

ÉVOLUTION PHYSICO-CHEMIQUE DES EAUX DU LÉMAN

PHYSICAL-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA

Campagne 2006

PAR

Jérôme LAZZAROTTO

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

François RAPIN

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

RÉSUMÉ

L'hiver 2005-2006 a été froid et a permis un brassage complet de la masse d'eau avec une transparence importante de 15.5 m. Ce brassage fait suite au brassage de 2005 et permet une forte réoxygénation de l'ensemble de la masse d'eau. L'anaérobiose et les phénomènes de relargage au fond du lac sont donc limités. La température observée après le brassage le 15 mars était inférieure à 5.5 °C dans toute la colonne d'eau. Le fond a subi une lente désoxygénation constante jusqu'à la fin de l'année pour atteindre 3.37 mgO₂/L le 11 décembre 2006.

La production phytoplanctonique est observée immédiatement après le brassage et est ralentie par la phase des eaux claires entre le 15 mai et le 12 juin. L'orthophosphate a été consommé en quasi-totalité après la phase des eaux claires jusqu'à la fin de l'année et a limité la production phytoplanctonique.

Le stock de phosphore continue de diminuer et la concentration moyenne en phosphore total en 2006 est de 27.7 µgP/L.

ABSTRACT

The winter of 2005-2006 was cold, and produced complete churning of the mass of water with a high transparency of 15.5 m. This churning followed the high degree of churning of 2005, and produced high reoxygenation of the entire mass of water. Anaerobiosis, and the phenomena of release to the bottom of the lake were therefore limited. The temperature observed after the churning of 15 March was below 5.5°C throughout the water column, and the lake bottom underwent continuous slow deoxygenation until the end of the year, reaching 3.37 mgO₂/L on 11 December 2006.

Phytoplankton production was observed immediately after churning, and was slowed by the clear-water phase between 15 May and 12 June. The orthophosphates had been virtually entirely consumed after the clear-water phase up to the end of the year, and limited phytoplankton production.

The phosphorus content continued to fall, and the mean total phosphorus concentration in 2006 was 27.7 µgP/L.

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) et 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 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 2006, 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 inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. En 2006, les résultats des différents laboratoires sont concordants (STRAWCZYNSKI, 2007).

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).

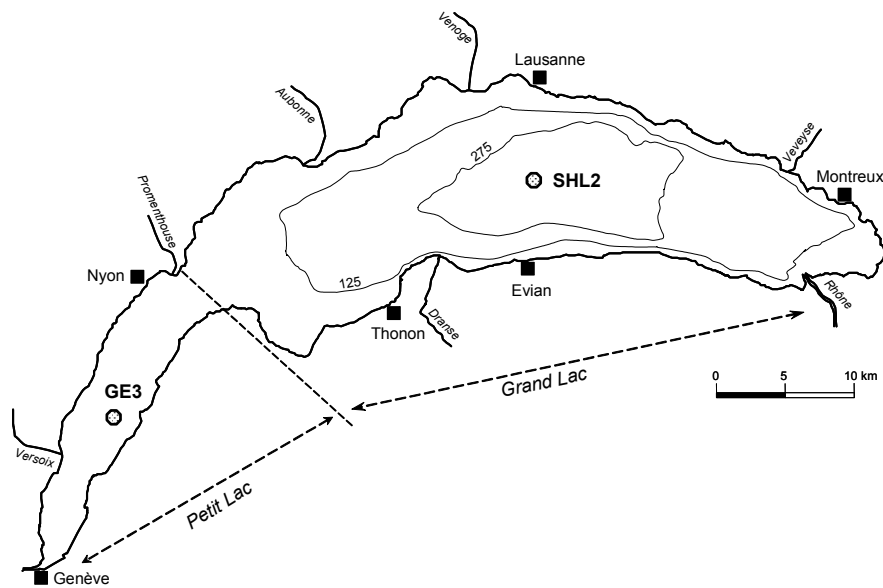


Figure 1 : Situation des points de prélèvement.

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 9 janvier 2006	11	mardi 18 juillet 2006
2	lundi 6 février 2006	12	jeudi 17 août 2006
3	mercredi 15 mars 2006	13	lundi 4 septembre 2006
4	lundi 27 mars 2006	14	mercredi 20 septembre 2006
5	mardi 18 avril 2006	15	mardi 3 octobre 2006
6	lundi 24 avril 2006	16	mardi 17 octobre 2006
7	lundi 15 mai 2006	17	mardi 7 novembre 2006
8	mardi 6 juin 2006	18	lundi 20 novembre 2006
9	lundi 12 juin 2006	19	lundi 11 décembre 2006
10	mardi 4 juillet 2006		

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

La température de la colonne d'eau fut très basse à la fin de l'hiver 2005-2006 : elle atteint 5.38°C en surface et 5.35°C au fond, soit 5.37°C de moyenne le 15 mars 2006 (figure 2) donc homogène en considérant l'incertitude de mesure de l'ordre de 0.05°C pour ces températures. Ce refroidissement de la colonne d'eau est le plus important observé depuis 1987, il est caractéristique d'un brassage complet.

La température de l'air est négative durant une semaine seulement en janvier mais elle est jusqu'au mois de mars très inférieure à la moyenne des 30 dernières années (QUETIN, 2007).

Le brassage de la colonne d'eau a été observé à cette période, entre le 15 mars et le 27 mars 2006. Il fut permis d'une part par ce refroidissement important de la colonne d'eau à une température homogène et d'autre part par quelques semaines fortement ventées en mars (QUETIN, 2007).

