogen has also been constant since the 1990s, with a mean annual content of 0.58 mgN/L in 2005, i.e. 2.57 mgNO<sub>3</sub>/L.*

*Phytoplanktonic activity, accompanied by the consumption of surface nutrients, was considerable from March to September, which was masked for a long and clear period of clear water observed between 6 June and 4 July 2005 due to grazing of the phytoplankton by the zooplankton. The transparency was between 7.60 m and 8.80 m. This period lasted longer and started later than usually.*

*Measurements carried out on the Petit Lac from 2001 to 2005 are presented in this report. The Petit Lac differs from the Grand Lac by being shallower and undergoing complete annual churning. The oxygen concentrations in the bottom water were always above 6 mgO<sub>2</sub>/L and usually over 8 mgO<sub>2</sub>/L. The phosphorus content remained unchanged, and the mean concentration of total phosphorus over the last 5 years was 21.0 µgP/L.*

## 1. MÉTHODES

Les stations de mesure des paramètres physico-chimiques, représentées sur la figure 1, sont :

- SHL2 au centre du Grand Lac entre Evian et Lausanne (coord. CH : 534.70/144.95), correspond à la partie la plus profonde du lac (-309.7 m),
- GE 3 au centre du Petit Lac dans la fosse de Chevrens entre Coppet et Chevrens (coord. : 506.10/128.04) (-71 m).

Ce rapport traitera dans un premier temps de l'étude du Grand Lac en SHL2, puis de l'étude du Petit Lac en GE3.

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 sont calculés à partir des mesures obtenues sur les prélèvements à différentes profondeurs en ce point SHL2 (Annexes 1 et 2).

### • 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 des prélèvements 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 19 campagnes de prélèvements en 2005, réparties selon les dates indiquées dans le tableau 1.

Les prélèvements sont effectués, selon des techniques uniformisées, par l'Institut de Limnologie de Thonon-les-Bains, qui procède également à diverses mesures "in situ". Lors de chaque prélèvement, une sonde 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 profondeur théorique 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). La validité des résultats est testée semestriellement par des analyses interlaboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. En 2005, les résultats des différents laboratoires sont concordants (STRAWCZYNSKI, 2006).

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 multiparamètres immergeable (BLANC et al., 1994).

Tableau 1 : Dates des campagnes de prélèvement.

Table 1 : Dates of the sampling surveys.

Campagne n°	Date	Campagne n°	Date
1	lundi 10 janvier 2005	11	lundi 18 juillet 2005
2	lundi 7 février 2005	12	mardi 9 août 2005
3	mardi 8 mars 2005	13	lundi 22 août 2005
4	lundi 21 mars 2005	14	lundi 5 septembre 2005
5	lundi 4 avril 2005	15	mardi 27 septembre 2005
6	mardi 26 avril 2005	16	lundi 10 octobre 2005
7	mardi 17 mai 2005	17	lundi 24 octobre 2005
8	lundi 6 juin 2005	18	mardi 8 novembre 2005
9	lundi 20 juin 2005	19	lundi 19 décembre 2005
10	lundi 4 juillet 2005		

• **Profondeurs et fréquence d'échantillonnage - station GE3 (Petit Lac)**

Le suivi de la qualité des eaux s'effectue au point GE3 aux profondeurs suivantes :

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

La fréquence de prélèvements est mensuelle.

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

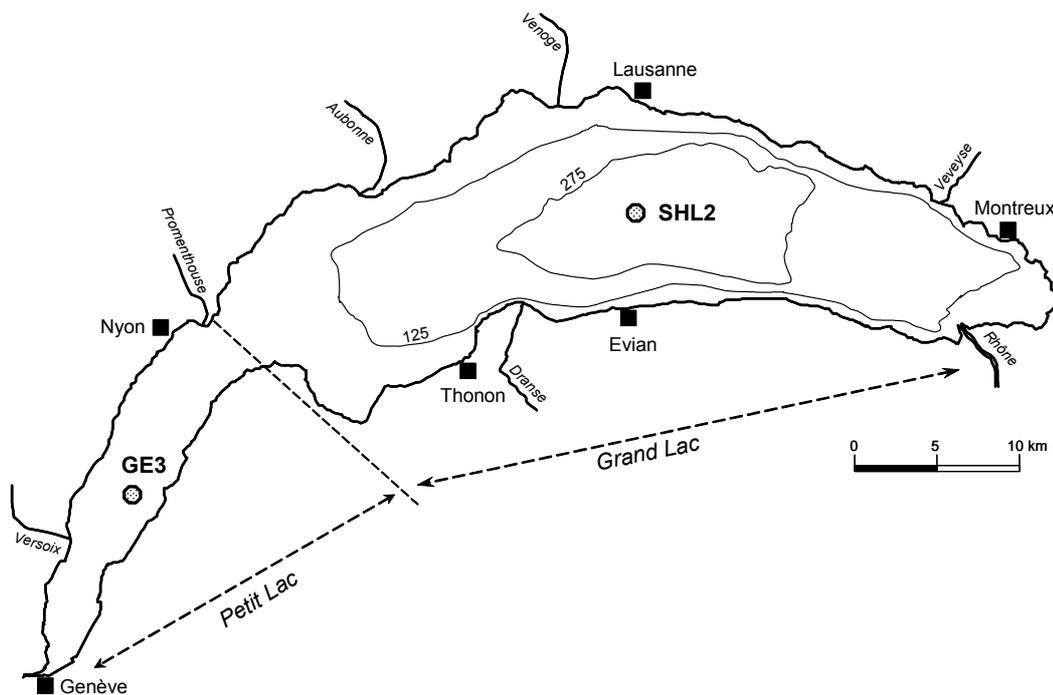


Figure 1 : Situation des points de prélèvement.

Figure 1 : Location of the sampling stations.

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

L'hiver 2004-2005 a été froid, avec au minimum une température de 5.73 °C tout le long de la colonne d'eau à SHL2 lors de la campagne du 8 mars 2005; cette valeur est significativement plus faible que celle des années précédentes (6.0 °C). On constate, toujours lors de la campagne du 8 mars, que les vents forts ont permis un brassage complet de la colonne d'eau déjà homogénéisée thermiquement. Le profil physico-chimique de la colonne d'eau en SHL2 lors du brassage est représenté sur la figure 2 : la température, la conductivité et l'oxygène dissous sont homogènes de la surface au fond du lac.

Ainsi la colonne d'eau a été entièrement réoxygénée jusqu'au fond et on mesure une concentration en oxygène dissous à 309 m de 10.02 mgO<sub>2</sub>/L. Les nutriments ont été redistribués sur toute la colonne d'eau. Un tel brassage n'avait pas eu lieu depuis 1986 et le dernier brassage a eu lieu en 1999, mais n'avait pas permis une réoxygénation des eaux profondes aussi importante.

La réoxygénation des eaux du fond a continué après le brassage pour atteindre un maximum en oxygène dissous le 4 avril 2005 avec 10.64 mgO<sub>2</sub>/L, soit beaucoup plus important que les années précédentes où le maximum était de l'ordre de 6 mgO<sub>2</sub>/L.

Les figures 3 à 7 représentent l'évolution saisonnière et interannuelle de la température du lac. On remarque que le début de l'année comporte 4 semaines de température moyenne de l'air négative (figure 3a), soit beaucoup plus que les 5 années précédentes, ce qui explique l'important refroidissement des eaux (figure 4) par rapport à la précédente décennie. Les températures de fin d'année permettront un brassage complet durant l'hiver 2005-2006. A contrario, la tendance de la température moyenne de l'eau du lac à 5 m entre 1970 et 2005 est toujours légèrement à la hausse, de l'ordre de 4 % par an (figure 5). Les températures estivales des couches superficielles (0 à 20 m) sont habituelles, de l'ordre de 23 °C en surface au maximum (figure 6).

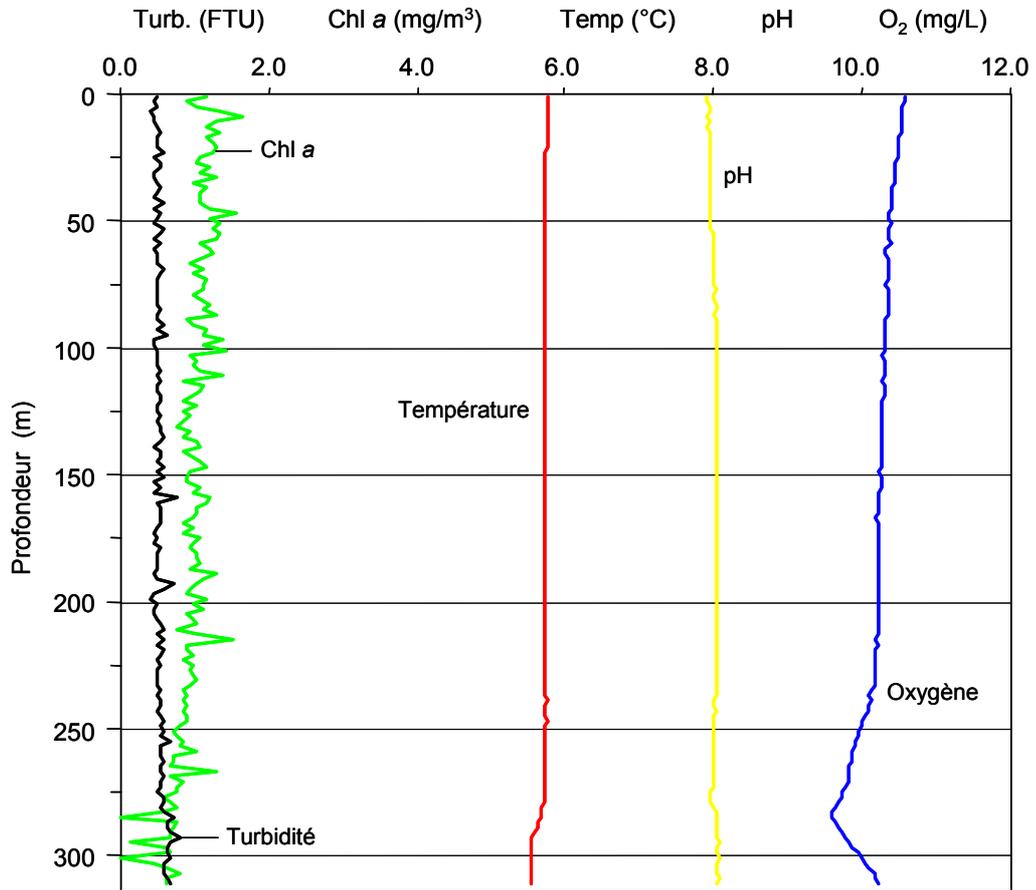


Figure 2 : Profil à SHL2 mesuré avec une sonde multiparamètres lors du brassage (08.03.2005).

Figure 2 : Multi-parameter Water Quality Logger profile during churning at SHL2 (08 March 2005).

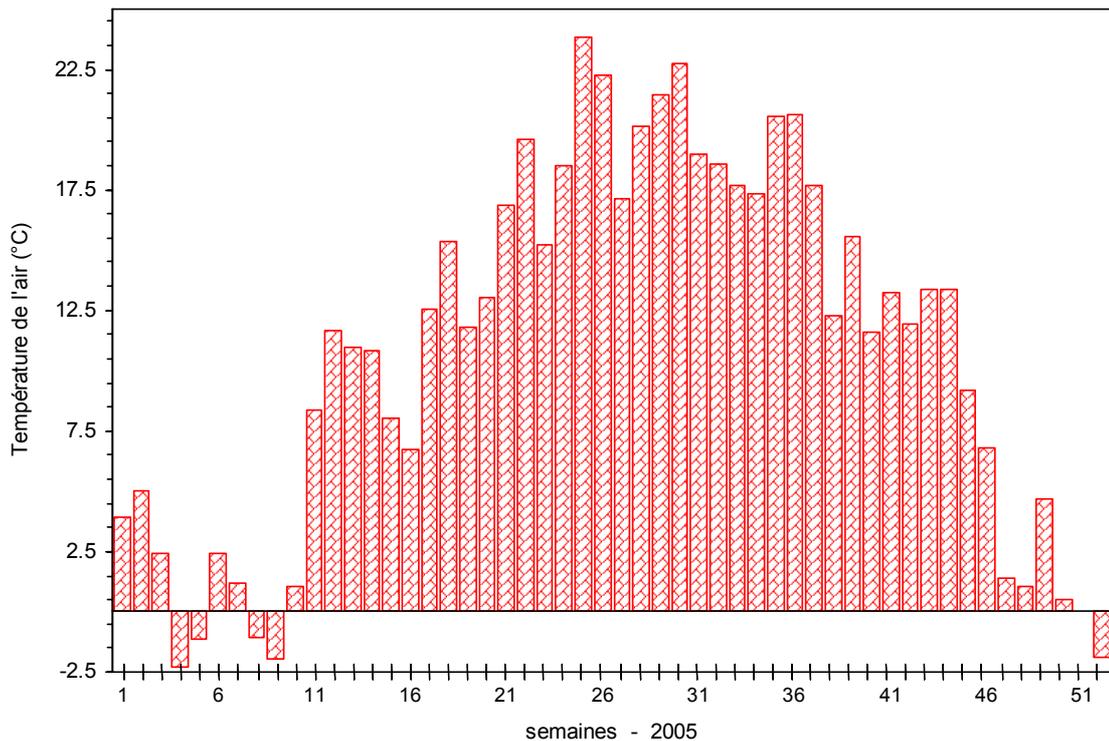


Figure 3 a : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully en 2005.

Figure 3 a : Mean weekly air temperature at the Pully station in 2005.

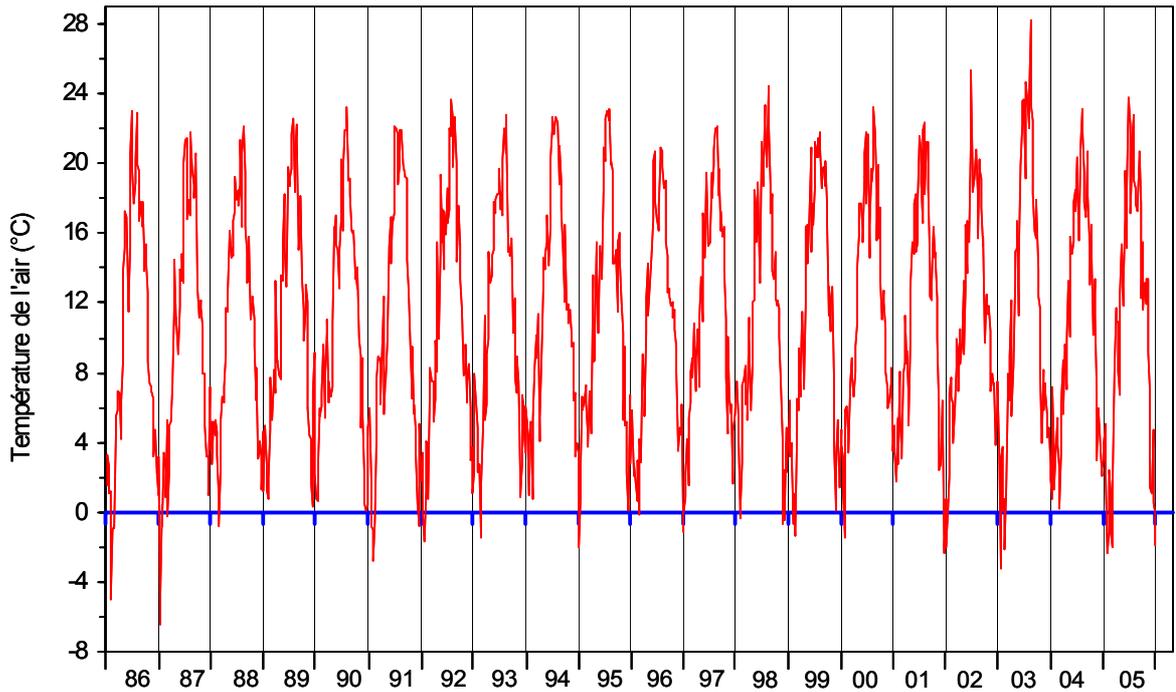


Figure 3 b : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully de 1986 en 2005.

Figure 3 b : Mean weekly air temperature at the Pully station from 1986 to 2005.

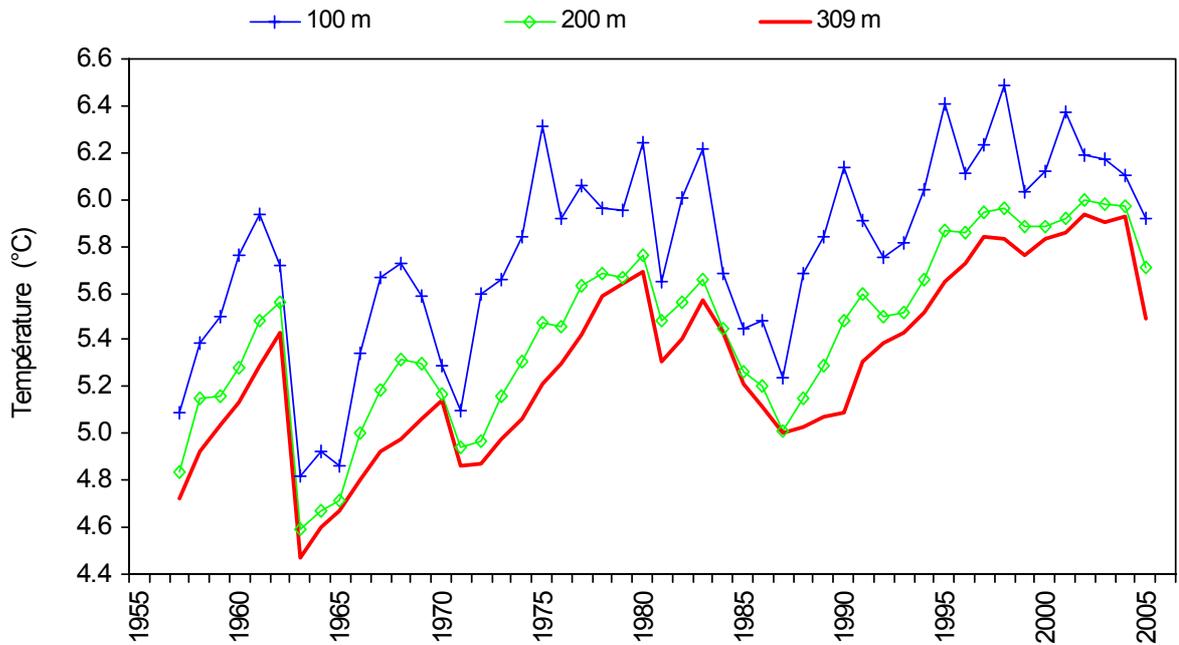


Figure 4 : Evolution de la température moyenne de l'eau à 100, 200 et 309 mètres de profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

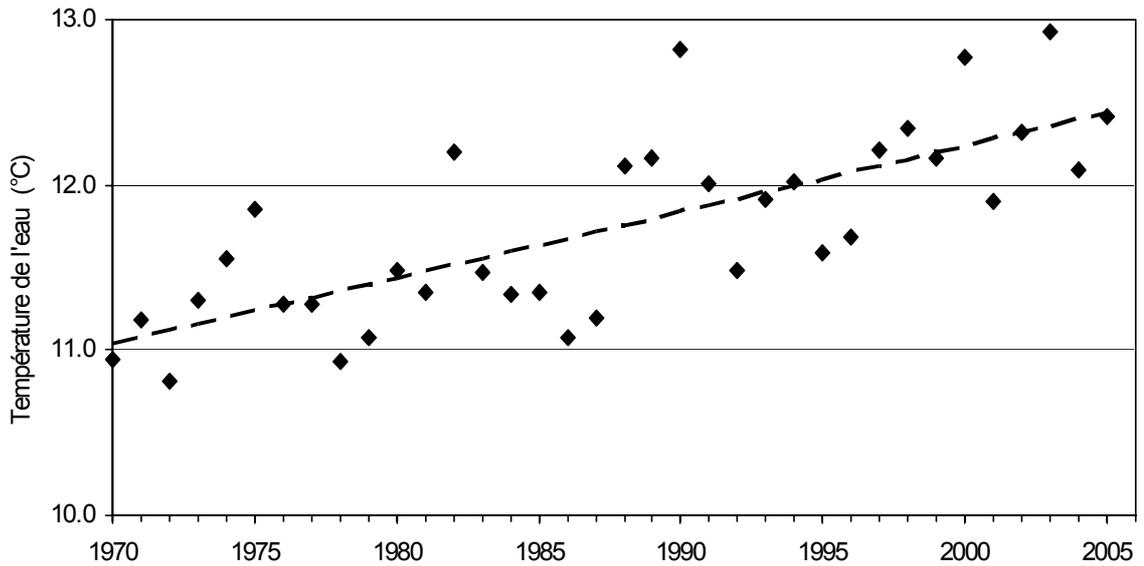


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du Léman à 5 mètres de profondeur - Grand Lac (SHL2)

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

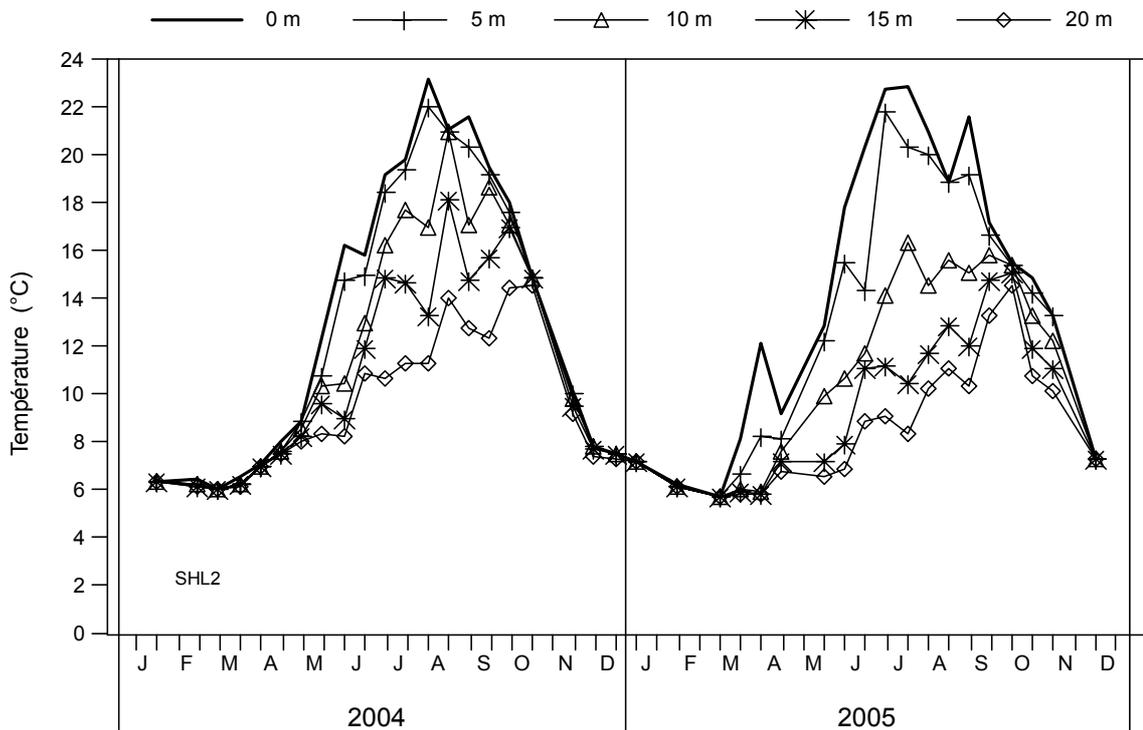


Figure 6 : Température de l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) Léman - Grand Lac (SHL2).

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

La figure 8 représente l'évolution de la température depuis 1996 de la colonne d'eau du lac à SHL2. On observe entre chaque brassage partiel (1996, 1999), un approfondissement de la couche à 6 °C lié au réchauffement des couches superficielles. Le brassage complet de 2005 permet de remonter significativement le niveau de cette couche.

### 3. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Comme nous l'avons vu précédemment, le brassage hivernal de mars 2005 a permis un renouvellement total des nutriments en provenance des couches profondes. La concentration en orthophosphate est remontée à 24 µgP/L en mars 2005 dans les couches superficielles, soit légèrement plus que les années précédentes (de 20 à 22 µgP/L) (figures 8 et 9).

Parallèlement, l'azote nitrique est remonté à 630 µgN/L (figure 10) et la silice dissoute à 2.78 mg/L (figure 11) dans les couches superficielles, et sont distribués de façon quasi-homogène le long de la colonne d'eau, en début mars. Le brassage complet a permis une concentration en silice en surface très importante par rapport aux années précédentes (1.5 mg/L).

La transparence de début d'année est relativement faible, comparativement aux années précédentes, et atteint 8,70 m en début mars, contre des transparences de l'ordre 12 à 14 m pour les années précédentes; ainsi la transparence maximale en 2005 est observée après l'activité estivale lors de la campagne du 10 octobre avec 9.50 m (figure 12).

On observe le démarrage de l'activité photosynthétique lors de la campagne suivant le brassage le 21 mars 2005, avec une légère diminution des nutriments (orthophosphate de 24 à 15 µgP/L; nitrate de 630 à 440 µgN/L et silice de 2.78 à 1.53 mg/L) en surface (figures 9 à 11) et une augmentation notable du carbone organique particulaire (de 107 à 354 µgC/L; figure 16). La transparence diminue aussi fortement (de 8.70 à 4.60 m) lors de cette prolifération algale. Cette activité se poursuit le 4 avril 2005 : on observe déjà une concentration en orthophosphates de l'ordre de µgP/L de 0 à 10 m, puis la consommation des orthophosphates atteint les 35 m entre août et septembre (figure 25). L'activité photosynthétique se maintient de manière importante jusqu'à fin septembre (figure 13).

La photosynthèse fournit donc dès le 21 mars de l'oxygène dans l'épilimnion et entraîne progressivement une sursaturation importante avec au maximum 15.2 mgO<sub>2</sub>/L à 5 m le 4 avril 2005, soit relativement plus importante qu'en 2004 (12.1 mgO<sub>2</sub>/L) et 2003 (13.5 mgO<sub>2</sub>/L). Cette sursaturation diurne est observée jusqu'au mois de septembre et est plus importante que les années précédentes (figure 14).

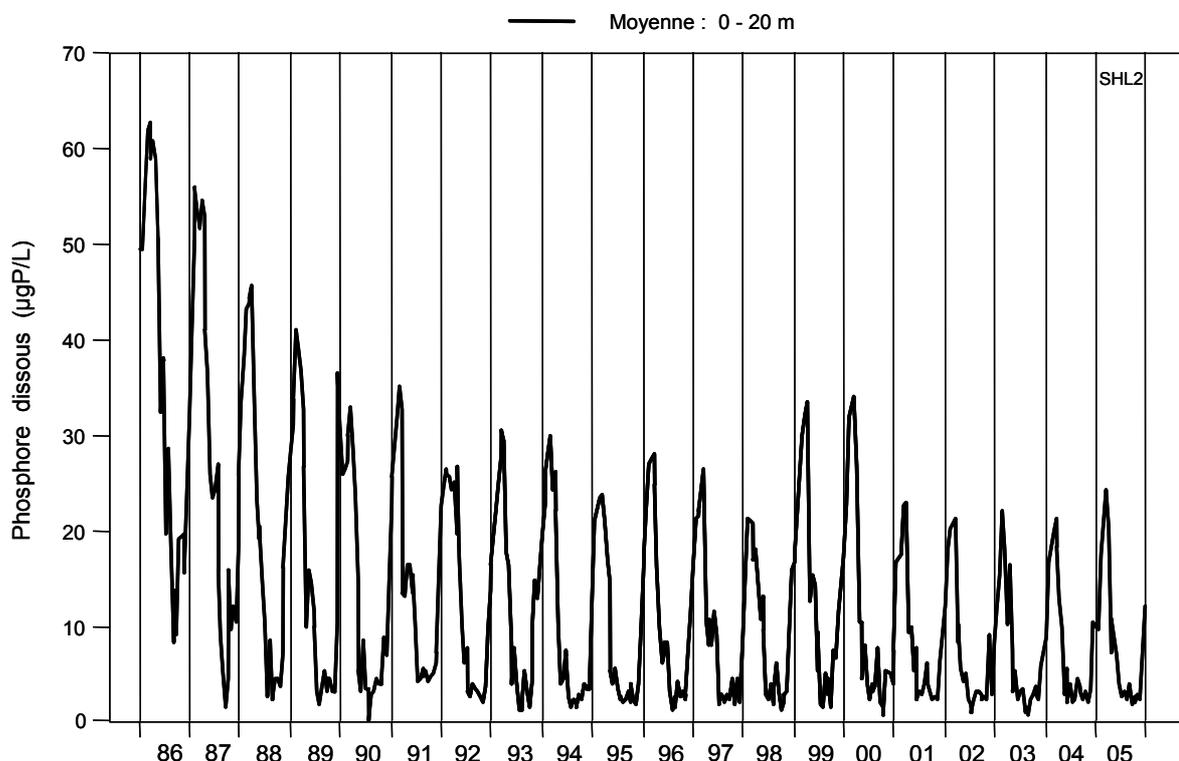


Figure 7 : Concentration en phosphore dissous (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des eaux de la couche superficielle (moyenne 0-20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 7 : Concentration of dissolved phosphorus P- (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in the surface water (mean 0-20 m) of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

# Température (°C) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2005

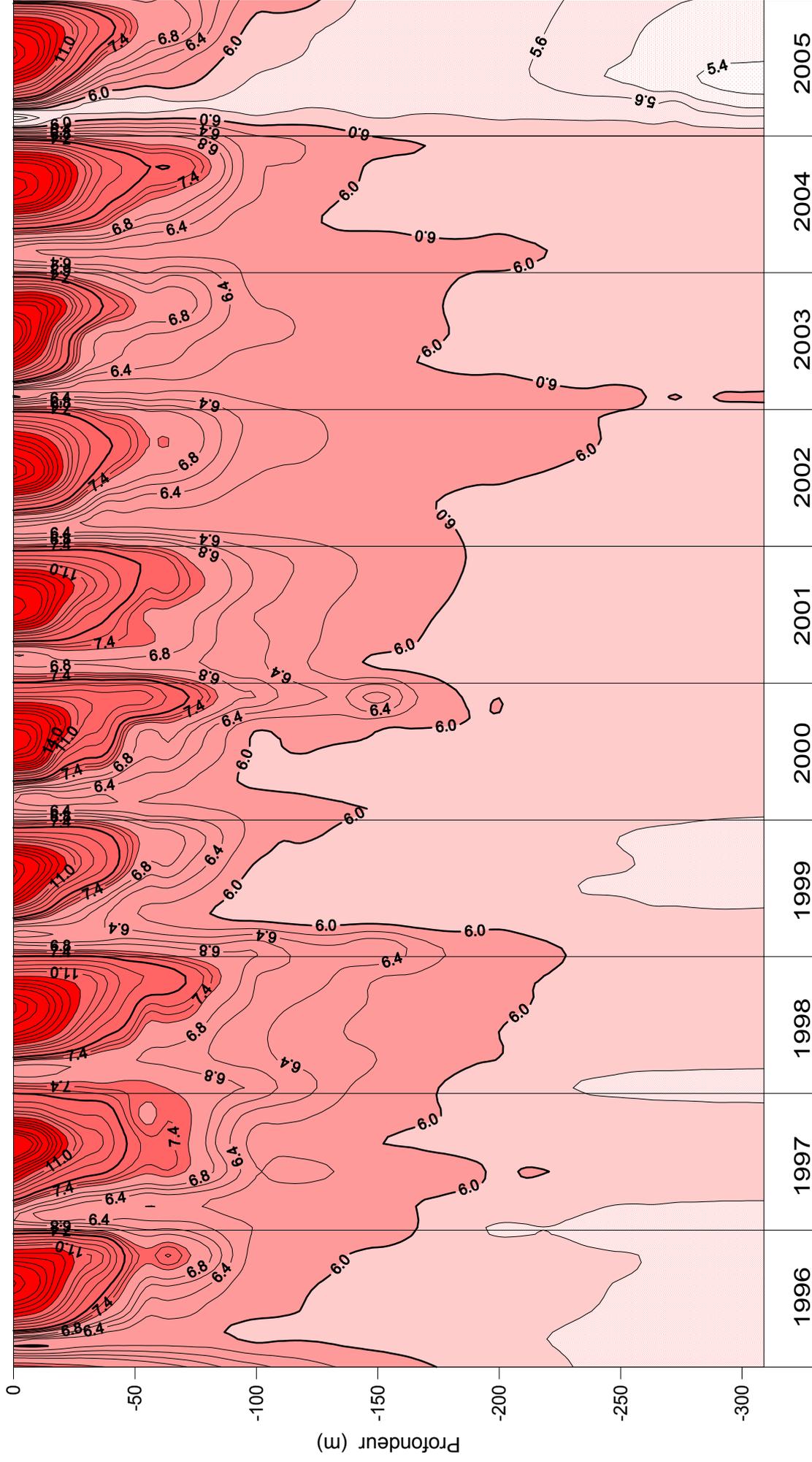


Figure 8 : Température des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de présentation graphique peuvent apparaître (différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 8 : 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)).