Le brassage est complet et permet une réoxygénation importante de la colonne d'eau avec 9.91 mgO₂/L au fond lors de la campagne du 15 mars et un maximum de 10.91 mgO₂/L le 27 mars. Ce brassage et cette réoxygénation sont comparables à ceux de 2005 et très supérieurs aux années précédentes.

Les figures 3 à 7 représentent l'évolution saisonnière et interannuelle de la température du lac. La température de l'année 2006 se situe parmi les plus faibles de la chronique et ne suit pas la tendance à l'augmentation observée ces dernières années.

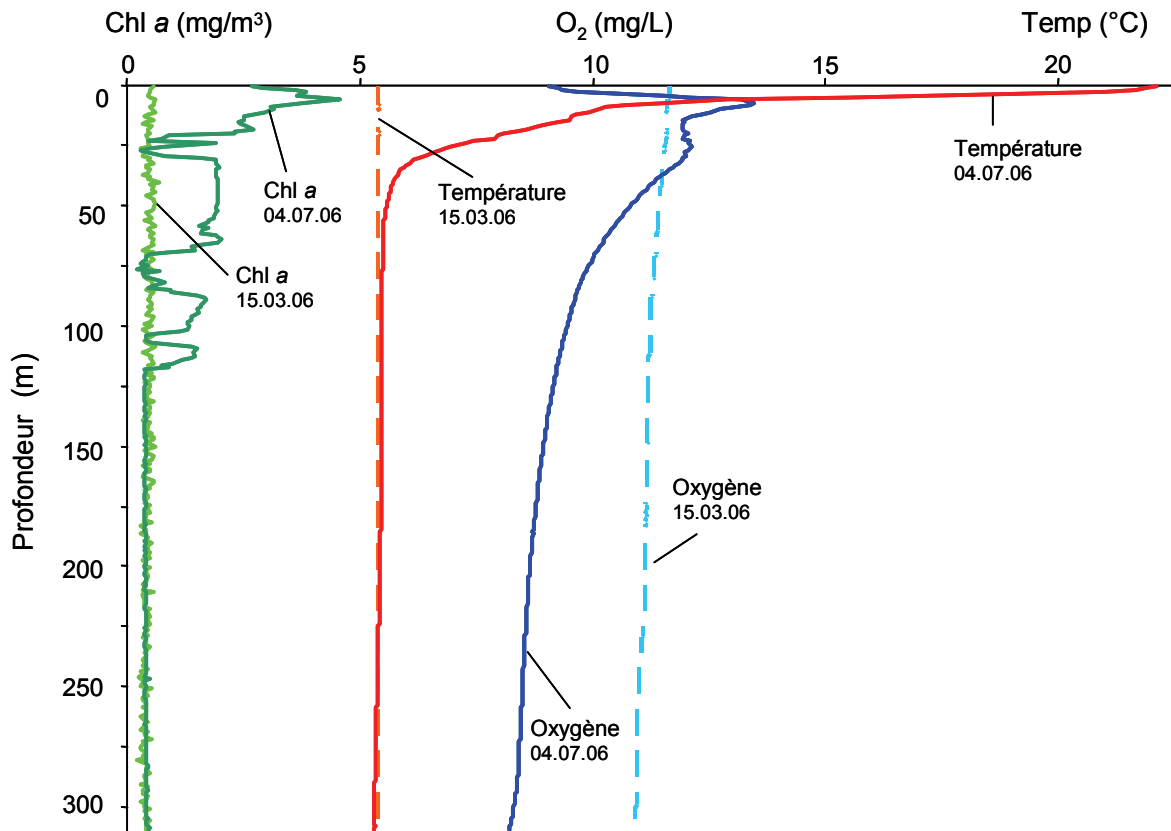


Figure 2 : Profil physico-chimique à SHL2 mesuré avec une sonde multiparamètres lors du brassage (15.03.2006) et lors de la stratification thermique (04.07.2006).

Figure 2 : Multi-parameter Water Quality Logger profile during churning (15.03.2006) and during thermic stratification at SHL2 (04.07.2006).

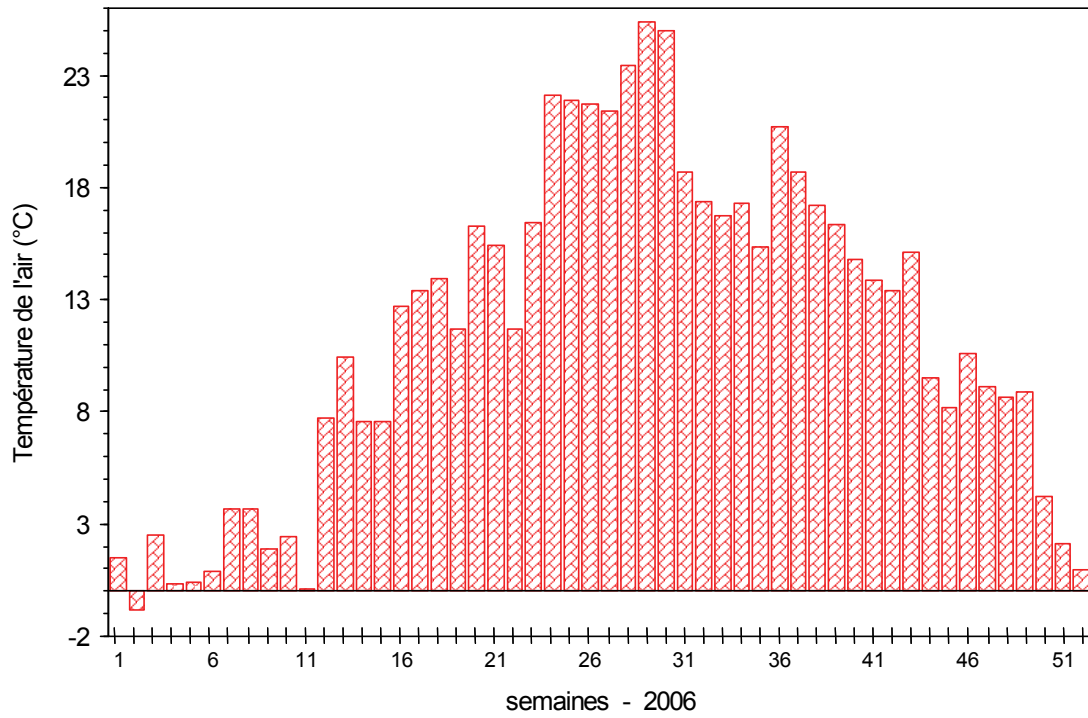


Figure 3 a : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully en 2006.
Figure 3 a : Mean weekly air temperature at the Pully station in 2006.

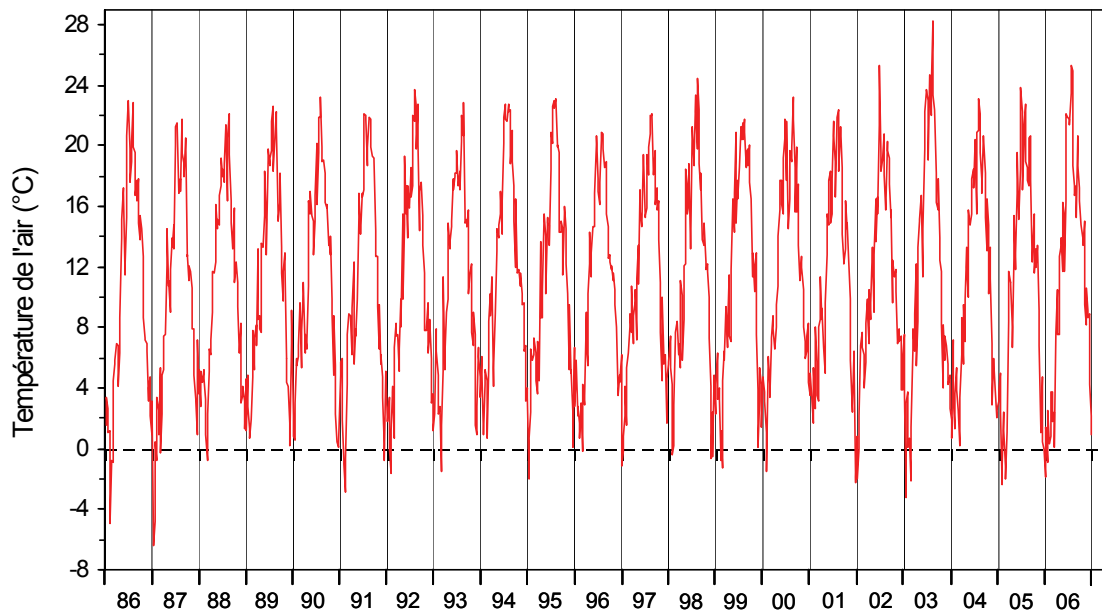


Figure 3 b : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully de 1986 à 2006.
Figure 3 b : Mean weekly air temperature at the Pully station from 1986 to 2006.

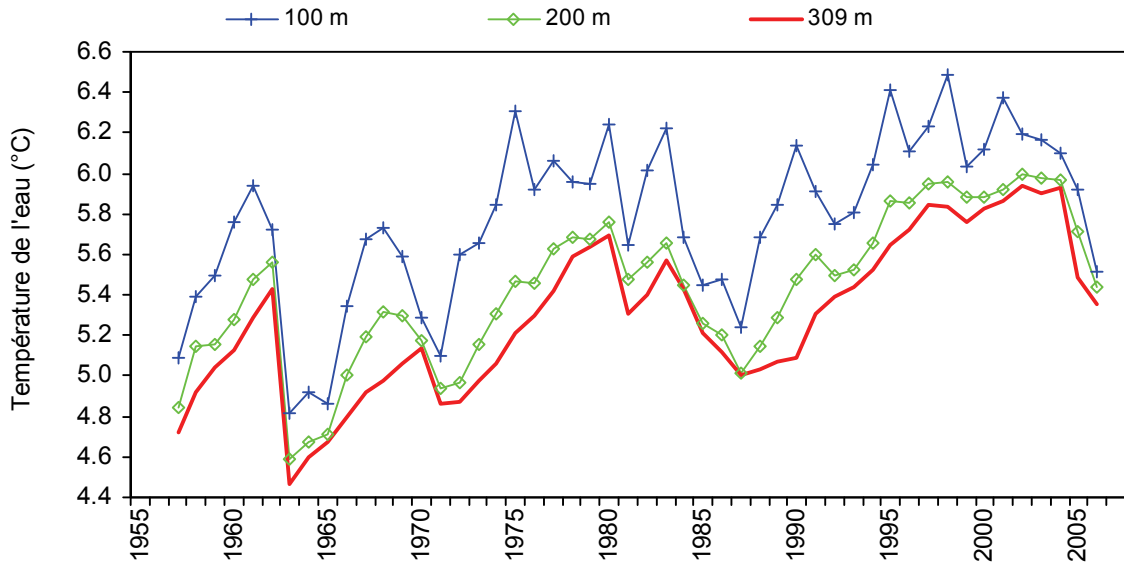


Figure 4 : Evolution de la température moyenne de l'eau à 100, 200 et 309 mètres de profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