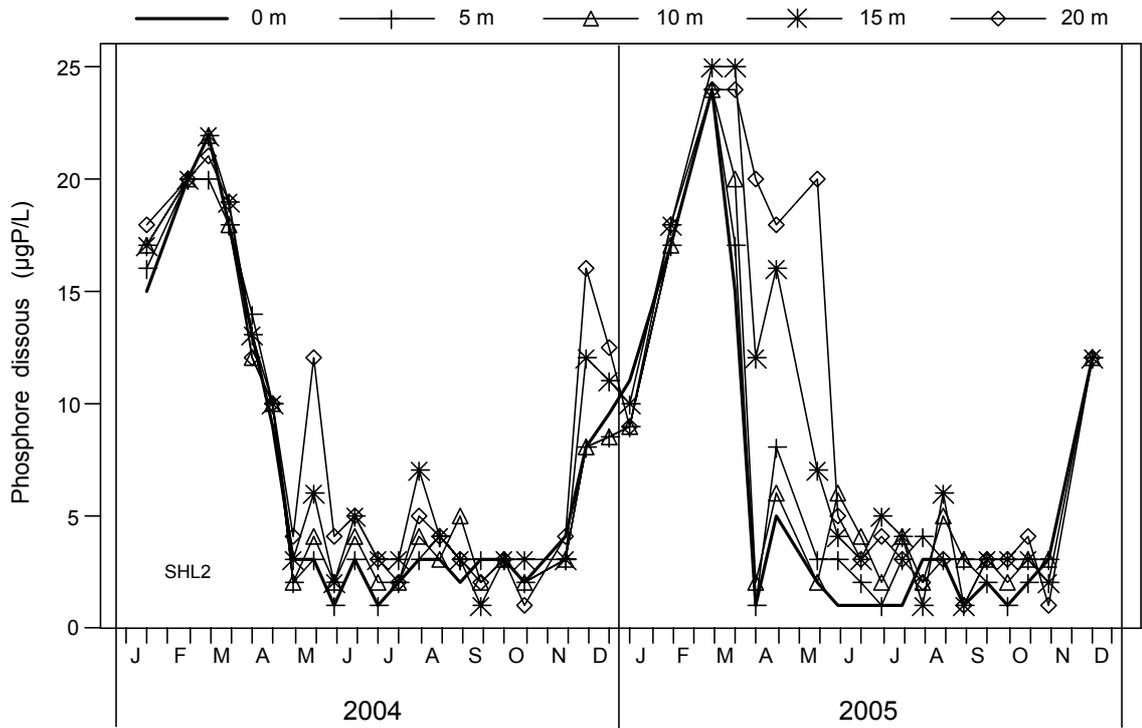


Figure 9 : Concentration en phosphore dissous (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 9 : Concentration of dissolved phosphorus (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in the surface water (0, 5, 10, 15 and 20 m) of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

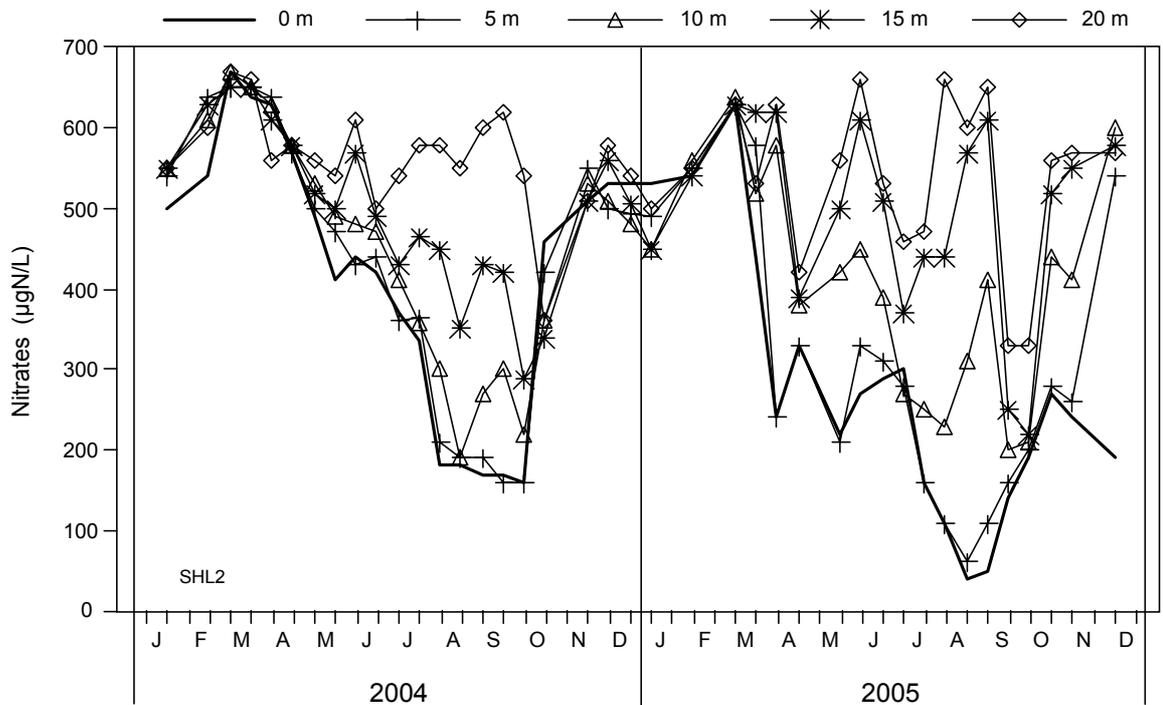


Figure 10 : Concentration en nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 10 : Concentration of nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) in the surface water (0, 5, 10, 15 and 20 m) of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

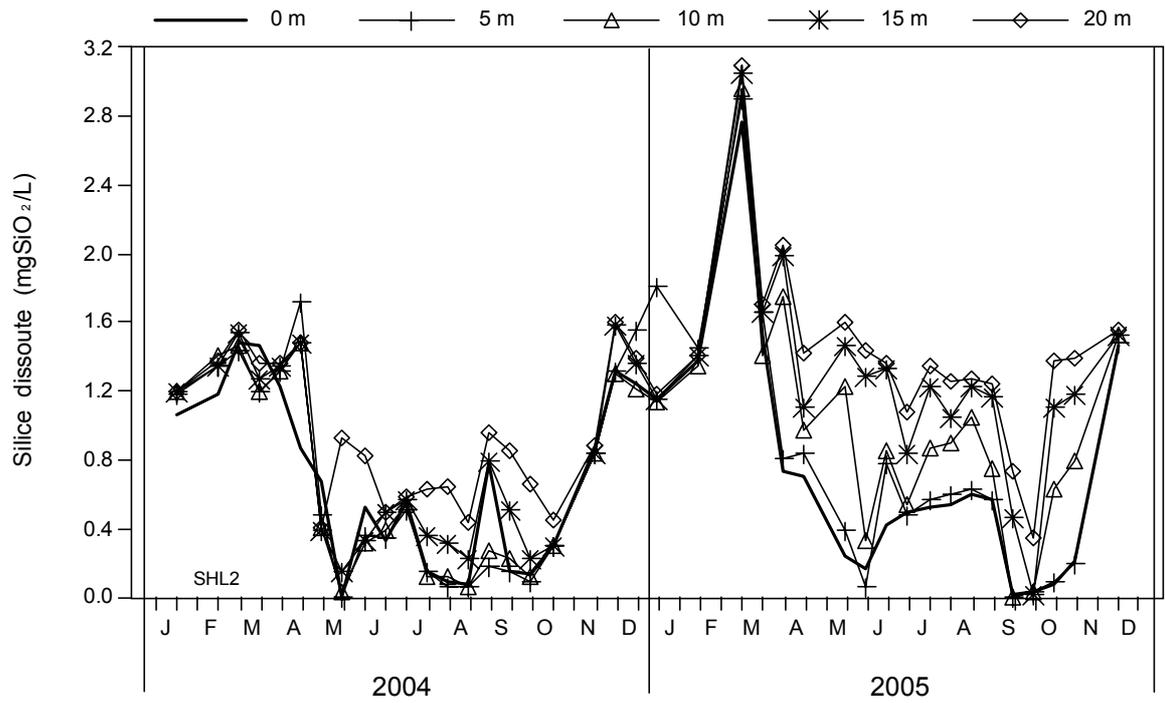


Figure 11 : Concentration en silice ( $\text{SiO}_2$ ) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 11 : Concentration of dissolved silica ( $\text{SiO}_2$ ) in the surface water (0, 5, 10, 15 and 20 m) of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

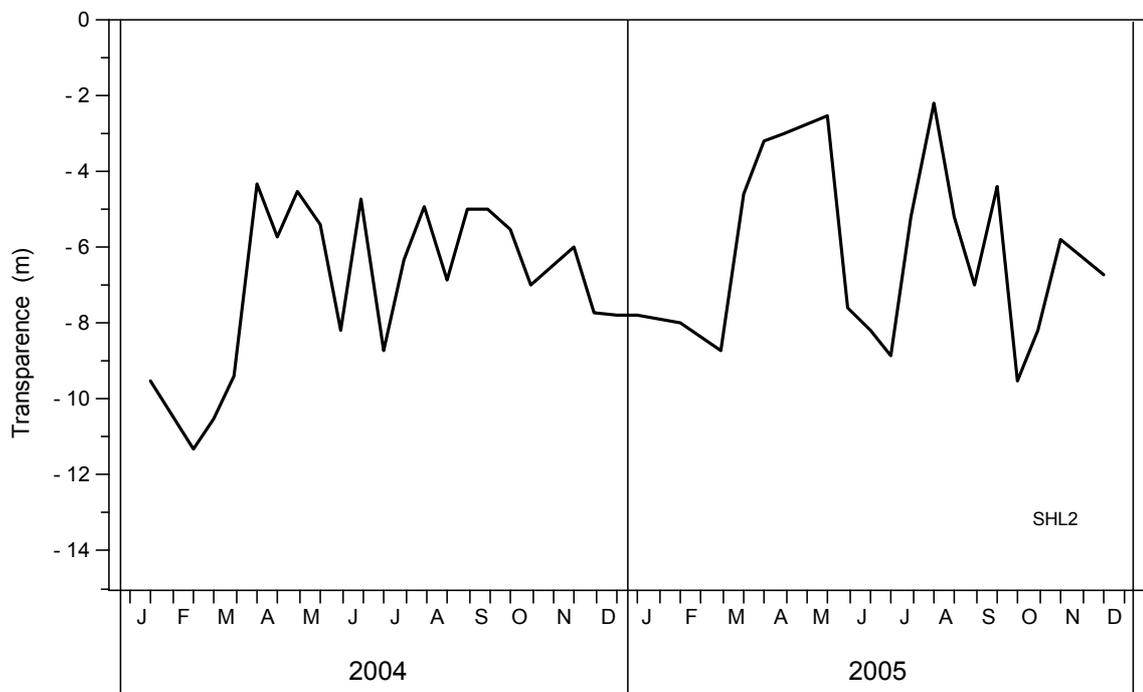


Figure 12 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

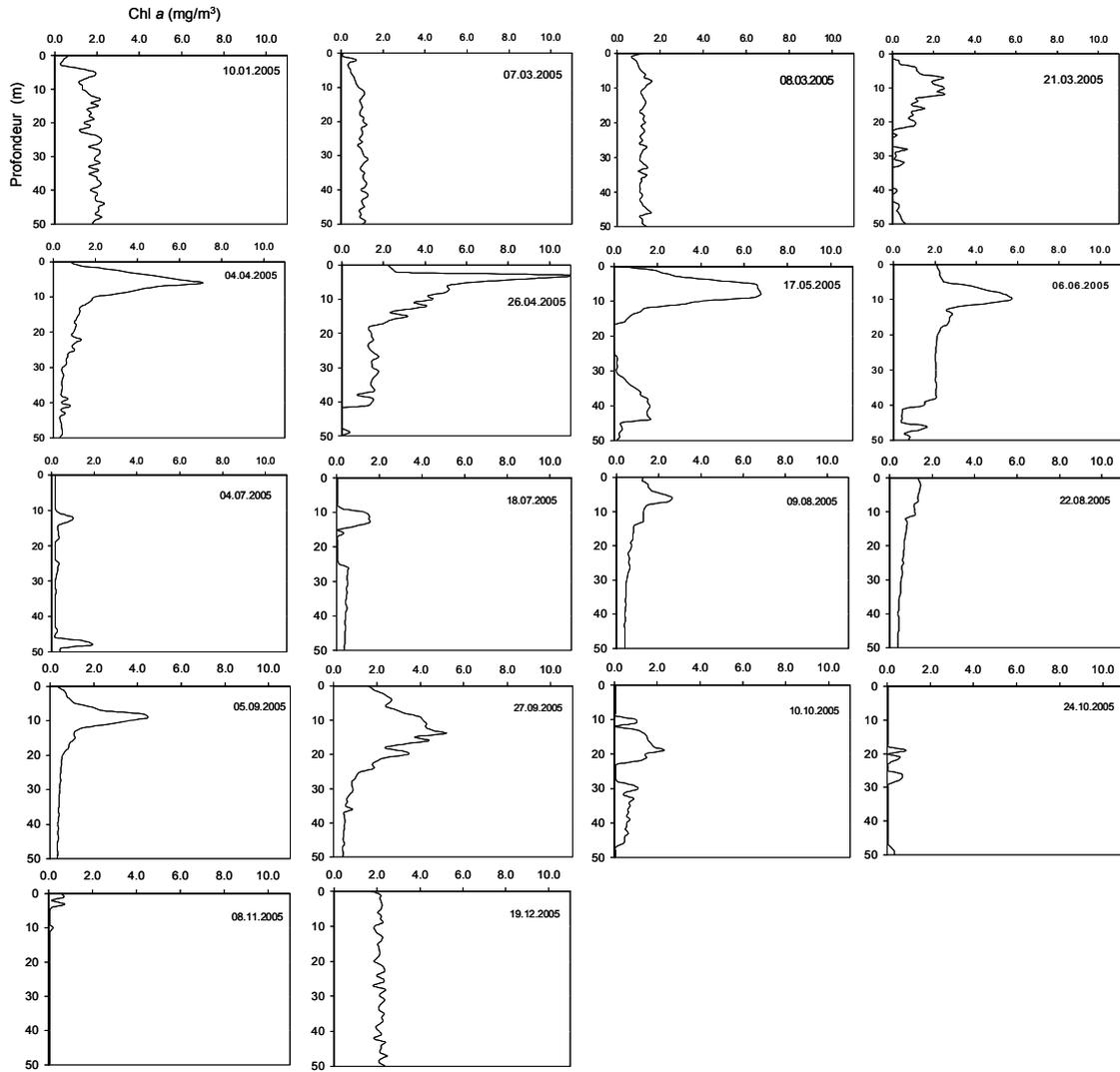


Figure 13 : Evolution de la concentration en chlorophylle a dans les 50 premiers mètres, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 13 : Change in the concentration of chlororophyll a in the first 50 meters, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

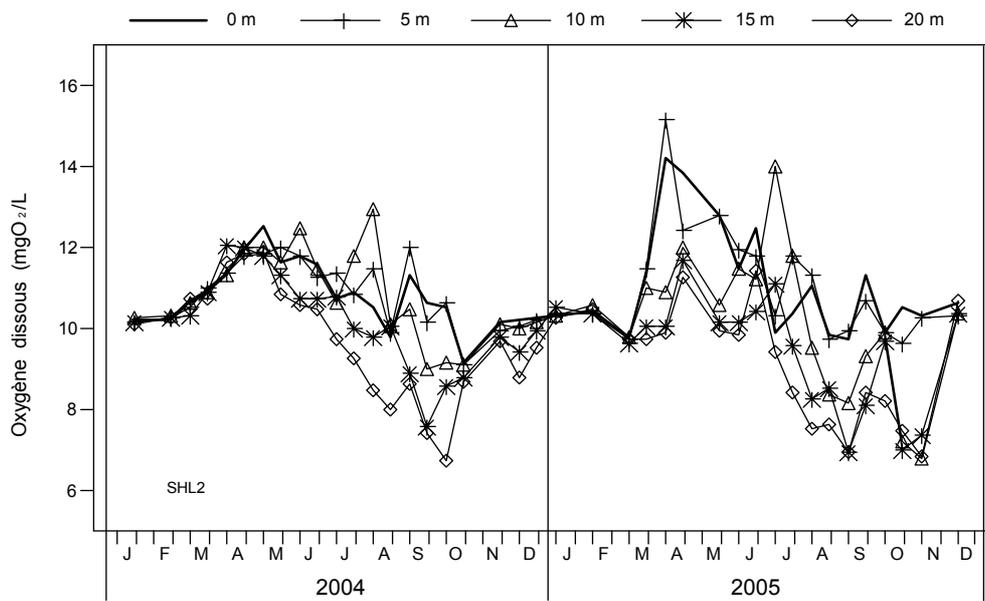


Figure 14 : Concentration en oxygène dissous des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Après le démarrage de l'activité phytoplanctonique, le zooplancton se développe, broute les algues, entraînant une augmentation de la transparence : c'est la période des "eaux claires" (figure 12). Cette période est observée entre la campagne du 6 juin et la campagne du 4 juillet 2005 avec une transparence de 7.60 m à 8.80 m. Cette période est plus longue et arrive plus tardivement qu'habituellement.

Dans son cycle biologique, le zooplancton rejette de l'azote ammoniacal : les pics d'azote ammoniacal observés dans les couches superficielles semblent indiquer que le zooplancton a commencé à se développer à partir de mi avril avec des concentrations de l'ordre de 20 µgN/L et continue jusqu'au mois de septembre avec un maximum observé le 9 août à 15 m avec 73 µgN/L (figure 15 et ANNEVILLE et al., 2006). Ces pics d'azote ammoniacal indiquent une activité zooplanctonique beaucoup plus importante que les années précédentes, par leurs fortes valeurs et la durée de ces excrétions, cependant cette observation n'est pas confirmée par les mesures de zooplancton. En effet les comptages de zooplancton pour l'année 2005, bien que non réalisés sur l'ensemble des campagnes, n'indiquent pas de variation significative par rapport à 2004 (ANNEVILLE et al., 2006).

Après l'important broutage des algues par le zooplancton lors de la période des eaux claires, l'activité phytoplanctonique redémarre en juillet, entraînant une rechute des nutriments azote nitrique et silice (figures 10 et 11), l'orthophosphate étant déjà fortement consommé à partir du mois de juin (figure 9). La consommation des nutriments atteint la couche des 35 m (figure 25).

Cette activité est accompagnée d'un pic en carbone particulaire et en azote particulaire qui atteint un maximum lors de la campagne du 26 mars 2005 avec des valeurs supérieures aux années précédentes (figure 16).

Les températures estivales des couches superficielles en 2005 sont habituelles et n'expliquent pas l'importante activité phytoplanctonique (figure 3b).

Ces fortes consommations de nutriments jusqu'à 35 m de mi-mars à fin septembre et la sursaturation en oxygène dissous, continue et importante de mars à septembre, indiquent une production algale significativement importante cette année 2005, ce qui est confirmé par le suivi du carbone organique particulaire qui est supérieur à celui de 2005 (figure 16). Cela peut être expliqué, entre autres, par le brassage total qui a remis à disposition un stock plus important de nutriments au printemps. Le suivi du phytoplancton indique en effet une activité printanière beaucoup plus élevée que les années précédentes, mais une activité estivale relativement plus faible.