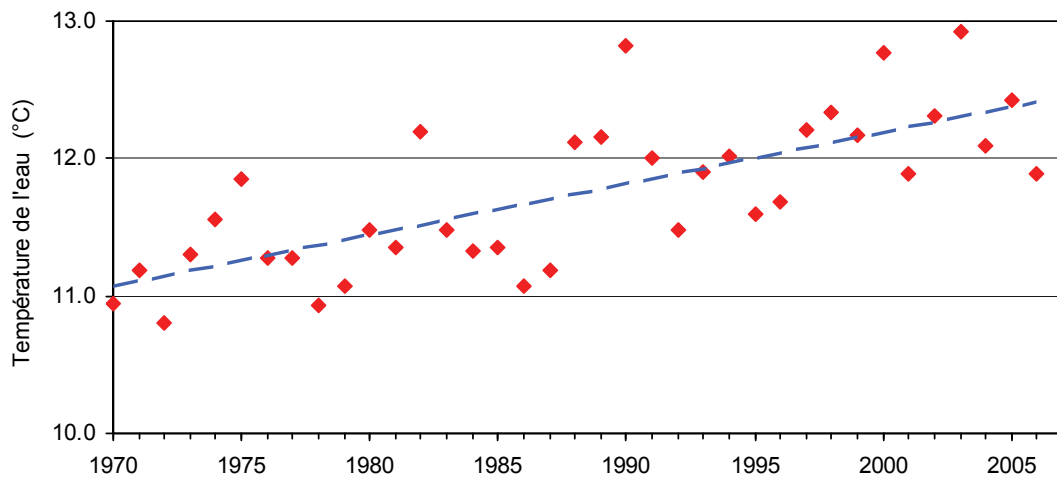


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du Léman à 5 mètres de profondeur - Grand Lac (SHL2).

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

En été en surface, les températures observées sont proches des années précédentes avec un maximum à 23.5°C le 18 juillet 2006.

La figure 7 représente l'évolution de la température depuis 1996 de la colonne d'eau du lac à la station SHL2. 2005 et 2006 apparaissent comme deux années particulières avec de faibles températures et une couche importante particulièrement froide (inférieure à 5.5°C au-dessus de 100 m). Ces deux années avec leur brassage se distinguent donc nettement des autres années.

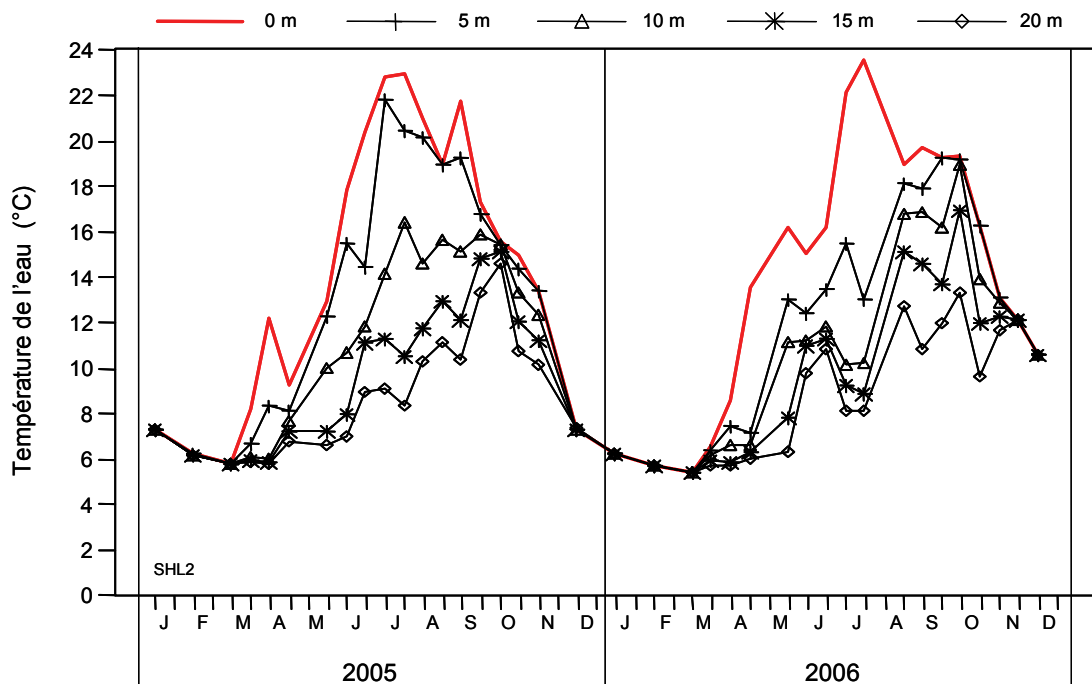


Figure 6 : Température de l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Le brassage complet en mars 2006 a redistribué les nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau. Les concentrations des nutriments sont homogènes dans toute la masse d'eau. Les valeurs moyennes pour l'année 2006 sont : 22.6 $\mu\text{gP/L}$ en phosphate (24.1 $\mu\text{gP/L}$ en 2005), 590 $\mu\text{gN/L}$ en moyenne pour l'azote nitrique (du même ordre qu'en 2005 : 630 $\mu\text{gN/L}$) et la silice avec 1.66 mg/L en surface et 1.57 mg/L en moyenne, soit moins qu'en 2005 (2.78 mg/L) et du même ordre de grandeur que les années avant 2005. Les diatomées (principales consommatrices de silice) présentent une abondance relative moyenne plus faible en 2006 qu'en 2005 (DRUART, 2007).

Le carbone organique total est aussi homogénéisé le long de la colonne d'eau avec une moyenne de 0.91 mgC/L.

Lors de ce brassage, on observe une transparence très importante de 15.5 m.

L'activité phytoplanctonique reprend après le brassage, dès la campagne suivante : le 27 mars. Les concentrations en phosphate indiquent une consommation en surface, avec des concentrations passant de 24 $\mu\text{gP/L}$ à 20 $\mu\text{gP/L}$ jusqu'à 10 m. Dès le 4 avril, le phosphate est très largement consommé avec des concentrations entre 5 et 9 $\mu\text{gP/L}$ entre 0 et 15 m. La transparence diminue aussi avec un minimum le 18 avril avec 2.4 m, traduisant la forte concentration d'algues dans la colonne d'eau, majoritairement du nanoplancton (DRUART, 2007).

Après cette forte croissance phytoplanctonique, un ralentissement de la consommation est observé lors de la période des eaux claires entre le 15 mai et le 12 juin. Cette période correspond à la consommation du phytoplancton par le zooplancton proliférant à cette période. La colonne d'eau est alors plus transparente avec un maximum de 10.4 m le 6 juin (figure 12). L'azote ammoniacal est significativement rejeté par le zooplancton durant cette phase des eaux claires. L'azote ammoniacal est alors important dans l'épilimnion le 15 mai avec 38 $\mu\text{gN/L}$ à 5 m. Pour le reste de l'année, cette concentration demeure inférieure ou de l'ordre de 10 $\mu\text{gN/L}$.

Après la période des eaux claires, le 12 juin, la consommation en nutriments devient plus importante. Le **phosphate** est consommé jusqu'à des valeurs oscillant entre 3 et 1 $\mu\text{gP/L}$ jusqu'en décembre, l'épaisseur de la couche appauvrie en phosphate augmente de 25 m en juin à 35 m en décembre, avec une influence sur la couche de 50 m qui atteint une concentration de 16 $\mu\text{gP/L}$ en décembre (figures 8 et 9). Cet appauvrissement important se situe au-delà de la zone photique et laisse supposer des processus biologiques ou physiques autres que la consommation photosynthétique classique¹. De plus, les mesures de productions primaires sont nulles à 30 m (TADONLEKE, 2007).

¹ Cette problématique, observée dans plusieurs lacs, fait l'objet d'un projet de recherche à l'INRA - UMR/CARTELE.