La figure 17 représente le rapport  $N_{\text{minéral}} / PO_4$  sur la couche 0-20 m, soit le rapport N/P disponible pour la production photosynthétique. On remarque que ce rapport augmente rapidement au printemps pour rester élevé toute l'année, du fait de la consommation quasi-totale du phosphore par rapport à l'azote, cela explique l'importante biomasse, à ces périodes, des cyanobactéries qui sont adaptées à un tel milieu.

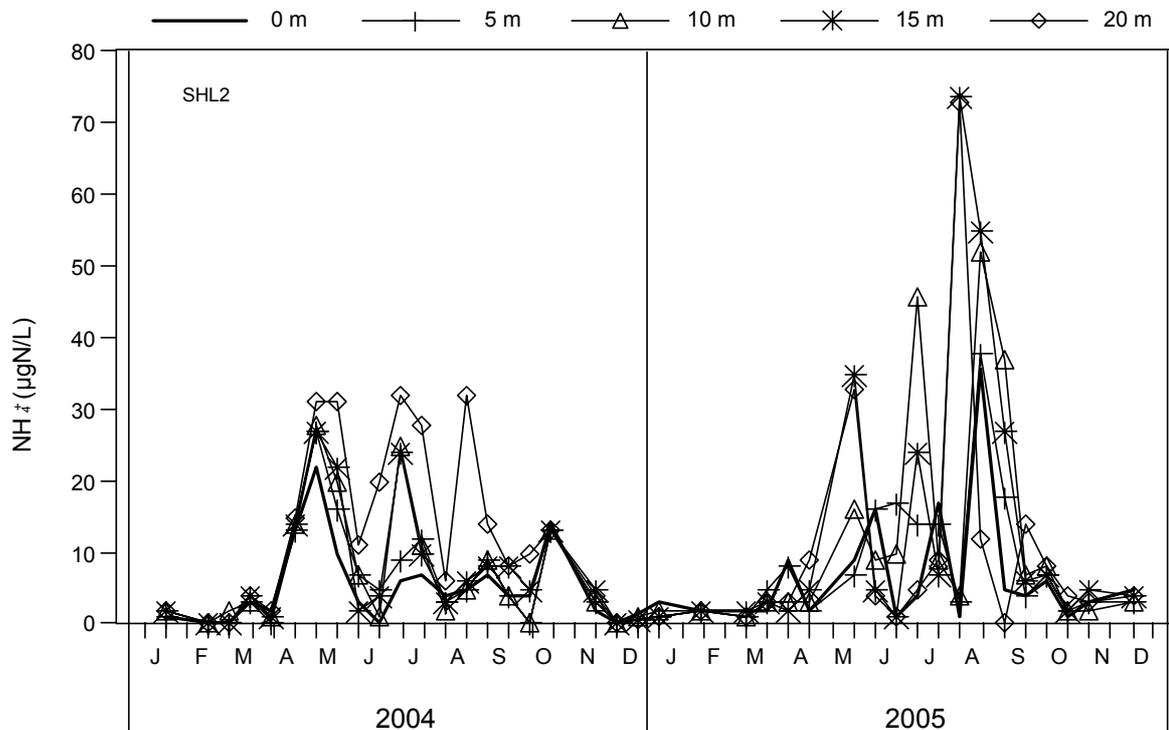


Figure 15 : Concentration en azote ammoniacal des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

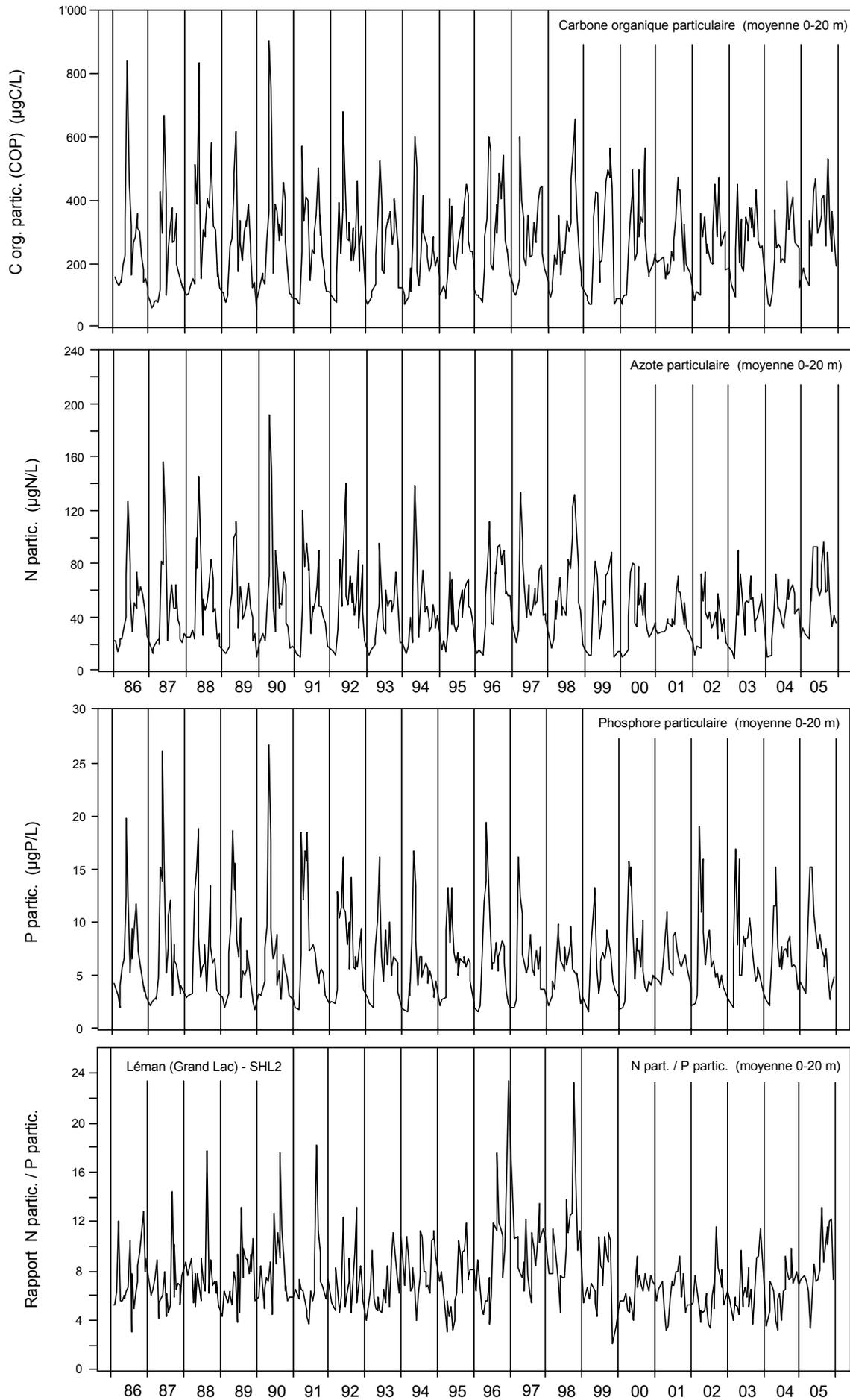


Figure 16 : Concentrations en carbone organique, azote et phosphore particulaires des eaux de la couche superficielle (0-10 m) et rapport Nparticulaire / Pparticulaire, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 16 : Concentrations of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus, as well as the N : P (particulate) ratio in the surface water (0-10 m) of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

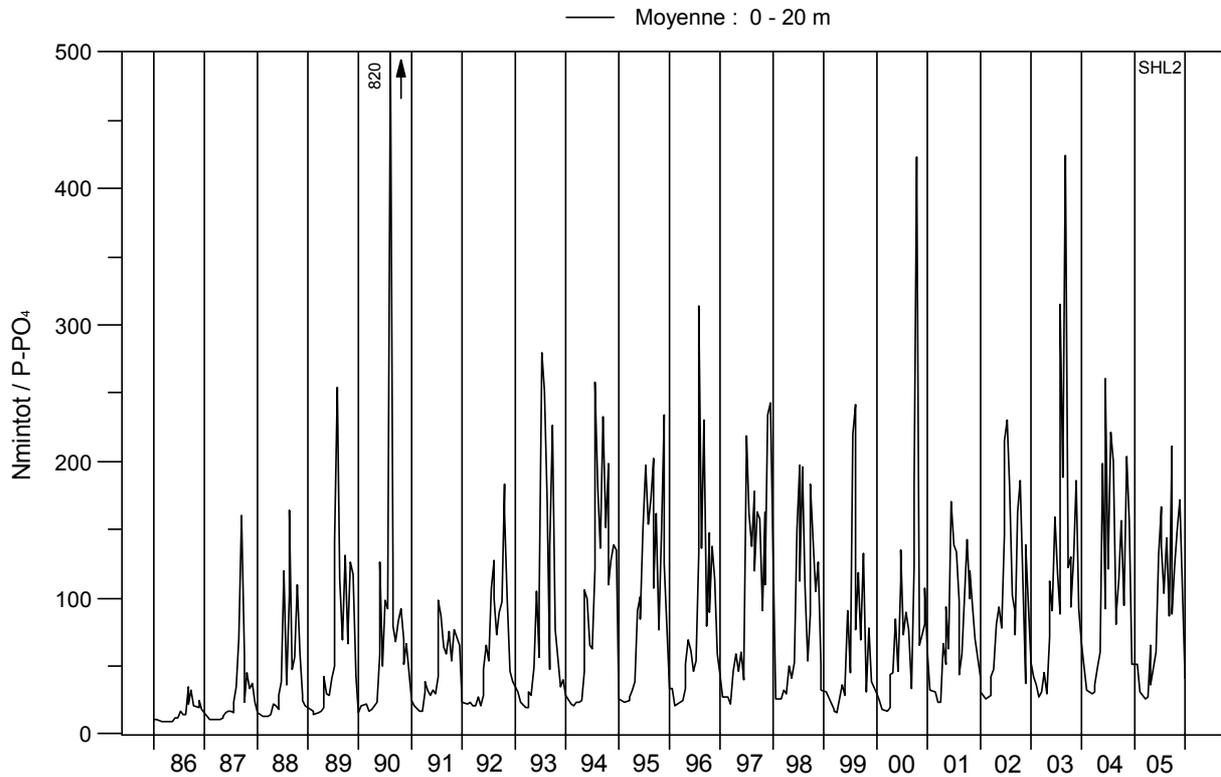


Figure 17 : Rapport Nminéral / P-PO<sub>4</sub>, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 17 : Nmineral / P-PO<sub>4</sub> ratio in Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

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

Du fait du brassage complet de l'hiver 2004-2005, les eaux du fond ont subi une réoxygénation du même ordre que lors du brassage de 1986 (figure 18) : la concentration en oxygène dissous au fond du lac atteint donc 10.64 mgO<sub>2</sub>/L le 4 avril 2005. L'oxygénation du fond se maintient aux environs de 5 mgO<sub>2</sub>/L durant toute l'année, avec 5.59 mgO<sub>2</sub>/L lors de la campagne du 12 décembre 2005, soit plus que l'oxygénation observée après une majorité de brassages partiels.

Malgré une oxygénation importante des eaux profondes, on observe la réduction des sels de manganèse et leur diffusion à partir des sédiments jusqu'à une concentration maximum élevée le 27 septembre 2005 de 216 µg/L (figure 21). Cette diffusion entraîne la remise en solution d'orthophosphate contenu dans les sédiments (figure 19), ce qui entraîne un léger pic de turbidité. Cette diffusion est toutefois plus faible que les années précédentes avec au maximum 74 µgP/L lors de la même campagne, contre des concentrations de l'ordre de 90 µgP/L les années précédentes. La diffusion du fer est complètement inhibée par l'oxygénation des couches profondes.

Une estimation de la quantité d'orthophosphate relarguée au fond du lac donne un maximum de 30 tonnes de phosphore lors de la campagne du 19 décembre, soit deux fois moins qu'en 2004 et du même ordre qu'en 2003, et moins de 2 % des apports externes de phosphore (QUETIN, 2006). Le brassage de l'hiver 2005-2006 va redistribuer dans toute la colonne d'eau ce phosphore relargué.

Après le brassage de l'hiver 2004-2005, la température des eaux du fond reste très stable à 5.4 °C.

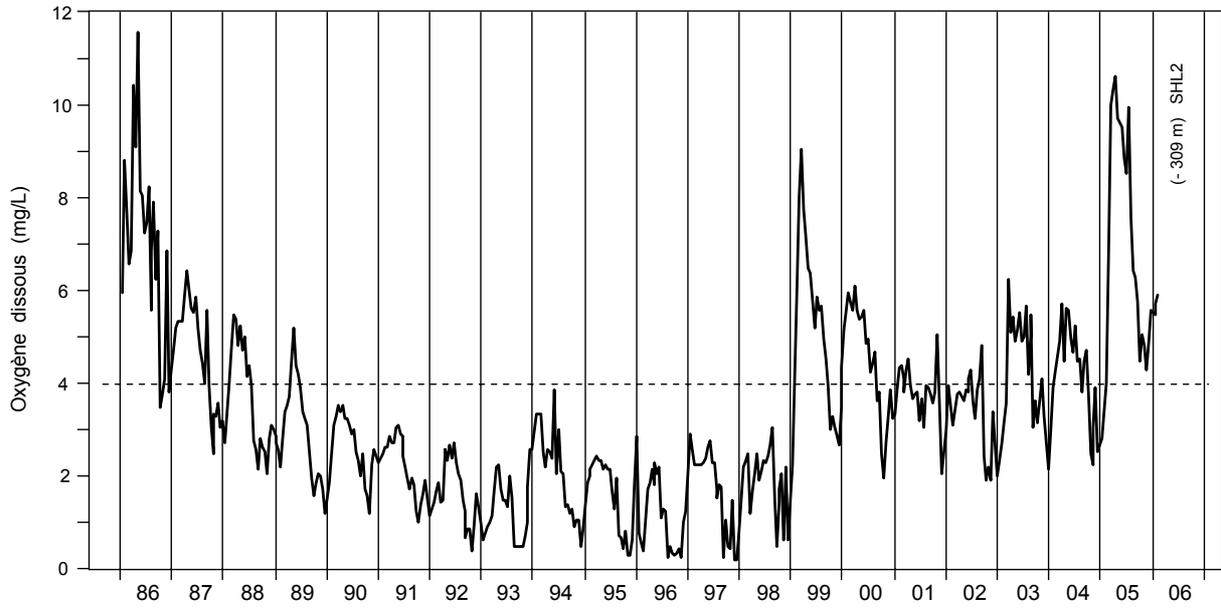


Figure 18 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

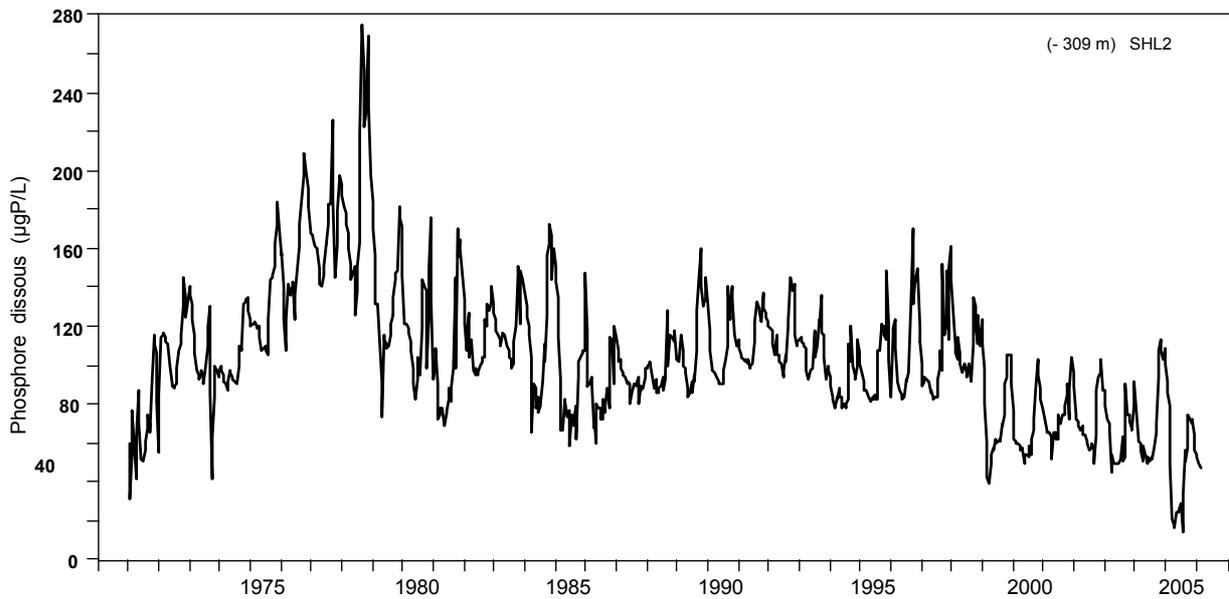


Figure 19 : Concentration en phosphore dissous ( $P-PO_4^{3-}$ ) des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 19 : Concentration of dissolved phosphorus ( $P-PO_4^{3-}$ ) in the bottom water of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

# Oxygène (mg/l) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2005

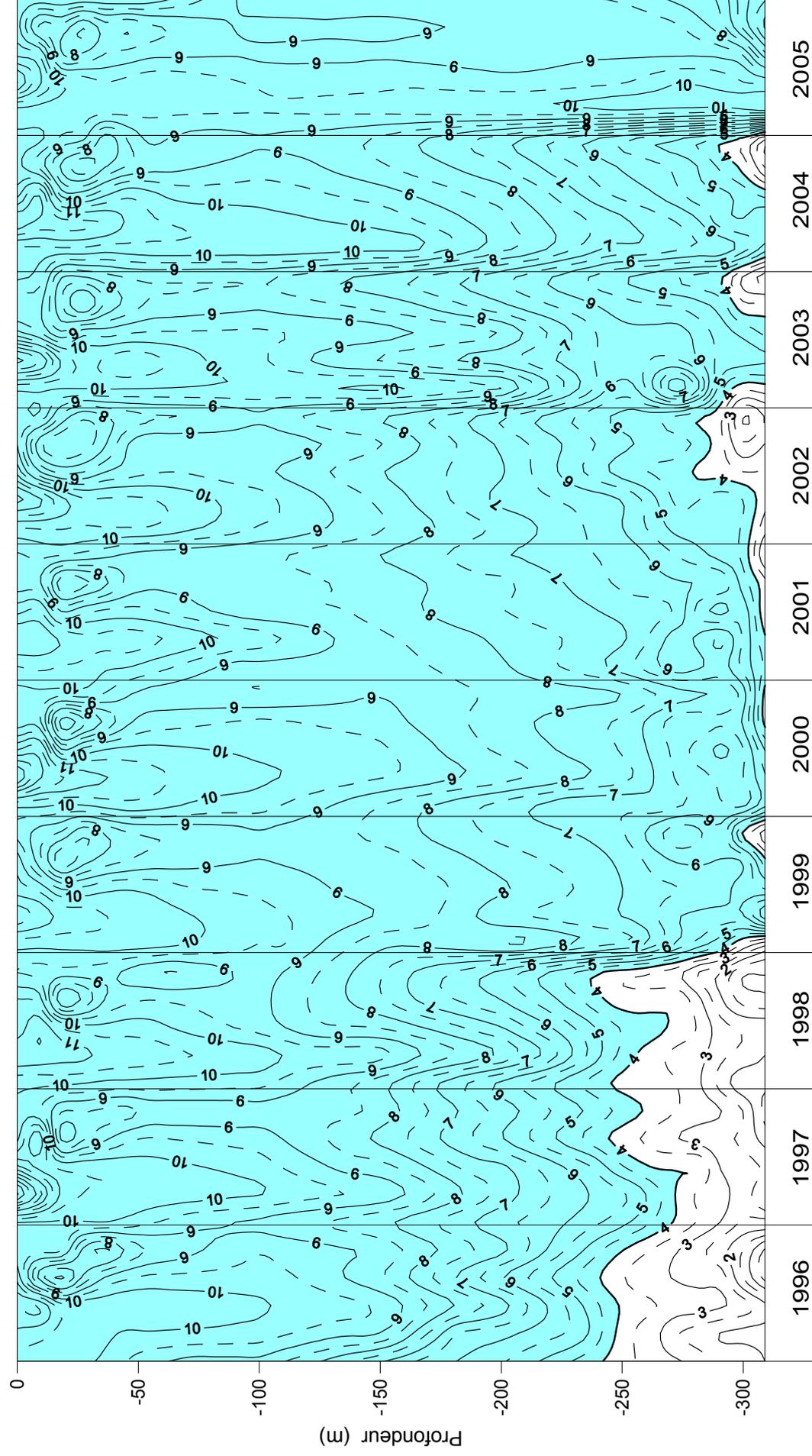


Figure 20 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur (zone bleue = concentration supérieure à 4 mgO<sub>2</sub>/L)

(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 20 : Concentration of dissolved oxygen in the water of Lake Geneva (Grand Lac - SHL2) as a function of depth (blue zone = concentration > 4 mgO<sub>2</sub>/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)).

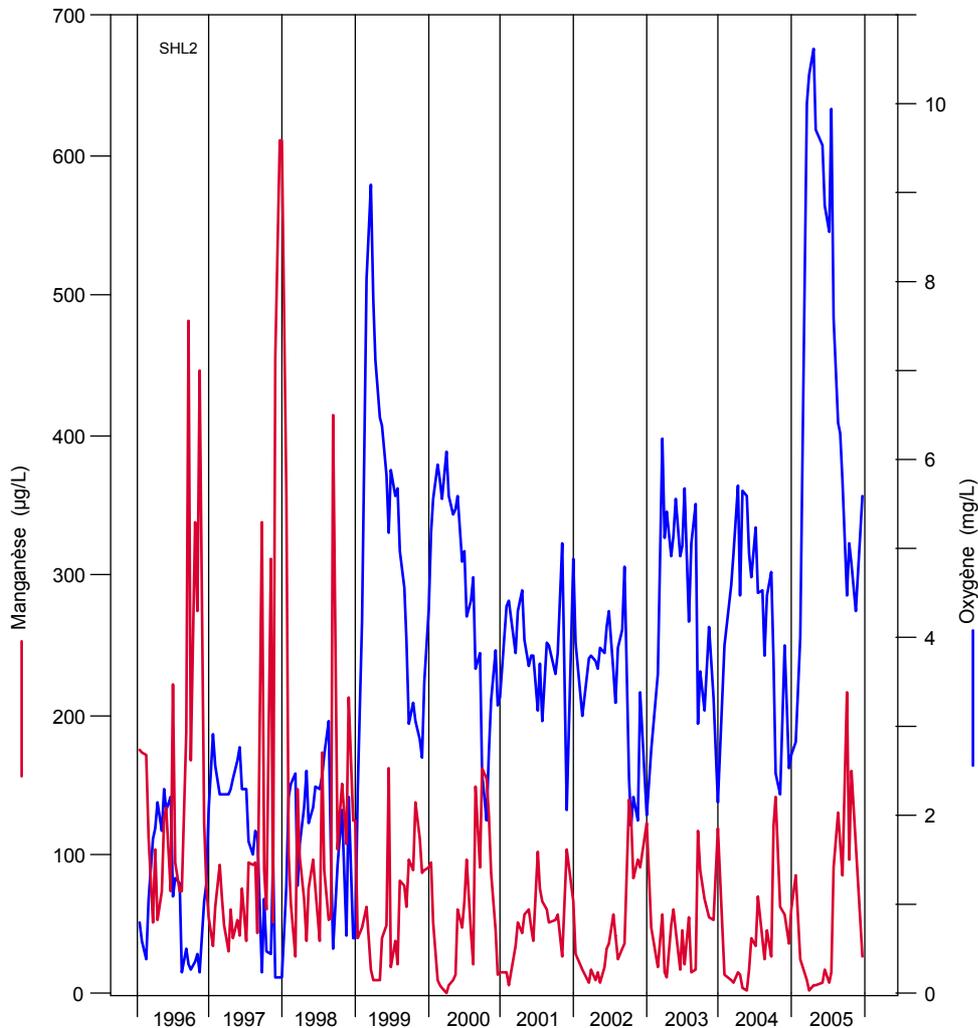


Figure 21 : Concentrations comparées en manganèse total et en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 21 : Comparison of the changes in the concentrations of total manganese and dissolved oxygen in the bottom water of Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

## 5. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

Les concentrations moyennes pondérées<sup>1</sup> pour l'ensemble du Grand Lac sont calculées à partir des mesures et des analyses effectuées sur les échantillons prélevés au centre du lac entre Lausanne et Evian (Grand Lac, point SHL2 : figure 1), ce site est considéré comme représentatif du lac (cf. Annexes 1 et 2).

### 5.1 Oxygène dissous

Le brassage complet du lac et la forte réoxygénation de la totalité de la colonne d'eau du lac entraînent une concentration moyenne pondérée annuelle de 9,28 mgO<sub>2</sub>/L, soit la plus importante depuis les 20 dernières années.

Sur les figures 18 et 22, la limite pointillée indique le seuil des 4 mgO<sub>2</sub>/L correspondant aux exigences relatives à la qualité des eaux, Annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 :

"Pour les lacs, il faut [...] que : [...] la teneur en oxygène de l'eau ne soit à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à 4 mgO<sub>2</sub>/L [...] Les conditions particulières sont réservées."

La figure 23 indique l'évolution de l'épaisseur de la couche d'eau de concentration inférieure à 4 mgO<sub>2</sub>/l depuis 1957.

Ainsi sur les figures 20, 22 et 23, on remarque que depuis les années 1970, 2005 est la seule année durant laquelle la concentration en oxygène dissous est toujours supérieure à 4 mgO<sub>2</sub>/L.

<sup>1</sup> Les concentrations moyennes pondérées sont calculées de la façon suivante :

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

avec

C<sub>i</sub> = concentration dans la strate  
 V<sub>i</sub> = volume de la strate  
 V = volume total du Grand Lac

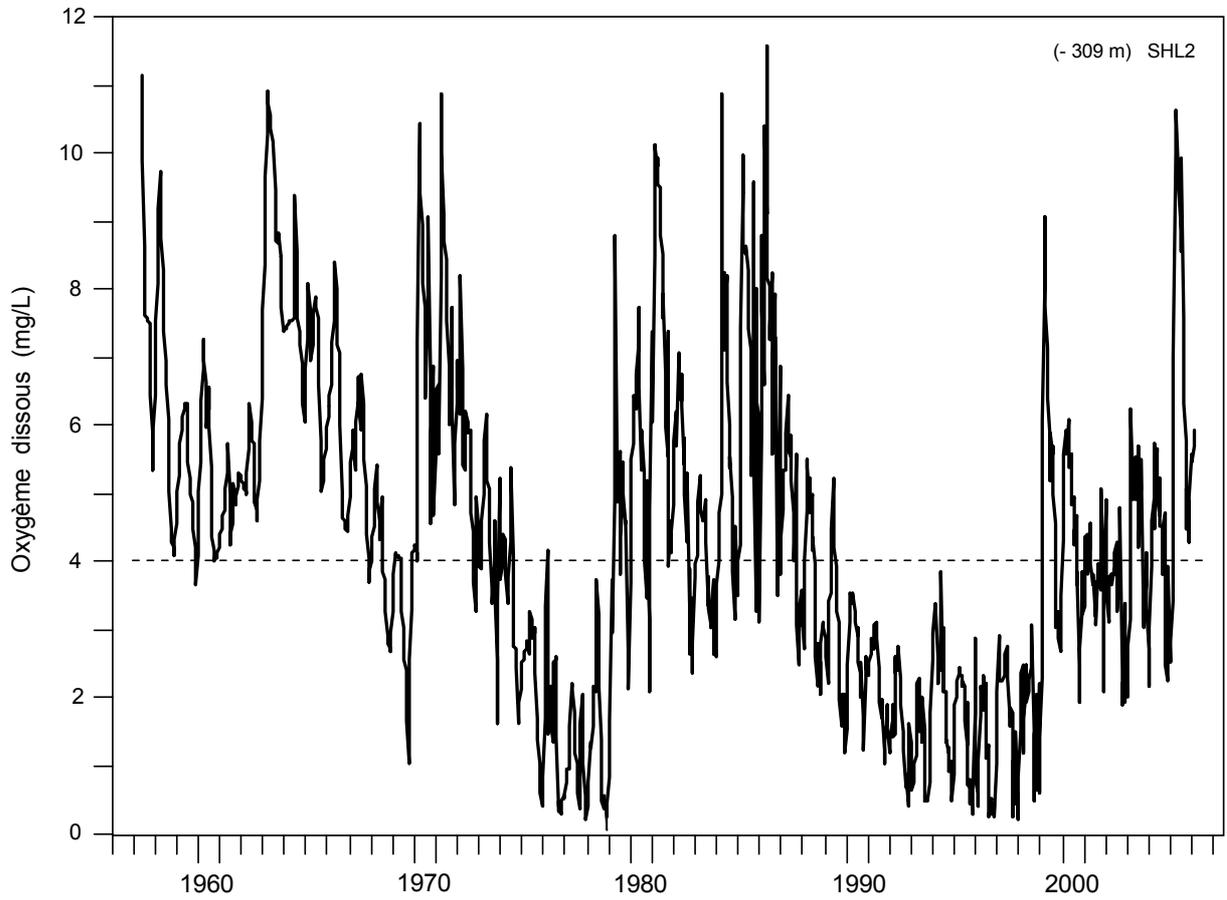


Figure 22 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond du Léman - Grand Lac (SHL2).

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

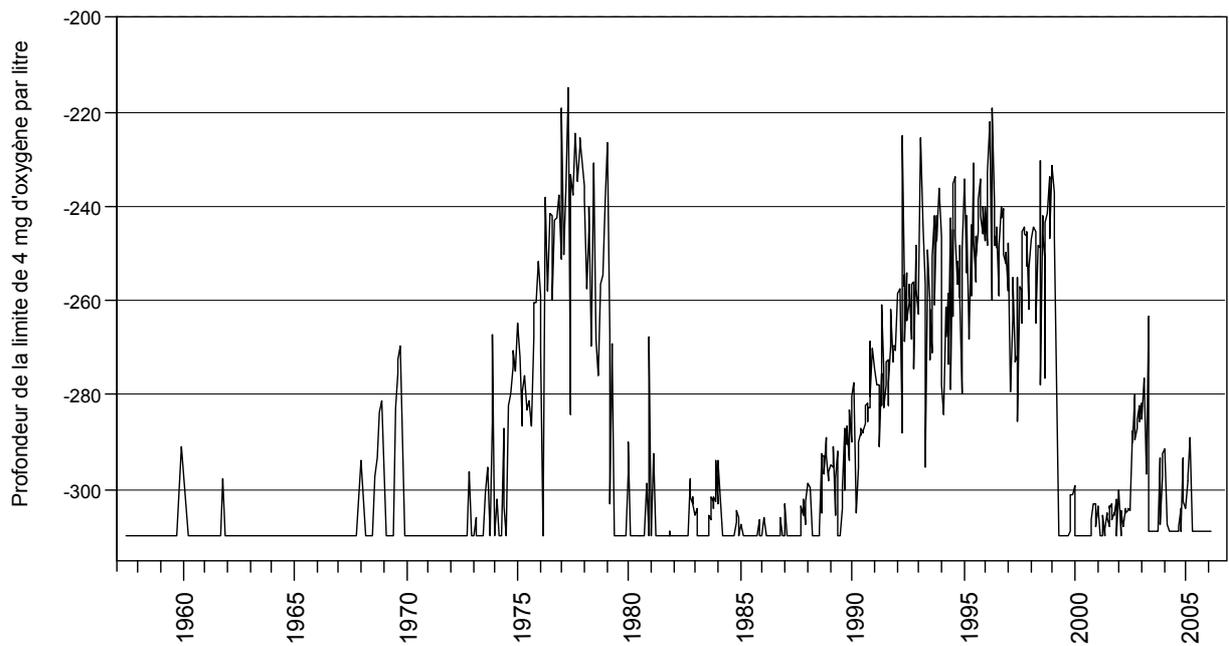


Figure 23 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mgO<sub>2</sub>/L dans le Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 23 : Change in the depth of the 4 mgO<sub>2</sub>/L threshold in Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

## 5.2 Phosphore dissous et phosphore total

Le stock de phosphore total suit la tendance générale à la diminution depuis les années 1980, avec un net ralentissement de la pente depuis les années 1995. Ainsi en 2005, le stock moyen en phosphore total est quasiment identique à celui de 2004 : 29.4 µgP/L, soit 2'520 tonnes de phosphore, contre 29.5 µgP/L en 2004 (figure 24).

Le brassage, comme en 1999, a remis en stock une partie importante du phosphore des couches profondes, ainsi la tendance à la baisse du stock de phosphore, observée depuis les dernières années, est ralentie.

Selon la tendance à la baisse mesurée depuis 1998, la concentration moyenne du lac en phosphore atteindra l'objectif de 20 µgP/L en 2011. Les efforts de lutte à la source de phosphore doivent donc être maintenus et même renforcés afin d'atteindre l'objectif visé de 20 µgP/L.

La figure 25 indique l'évolution de la concentration en orthophosphate dans la colonne d'eau depuis 1996.

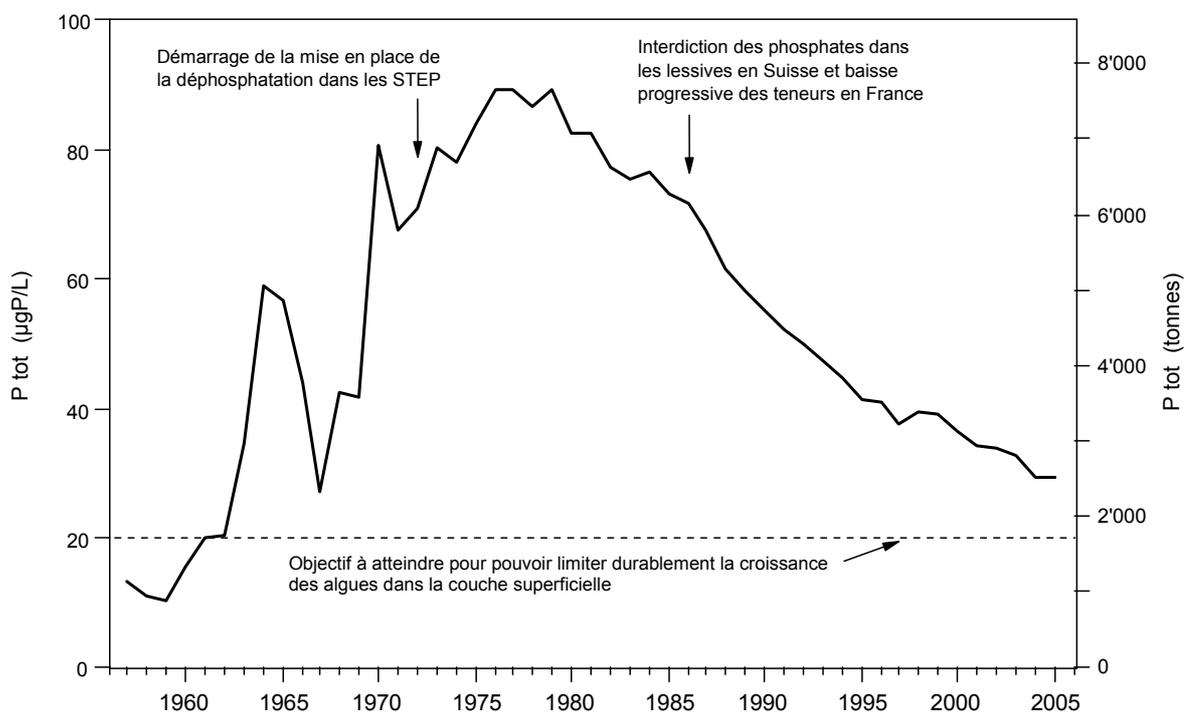


Figure 24 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore total contenu dans le Léman de 1957 à 2005 - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in weighted mean annual total phosphorus concentration and total phosphorus content of the Lake Geneva from 1957 to 2005 - Grand Lac (SHL2).