Température (°C) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2006

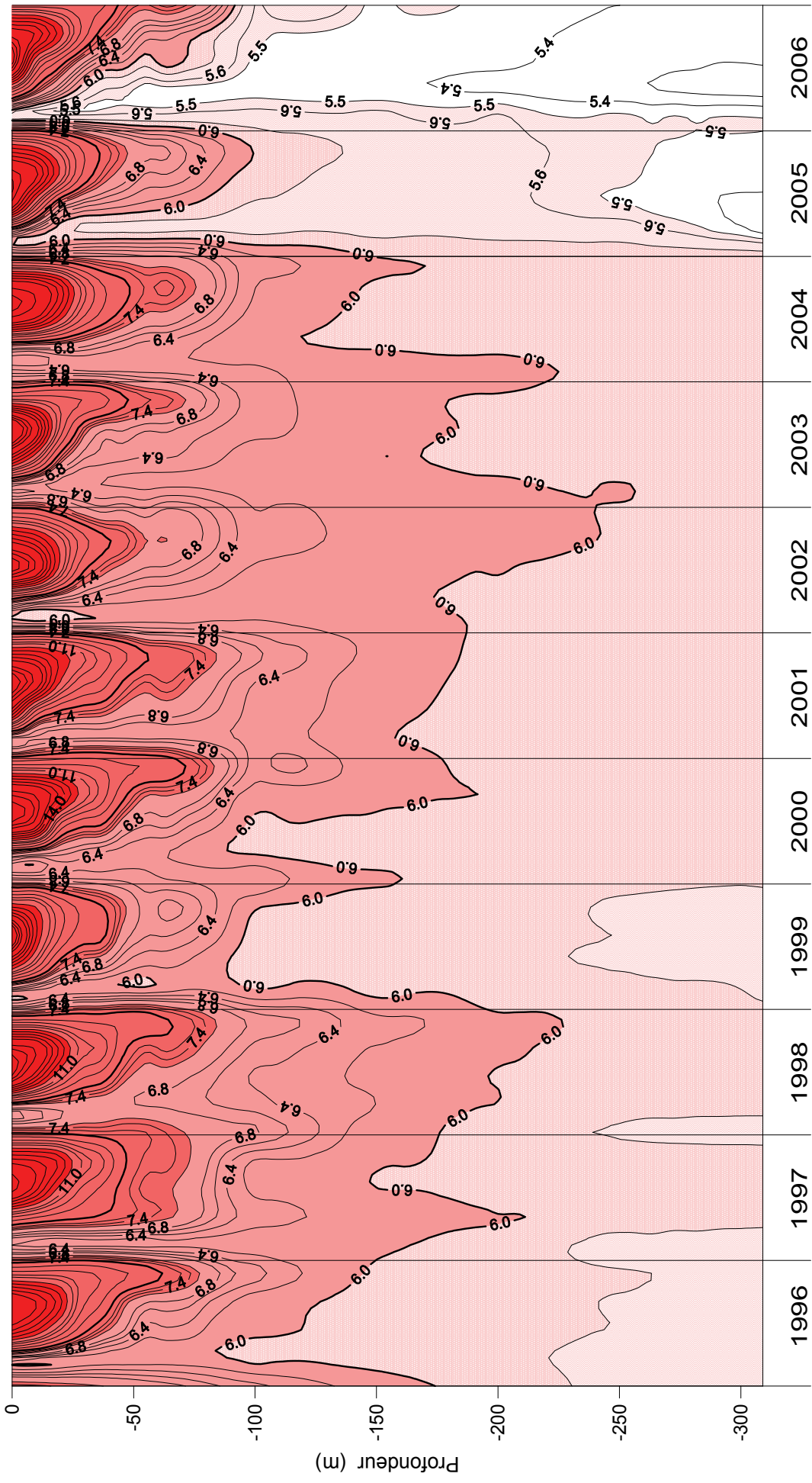


Figure 7 : Température des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de présentation graphique peuvent apparaître (différence de lissage des courbes d'isovaleurs)).

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)).

L'**azote nitrique** et la **silice** ont un comportement similaire à celui du phosphate dans l'épilimnion, bien qu'ils ne soient pas totalement consommés comme l'est le phosphate et que l'épaisseur de la couche consommée est plus restreinte (figures 10 et 11). Après le brassage l'azote nitrique est consommé jusqu'à 280 µgN/L en surface et la silice est consommée jusqu'à 0.76 mg/L. Ces deux nutriments augmentent pendant la période des eaux claires et diminuent à partir du 12 juin avec un minimum de 100 µgN/L en azote nitrique le 8 juillet et 0.07 mg/L en silice le 3 octobre.

Le **carbone organique particulaire** et l'**azote particulaire** sont cohérents avec cette activité de production primaire. Ils augmentent fortement avec le départ de l'activité photosynthétique avec un maximum le 24 avril à 2.5 m de 1'179 µgC/L et 222 µgN/L, ils restent ensuite importants dans l'épilimnion jusqu'à la fin de l'année (figure 16). Le carbone organique total suit aussi la même tendance, avec un maximum le 24 avril à 2.5 m de 1.99 mgC/L.

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 27 mars avec un maximum de 18.7 mgO₂/L le 24 avril à 2.5 m. La production primaire présente aussi un pic significatif lors de cette campagne (TADONLEKE, 2007). Après la phase des eaux claires, la sursaturation faiblit jusqu'à la fin de l'année jusqu'à des valeurs de saturation en oxygène dissous aux alentours de 100 % (figure 14).

Les températures estivales des couches superficielles en 2006 sont habituelles avec un maximum de 23.5°C le 18 juillet en surface (figure 3b). Lors de ce maximum de température, le maximum de production primaire est observé avec une valeur proche de celle du 24 avril et très supérieure à celles du reste de l'année.

Une production primaire importante est donc observée ponctuellement le 24 avril et le 18 juillet. Elle reste présente après la période des eaux claires, toujours nettement limitée par le phosphate et assez faible d'après la consommation en azote nitrique et la sursaturation en oxygène dissous et les valeurs de production primaire par rapport aux années précédentes (TADONLEKE, 2007).

La figure 13 représente l'évolution de la chlorophylle *a* en surface depuis 1996 et permet de visualiser l'évolution des périodes et des couches d'activité phytoplanctonique.

La figure 17 représente le rapport Nminéral/PO₄ 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 le développement à ces périodes de la biomasse des cyanobactéries qui sont adaptées à de telles conditions.

Les concentrations en phosphore indiquent des conditions de production primaire limitées par rapport aux années précédentes, avec en été de faibles concentrations de phosphore disponible. La biomasse estivale en phytoplancton est d'ailleurs relativement faible en 2006. De telles teneurs dans les 35 premiers mètres limitent la croissance algale dans la zone pélagique.