# Orthophosphate - PO4 (µgP/l) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2005

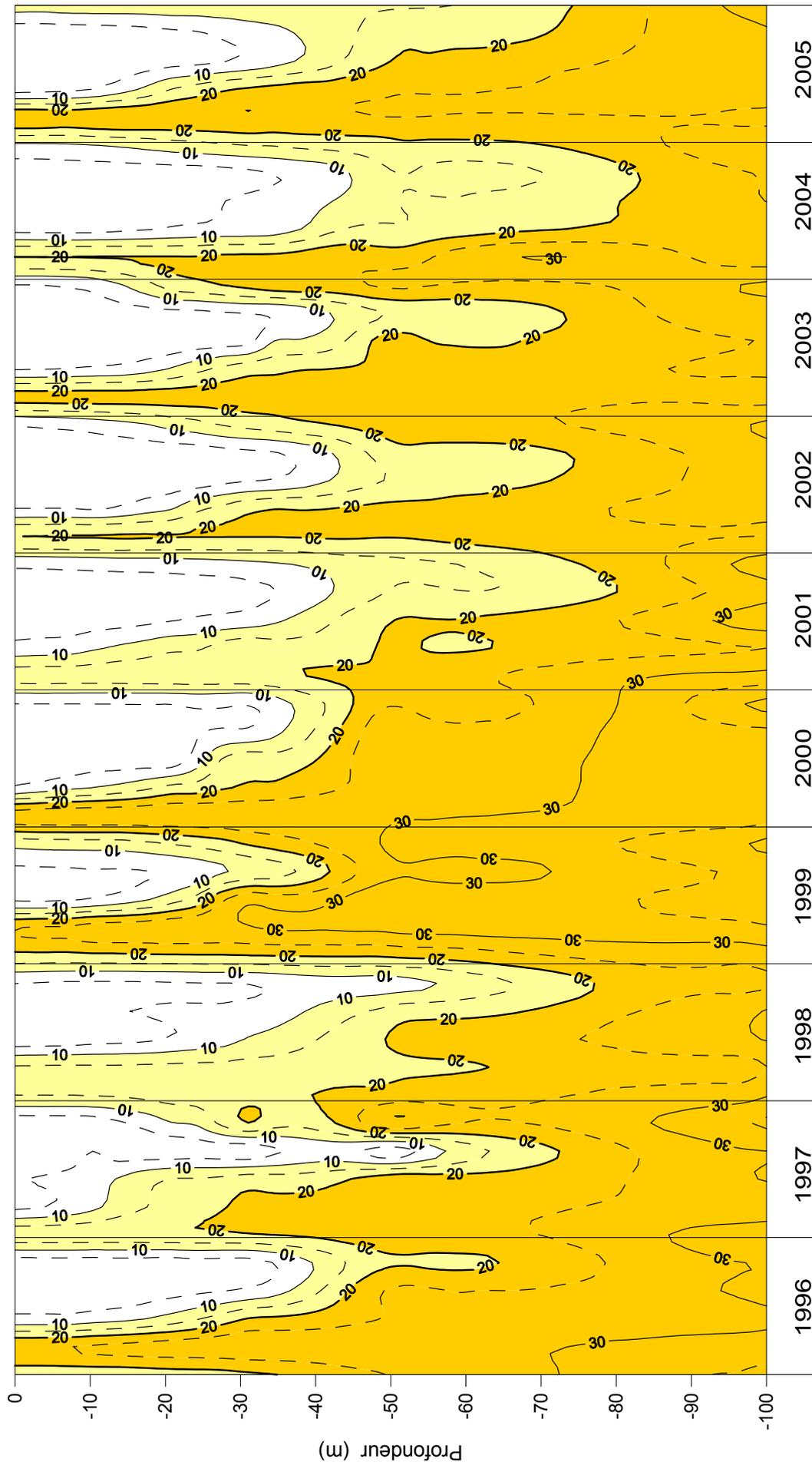


Figure 25 :

Concentration en phosphore dissous ( $P-PO_4^{3-}$ ) dans les différentes couches du Léman (SHL2) (zone jaune foncée = concentration supérieure à 20 µgP/L; zone jaune claire = concentration entre 10 et 20 µgP/L) (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 25 :

Concentration of dissolved phosphorus ( $P-PO_4^{3-}$ ) in the various layers of lake Geneva (SHL2) (dark yellow shaded zone = concentration > 20 µgP/L; light yellow shaded zone = concentration between 10 and 20 µgP/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 est présentée sur la figure 26 et indique que l'année 2005 est une année très différente avec une faible transparence hivernale, suivie d'une importante période des "eaux claires".

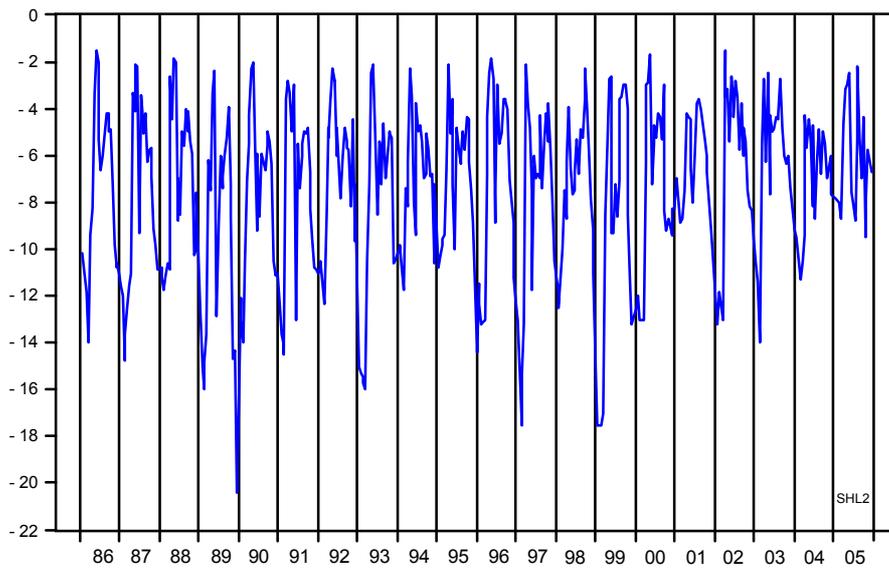


Figure 26 : Evolution de la transparence mesurée avec le disque de Secchi de 1986 à 2005, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 26 : Change in the transparency measured using a Secchi disk from 1986 to 2005, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

### 5.4 Azote nitrique et azote total

L'azote total reste constant depuis les années 1990 avec une concentration de 0,63 mgN/L en 2005 soit un stock de 53810 tonnes de N (figure 27). L'azote nitrique est aussi constant depuis les années 1990 avec une teneur moyenne annuelle de 0,58 mgN/L en 2005, soit 2,57 mgNO<sub>3</sub>/L (la norme pour l'eau de consommation en Suisse est de 40 mgNO<sub>3</sub>/L et en France de 50 mgNO<sub>3</sub>/L).

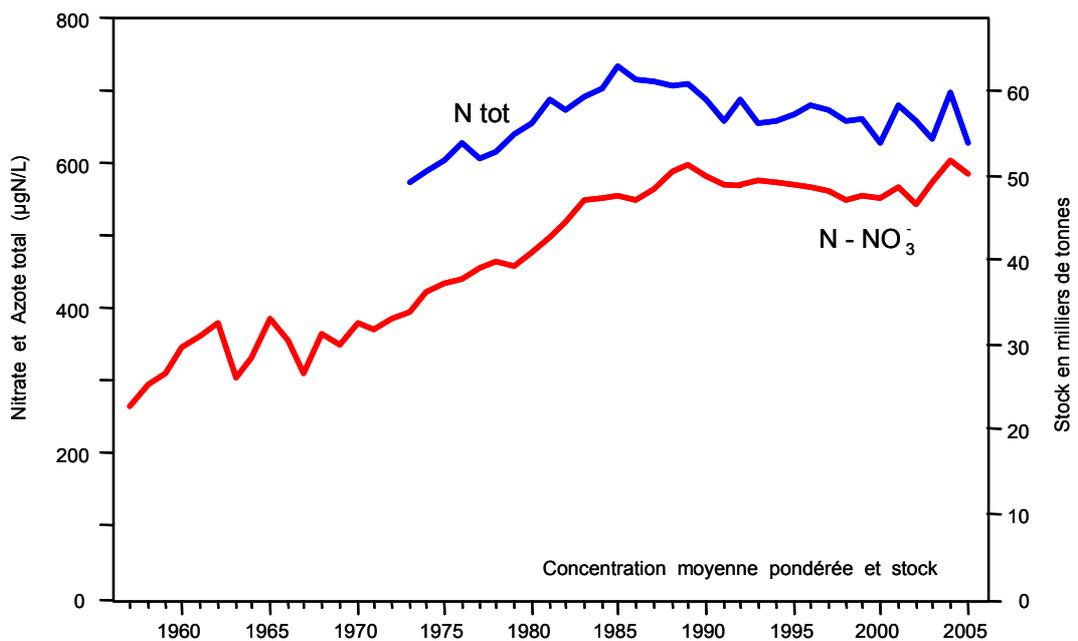


Figure 27 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique contenus dans le Léman de 1957 à 2005, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 27 : Change in the weighted mean annual total nitrogen concentration, in the total nitrogen content and the nitric content of lake Geneva from 1957 to 2005, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

## 5.5 Chlorure

Depuis le début des mesures du chlorure dans le Léman en 1971, la teneur du Grand Lac en chlorure est en augmentation quasi linéaire et passe en 2005 à 8.44 mg/L contre 2.73 mg/L en 1971 (figure 28). Le stock moyen du Grand Lac est alors de 722'920 tonnes de chlorure, soit en augmentation de 4 % par rapport à 2004. Cette augmentation confirme la tendance linéaire d'augmentation de pente 0.04 par an.

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

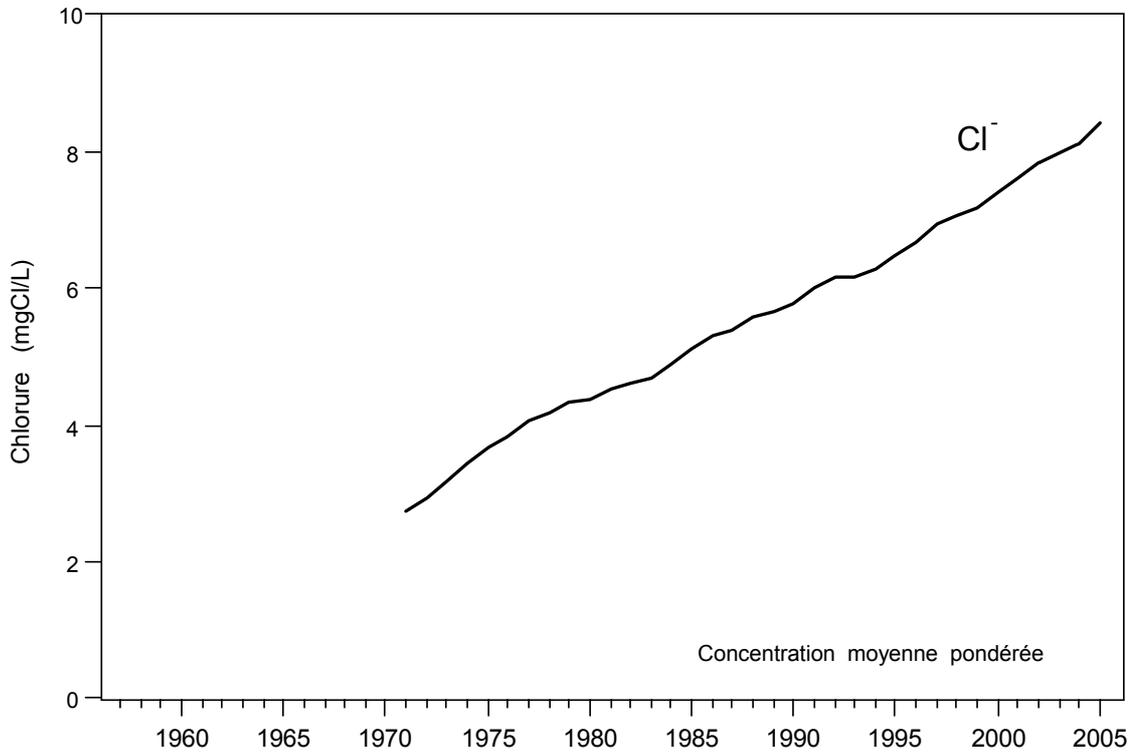


Figure 28 : Evolution de la concentration moyenne annuelle en chlorure, pondérée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac, de 1971 à 2005, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 28 : Change in the weighted mean annual concentration of chloride in the entire mass of the water of the lake from 1971 to 200, lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

## 6. ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU PETIT LAC ENTRE 2001 ET 2005

### 6.1 Evolution interannuelle des principaux paramètres

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 2a et 2b.

► **Température** (figures 29 et 30).

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

La température maximum a été mesurée en surface en août 2003 (26.4 °C).

La température moyenne annuelle pondérée varie entre 8.7 °C en 2005 et 9.7°C en 2004 (figure 30). Elle est plus élevée que dans le Grand Lac (7.0°C en 2004 et 6.6°C en 2005). Ceci s'explique simplement par la différence considérable entre les volumes du Petit et du Grand Lac.

Les températures restent stables au fond et en surface, la légère pente en surface n'étant pas significative.

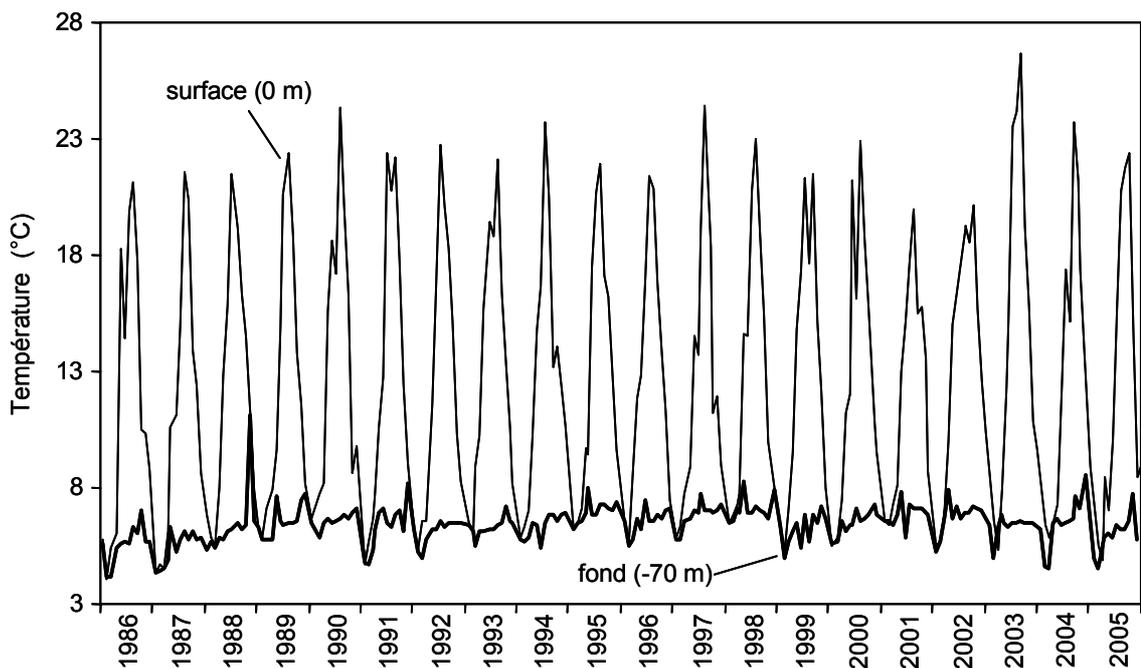


Figure 29 : Évolution de la température des eaux de surface (0 m) et au fond (-70 m), Léman - Petit Lac (GE3).

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

► **Oxygène dissous** (figure 31)

Contrairement aux eaux du Grand Lac, celles du Petit Lac s'homogénéisent chaque année et présentent toujours des teneurs en oxygène dissous très supérieures à l'exigence relative à la teneur en oxygène des eaux des lacs (4 mgO<sub>2</sub>/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 probablement associée à l'augmentation de la température de l'eau et à la minéralisation de la matière organique.

► **Phosphore total et orthophosphate** (figures 32, 33 et 34).

Les figures 32 et 33 montrent clairement que la baisse régulière des teneurs en phosphore total et dissous (orthophosphate) amorcée depuis de nombreuses années s'est ralentie à partir de 2003. Il s'agit probablement des conséquences des brassages complets ayant eu lieu sur le grand lac. Suite au mélange des eaux sur toute la hauteur, les eaux du fond plus riches en phosphore (car moins riche en oxygène) ont été ramenées en surface.

Ainsi la baisse des stocks de phosphore dans le Petit Lac semble se stabiliser, ils ont diminué de 65 % depuis 1986 pour le phosphore total et de 77 % pour l'orthophosphate (tableau 2b).

Température (°C) - Léman / Petit Lac (GE3) - 2001 à 2005

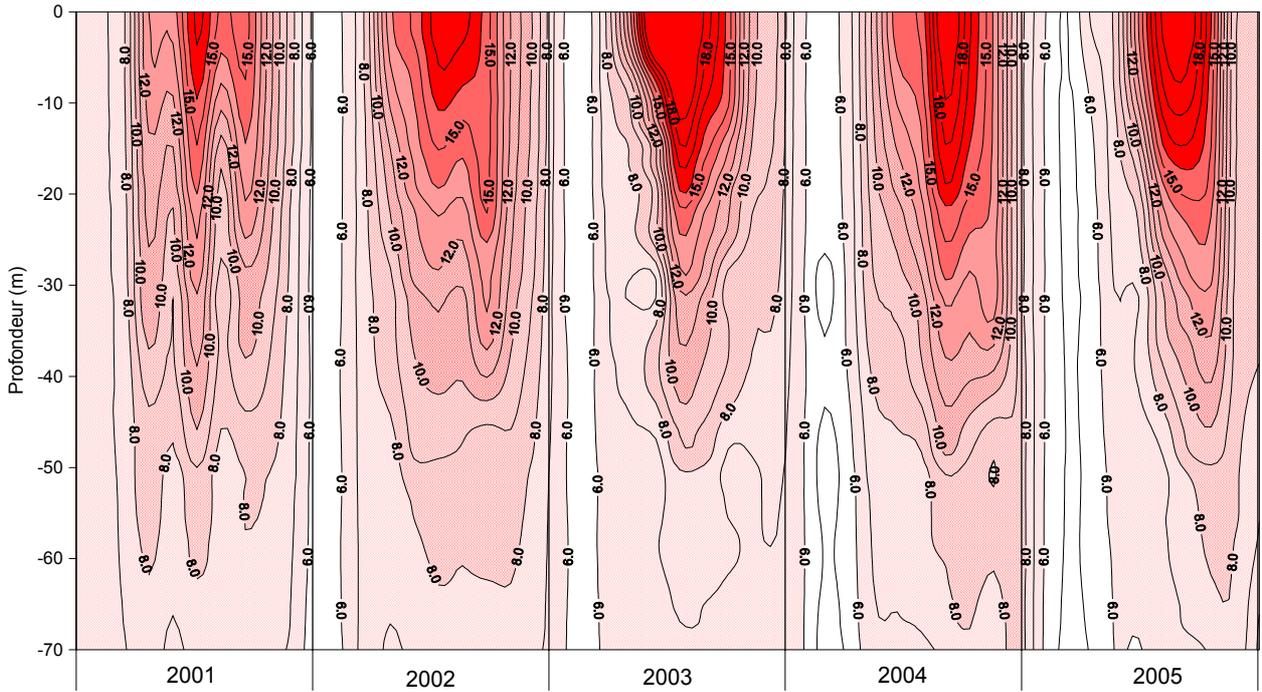


Figure 30 : Température des eaux du Léman (Petit Lac - GE3) en fonction de la profondeur (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 30 : Water temperature in Lake Geneva (Petit Lac - GE3) 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).

Oxygène (mg/L) - Léman / Petit Lac (GE3) - 2001 à 2005

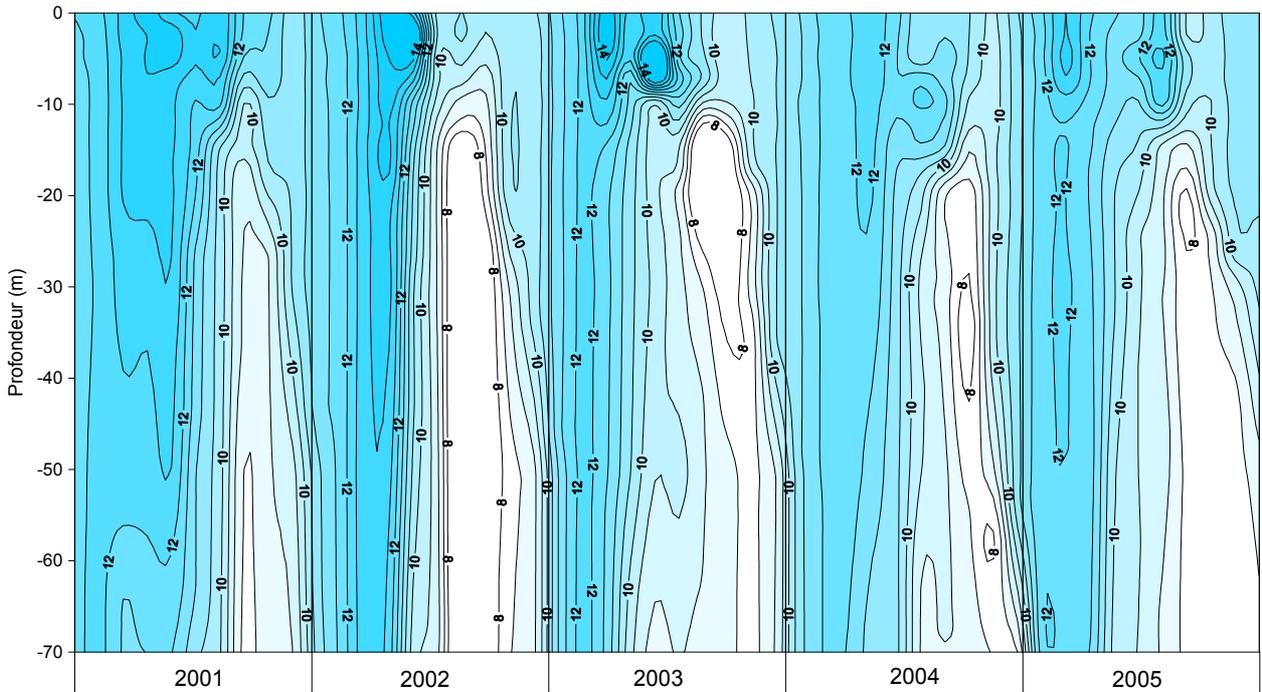


Figure 31 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Petit Lac - GE3) en fonction de la profondeur (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

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

Orthophosphate - PO<sub>4</sub> (µgP/L) - Léman / Petit Lac (GE3) - 2001 à 2005

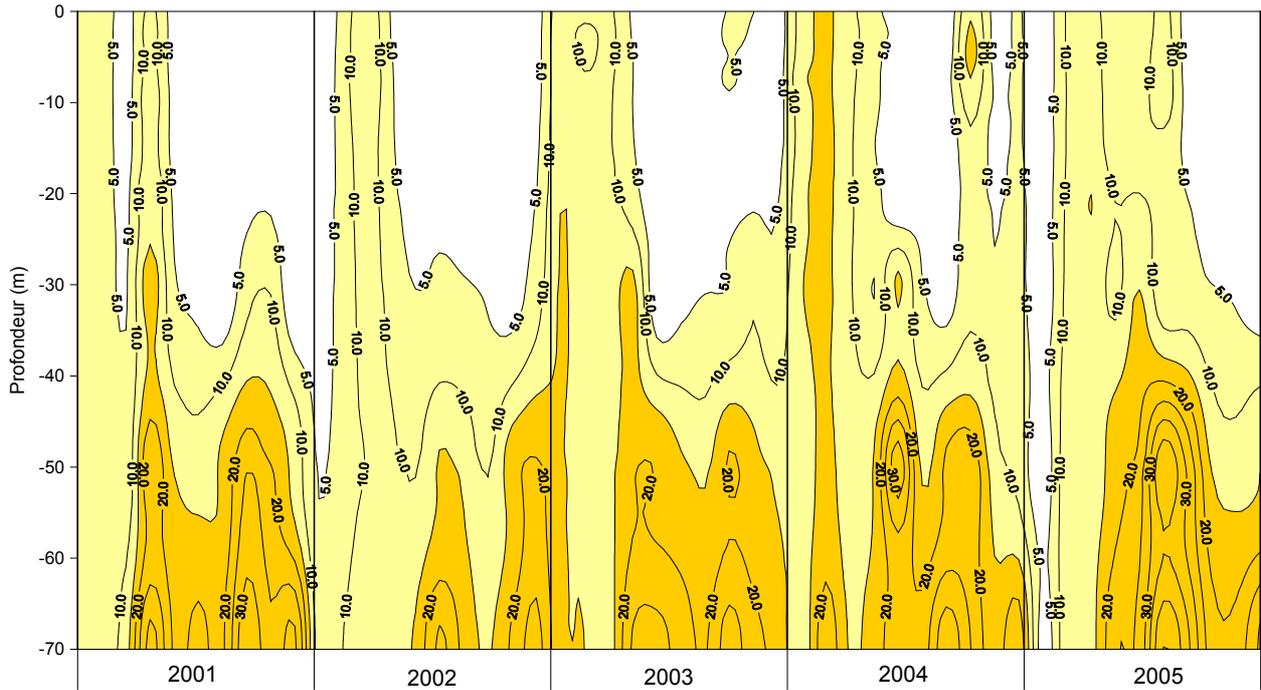


Figure 32 : Concentration en phosphore dissous (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) dans les différentes couches du Léman (Petit Lac - GE3) (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 32 : Concentration of dissolved phosphorus (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in the various layers of lake Geneva (Petit Lac - GE3) (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).

Phosphore total (µgP/L) - Léman / Petit Lac (GE3) - 2001 à 2005

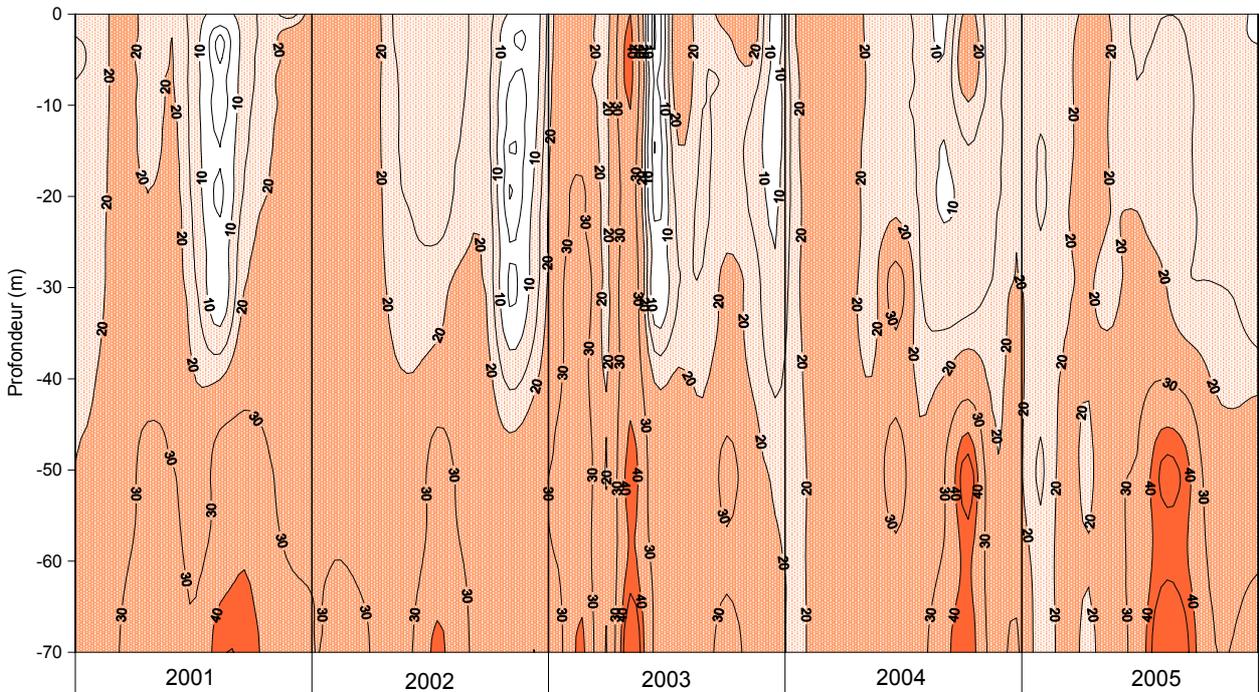


Figure 33 : Concentration en phosphore total dans les différentes couches du Léman (Petit Lac - GE3) (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 33 : Concentration of total phosphorus in the various layers of lake Geneva (Petit Lac - GE3) (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).

Tableau 2a : Concentrations moyennes pondérées, Léman - Petit Lac (GE3).

Table 2a : Mean weighted concentrations, Lake of Geneva - Petit Lac (GE3).

Année	Oxygène (mg/L)	Ptot (µgP/L)	P-PO <sub>4</sub> (µgP/L)	Ntot (µgN/L)	N-NH <sub>4</sub> (µgN/L)	N-NO <sub>3</sub> (µgN/L)	Cl (mg/L)	SiO <sub>2</sub> (mgSiO <sub>2</sub> /L)	C.O.D (mgC/L)
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	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	578 **	5.0	407	7.22	1.03	1.0
1999	10.61	22.3	11.6	-	10.4	392	6.93 ***	1.56	0.7 *
2000	11.48	21.2	10.4	627	4.0	463	7.04	2.13	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

\*) valeur établie sur 7 mois de mesures; \*\*) valeur établie sur 9 mois de mesures; \*\*\*) valeur établie sur 11 mois de mesures

Tableau 2b : Stocks en tonnes, Léman - Petit Lac (GE3).

Table 2b : Total content in metric tons, Lake of Geneva - Petit Lac (GE3).

Année	Oxygène (tonnes)	Ptot (tonnes)	P-PO <sub>4</sub> (tonnes)	Ntot (tonnes)	N-NH <sub>4</sub> (tonnes)	N-NO <sub>3</sub> (tonnes)	Cl (tonnes)	SiO <sub>2</sub> (tonnes)	C.O.D (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	3'052 ***
1997	33'994	81	33	2'125	35	1'554	22'311	3'632	3'038
1998	34'668	77	33	1'864 **	16	1'313	23'302	3'340	3'126
1999	34'224	72	38	-	33	1'266	22'362 ***	5'020	2'401 *
2000	37'031	68	34	2'022	13	1'494	22'734	6'879	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

\*) valeur établie sur 7 mois de mesures; \*\*) valeur établie sur 9 mois de mesures; \*\*\*) valeur établie sur 11 mois de mesures

Les concentrations, en début d'année, du phosphore dissous (forme disponible pour les algues) restent faibles. Ces concentrations ont augmenté jusqu'à 17 µgP/L en février 2004, suite au brassage quasi complet dans le Grand Lac. On notera également que les périodes où le phosphore est presque entièrement épuisé sont de plus en plus fréquentes et prolongées entre 2001 et 2004. Cependant, en 2005, l'activité phytoplanctonique n'a pas abouti à une consommation complète du phosphore dissous et sa concentration a toujours été mesurable sauf à la fin de l'automne. L'influence des organismes se fait sentir jusqu'à au moins 20 m (figures 33 et 34).

A l'exception des années 2003 et 2004, l'évolution observée montre que, en surface, les teneurs en phosphore dissous tendent à se stabiliser autour de 5 µgP/L en moyenne annuelle; le phosphore total se stabilise autour de 15 à 20 µgP/L.

Dans le tableau 3a, sont présentés les concentrations et rapports des différentes formes du phosphore dans les couches de surface (0 à 10 m) et au fond (- 70 m), dans le tableau 3b, sont présentés les mêmes résultats sur la couche 0-20m afin de mieux prendre en compte l'influence de l'activité phytoplanctonique. La part de phosphore dissous par rapport au phosphore total diminue en surface. De 63 % en 1986, elle passe à 39 % en 2005 (donnée non présentée). A 70 m, les taux de diminution semblent stabilisés, et le rapport phosphore soluble/phosphore total reste relativement constant au cours des années et varie entre 60 et 80 %. On notera une possible tendance à l'augmentation depuis 2003 (tableau ci-dessous). On notera qu'est considérée la couche de surface entre 0 et 20m afin de mieux intégrer l'activité biologique alors que par le passé elle était de 0 à 5m (tableau 3b).

Tableau 3a : Concentrations et rapports des différentes formes du phosphore dans les couches de surface (moyenne de 0 à 10 m) et du fond (-70 m) du Petit Lac (GE 3).

Table 3a : Concentrations and ratios of the various forms of phosphorus in the surface layers (on average from 0 to 10 m) and in the bottom layers (-70 m) of the Petit Lac (GE 3).