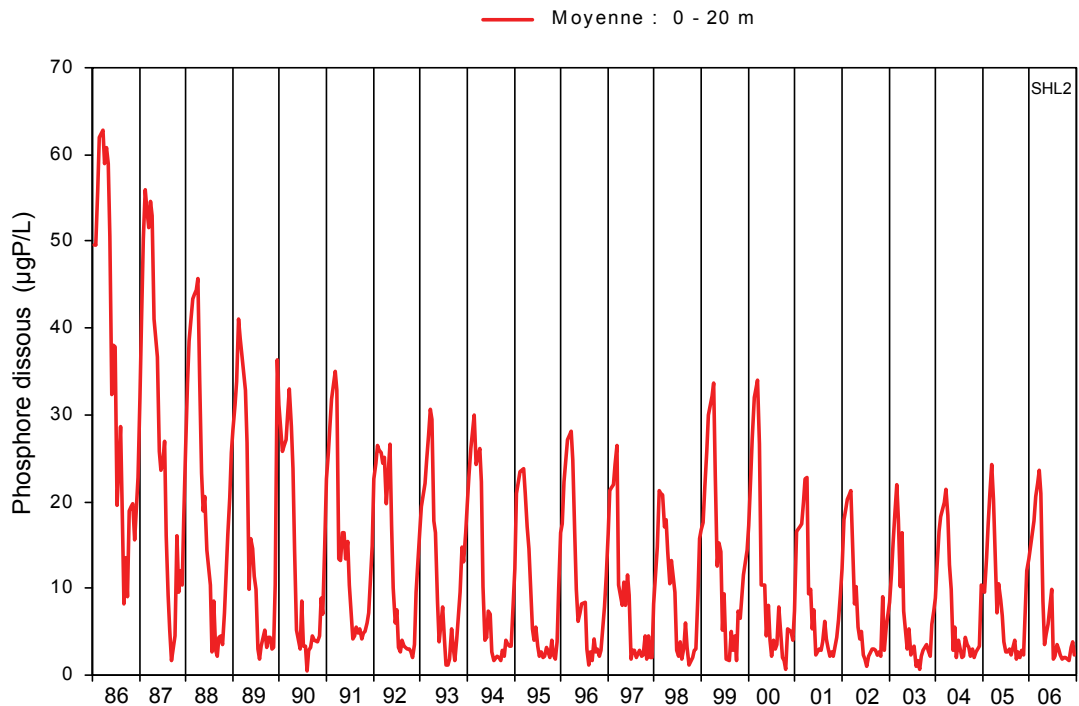


Figure 8 : Concentration en phosphore dissous (PO₄³⁻) des eaux de la couche superficielle (moyenne 0-20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 8 : Concentration of dissolved phosphorus (PO₄³⁻) in the water in the surface layers (mean 0-20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

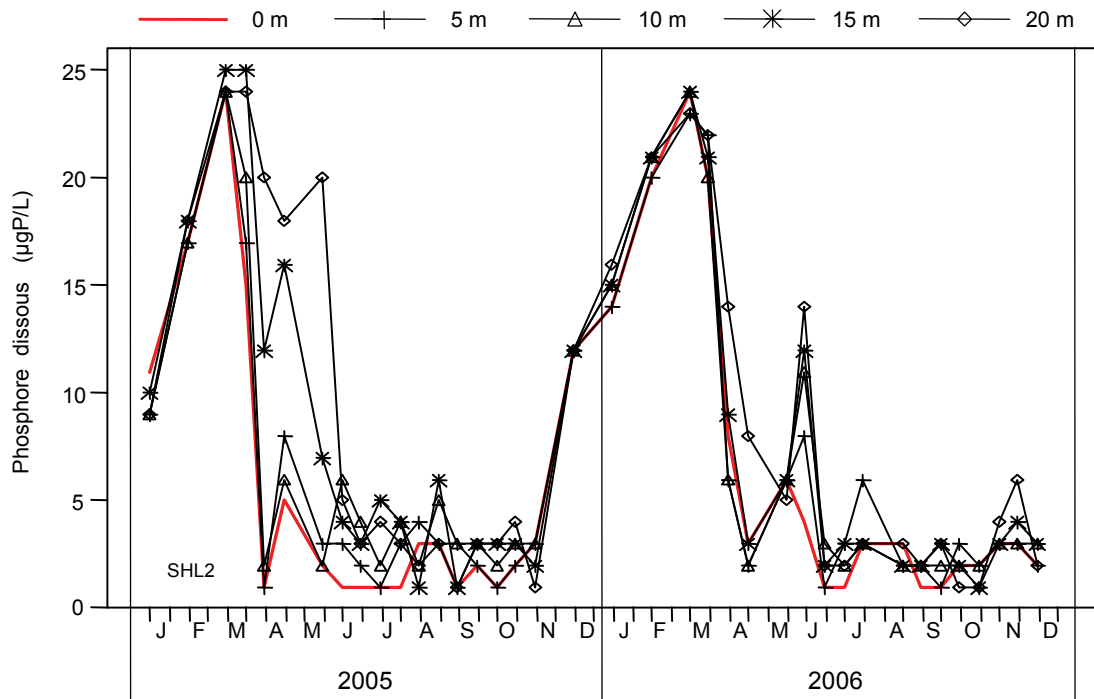


Figure 9 : Concentration en phosphore dissous (PO_4^{3-}) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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).

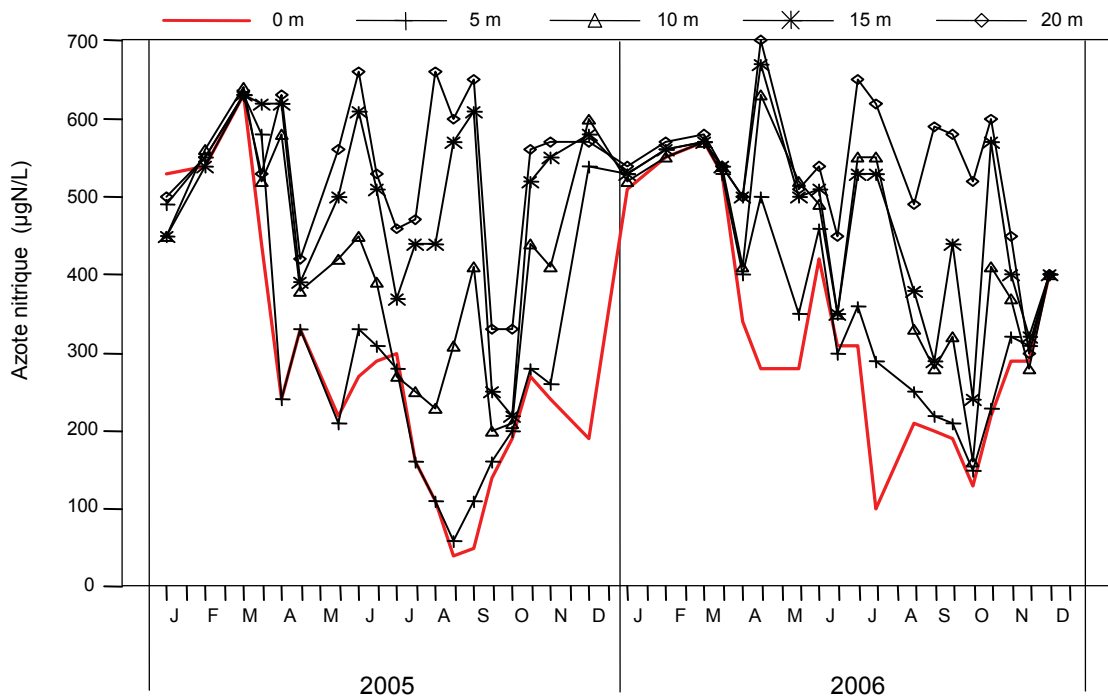


Figure 10 : Concentration en nitrate (NO_3^-) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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)