Années	P-PO <sub>4</sub> 0-10m (µgP/L)	Ptot 0-10m (µgP/L)	P-PO <sub>4</sub> /Ptot surf. (%)	P-PO <sub>4</sub> fond (µgP/L)	Ptot fond (µgP/L)	P-PO <sub>4</sub> /Ptot fond (%)
1996	5.0	19.7	25.4	21.8	36.1	60.4
1997	5.7	20.2	28.2	28.4	45.7	62.1
1998	6.9	20.3	34.0	22.8	34.1	66.9
1999	6.1	16.5	37.0	28.8	39.5	72.9
2000	5.2	15.3	34.0	26.5	37.3	71.0
2001	3.3	16.0	20.5	25.8	37.6	68.5
2002	4.0	15.6	25.7	18.5	32.3	57.3
2003	5.1	20.6	24.7	22.9	33.3	68.9
2004	7.6	19.7	38.5	23.6	30.0	78.7
2005	6.1	15.7	39.0	25.3	32.4	78.1

Tableau 3b : 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 3b: Concentrations and ratios of the various forms of phosphorus in the surface layers (on average from 0 to 20 m) and in the bottom layers (-70 m) of the Petit Lac (GE 3).

Années	P-PO <sub>4</sub> 0-20m (µgP/L)	Ptot 0-20m (µgP/L)	P-PO <sub>4</sub> /Ptot surf. (%)	P-PO <sub>4</sub> fond (µgP/L)	Ptot fond (µgP/L)	P-PO <sub>4</sub> /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

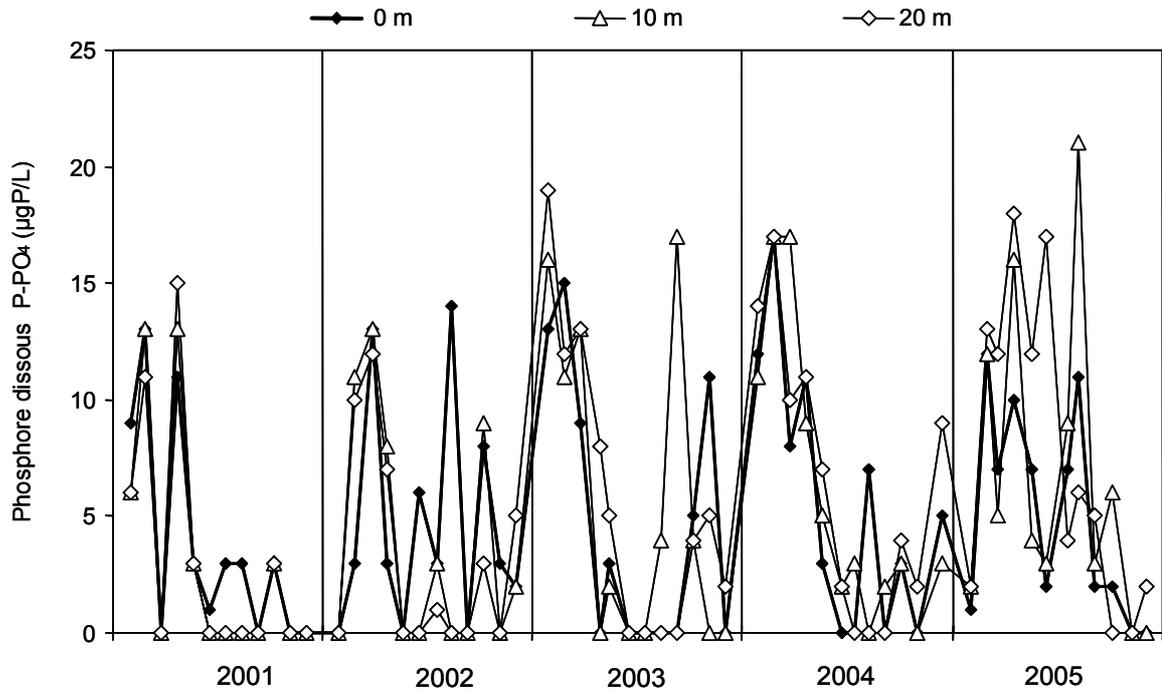


Figure 34 : Concentration en phosphore dissous (orthophosphate; P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des eaux des couches superficielles (0, 10 et 20 m), Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 34 : Concentration of dissolved phosphorus (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in the surface water (0, 10 and 20 m) of Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

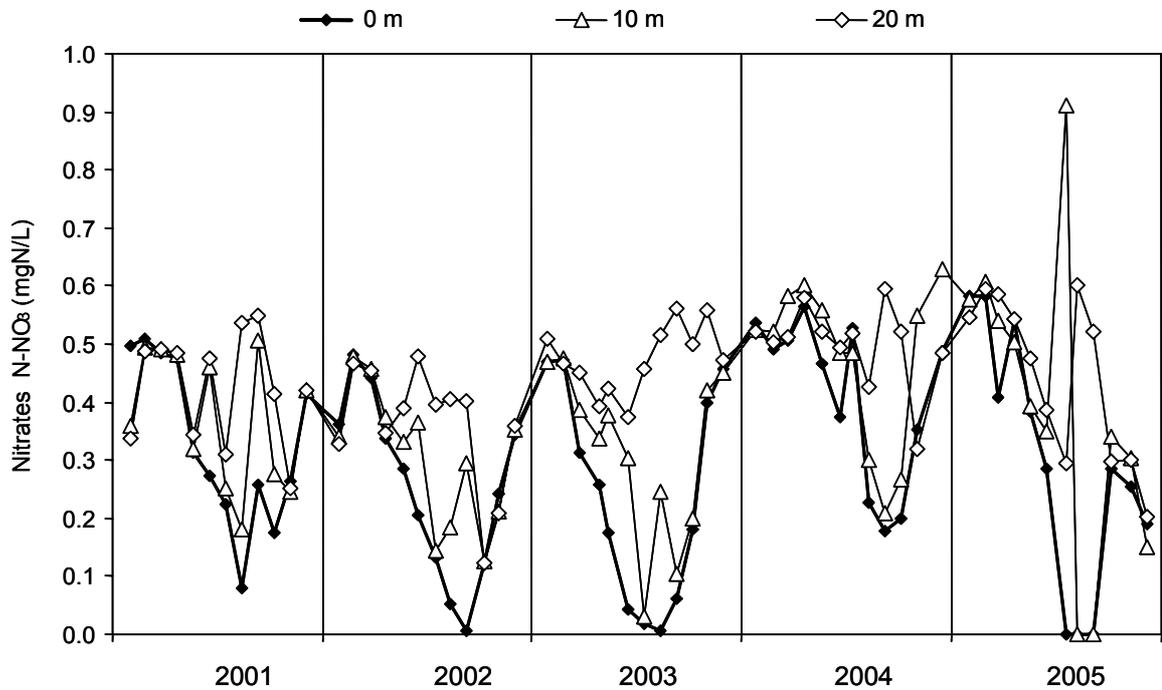


Figure 35 : Concentration en azote nitrique (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) des eaux des couches superficielles (0, 10 et 20 m). Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 35 : Concentration of nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) in the surface water (0, 10 and 20 m) of Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

► **Azote nitrique, total et ammoniacal** (figure 35).

Le stock d'azote nitrique a varié au cours des 5 dernières années (tableau 2b) : il est compris entre 1'180 tonnes en 2002 et 1623 tonnes en 2004. La tendance à la baisse (BLANC et *al.*, 1996) se confirme sur les 20 dernières années.

On notera que lors des étés 2002, 2003 et 2005, l'azote nitrique a été presque totalement consommé par les organismes planctoniques dans les couches superficielles jusqu'à 10m (figure 35).

Le stock d'azote total semble stable (tableau 2b). Le stock d'azote ammoniacal reste 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 2b).

Dans l'optique d'une limitation de la croissance planctonique, le rapport N/P demeure particulièrement intéressant à considérer. Ce rapport semble diminuer depuis 2001. Le rapport annuel moyen en surface (0-20 m) et au fond (70 m) est présenté au table 4. Il varie fortement en fonction de l'activité biologique au cours de l'année, en particulier en été et automne (données non présentées). L'interprétation de ce rapport est discutée dans la partie biologie.

Tableau 4 : Rapport des concentrations annuelles moyennes pondérées de l'azote minéral et du phosphore dissous en surface (0-20 m) et au fond (70 m).

Table 4 : Ratio of the mean annual weighted concentrations of inorganic nitrogen and phosphorus dissolved at the surface (0-20 m) and at the bottom (70 m).

Années	N / P 0-20 m	N / P fond
2001	121	20
2002	90	26
2003	78	22
2004	69	24
2005	63	23

► **Chlorure**

L'évolution des concentrations moyennes pondérées en chlorure du Petit Lac (tableau 2a) suit celle du Grand Lac.

► **Autres paramètres** (figures 36 et 37)

L'évolution des concentrations en surface et au fond de la silice dissoute et du carbone sont présentées figures 36 et 37. On observe une tendance à l'augmentation pour la silice au fond. En surface, les chutes de concentrations se situent au printemps mais peuvent se prolonger plus tard dans l'automne comme en 2003 et 2005 (figure 37). Ceci est lié à la dynamique des populations d'organismes planctoniques utilisant la silice, les diatomées en particulier.

Le carbone organique dissous tend à légèrement croître en surface comme au fond (figure 37).

Pour ces deux paramètres, les moyennes pondérées sur toute l'année présentent peu de variations entre 2001 et 2005 (tableaux 2a et 2b).

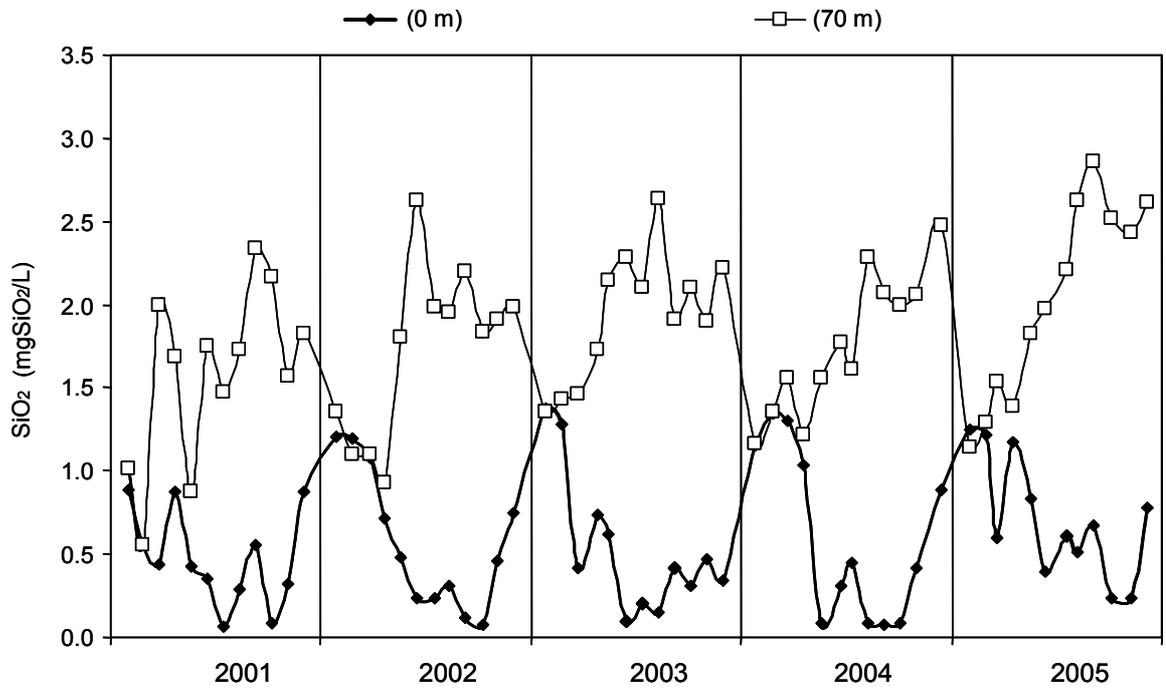


Figure 36 : Concentration en silice dissoute ( $\text{SiO}_2$ ) des eaux de surface (0 m) et au fond (-70 m). Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 36 : Concentration of dissolved silica ( $\text{SiO}_2$ ) in the surface water (0 m) and in the bottom water (-70 m) of Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

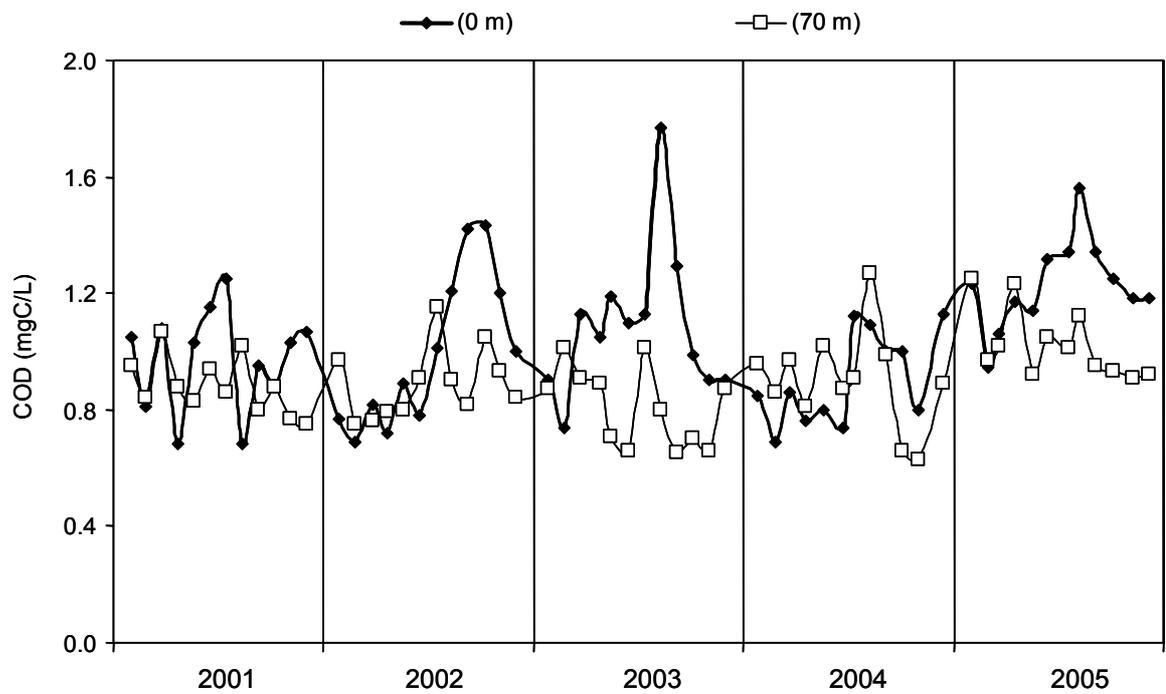


Figure 37 : Concentration en carbone organique dissous (C.O.D.) des eaux de surface (0 m) et au fond (-70 m). Léman - Petit Lac (GE3).

Figure 37 : Concentration of dissolved organic carbon (D.O.C) in the surface water (0 m) and in the bottom water (-70 m) of Lake Geneva - Petit Lac (GE3).

## 7. CONCLUSIONS

Les principales observations en 2005 sont les suivantes :

- L'hiver 2004-2005 a permis un brassage exceptionnel et complet, du même ordre que celui de 1986.
- La réoxygénation des eaux du fond par le brassage atteint 10.64 mgO<sub>2</sub>/L au maximum au mois de mars, et la concentration en oxygène dissous est toujours supérieure à 4 mgO<sub>2</sub>/L en tout point du lac toute l'année.
- La période des "eaux claires" se distingue nettement du reste de l'année 2005, on l'observe assez tardivement du mois de juin au mois de juillet avec une transparence maximum de 8.80 m.
- Le phosphore dissous est consommé en quasi-totalité dans les couches superficielles à partir de début avril à décembre jusqu'à 35 m.

Pour les stocks :

- L'évolution du phosphore indique toujours un caractère asymptotique depuis quelques années. En 2005, le stock moyen en phosphore total est quasiment identique à celui de 2004, avec une concentration moyenne de 29.4 µgP/L en phosphore total soit 2'520 tonnes de P.
- Le stock en chlorure continue d'augmenter, cette année, en suivant la tendance habituelle de 4 % par an, pour atteindre 8.44 mg/L, soit 722'920 tonnes de Cl.
- L'azote nitrique et l'azote total restent constants relativement aux années précédentes.

## BIBLIOGRAPHIE

ANNEVILLE, O et LAINE, L. (2006) : Evolution du zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 127-132.

BLANC, P., CORVI, C. et RAPIN, F. (1994) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1993, 37-64.

BLANC, P., CORVI, C., NIREL, P., REVACLIER, R. et RAPIN, F. (1996) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1995, 37-80.

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).

QUETIN, P.. (2006) : Bilan des apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 147-172.

STRAWCZYNSKI, A. (2006) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 189-196.

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

Année	Oxygène mg/l	P tot. µgP/l	PO <sub>4</sub> µgP/l	N tot. µgN/l	Nmintot µgN/l	NH <sub>4</sub> µgN/l	NO <sub>2</sub> µgN/l	NO <sub>3</sub> 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

\* : valeur interpolée

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

## Total content in tons

Année	Oxygène Tonnes	P tot. Tonnes	P-PO <sub>4</sub> Tonnes	N tot. Tonnes	Nmintot Tonnes	N-NH <sub>4</sub> Tonnes	N-NO <sub>2</sub> Tonnes	N-NO <sub>3</sub> 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

\* : valeur interpolée

CONSEIL SCIENTIFIQUE

DE LA COMMISSION INTERNATIONALE  
POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN  
CONTRE LA POLLUTION

# RAPPORTS

SUR LES ÉTUDES  
ET RECHERCHES ENTREPRISES  
DANS LE BASSIN LÉMANIQUE

PROGRAMME QUINQUENNAL 2001-2005  
**CAMPAGNE 2005**

*Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut.,  
Campagne 2005, 2006*