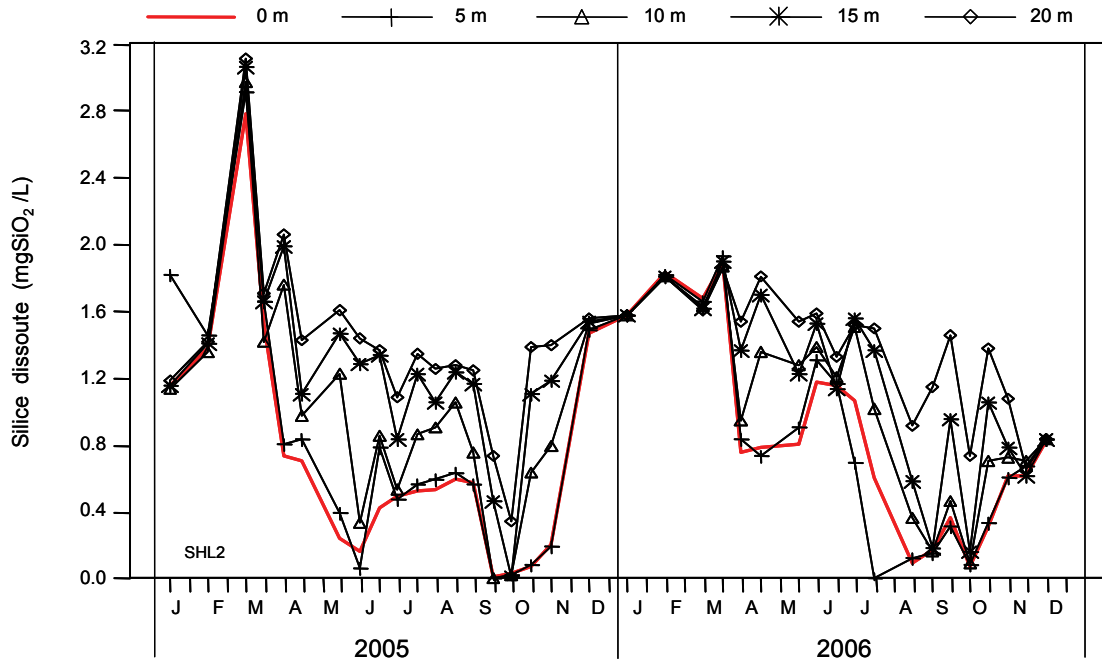


Figure 11 : Concentration en silice (SiO_2) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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).

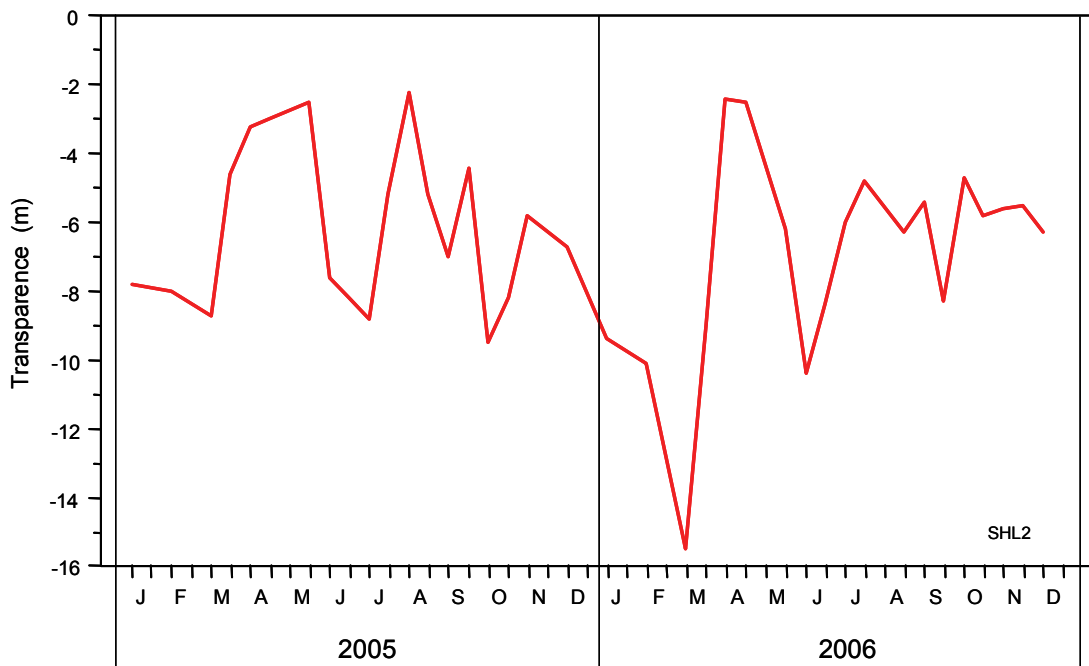


Figure 12 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Chlorophylle a (mgChla / m3) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2006

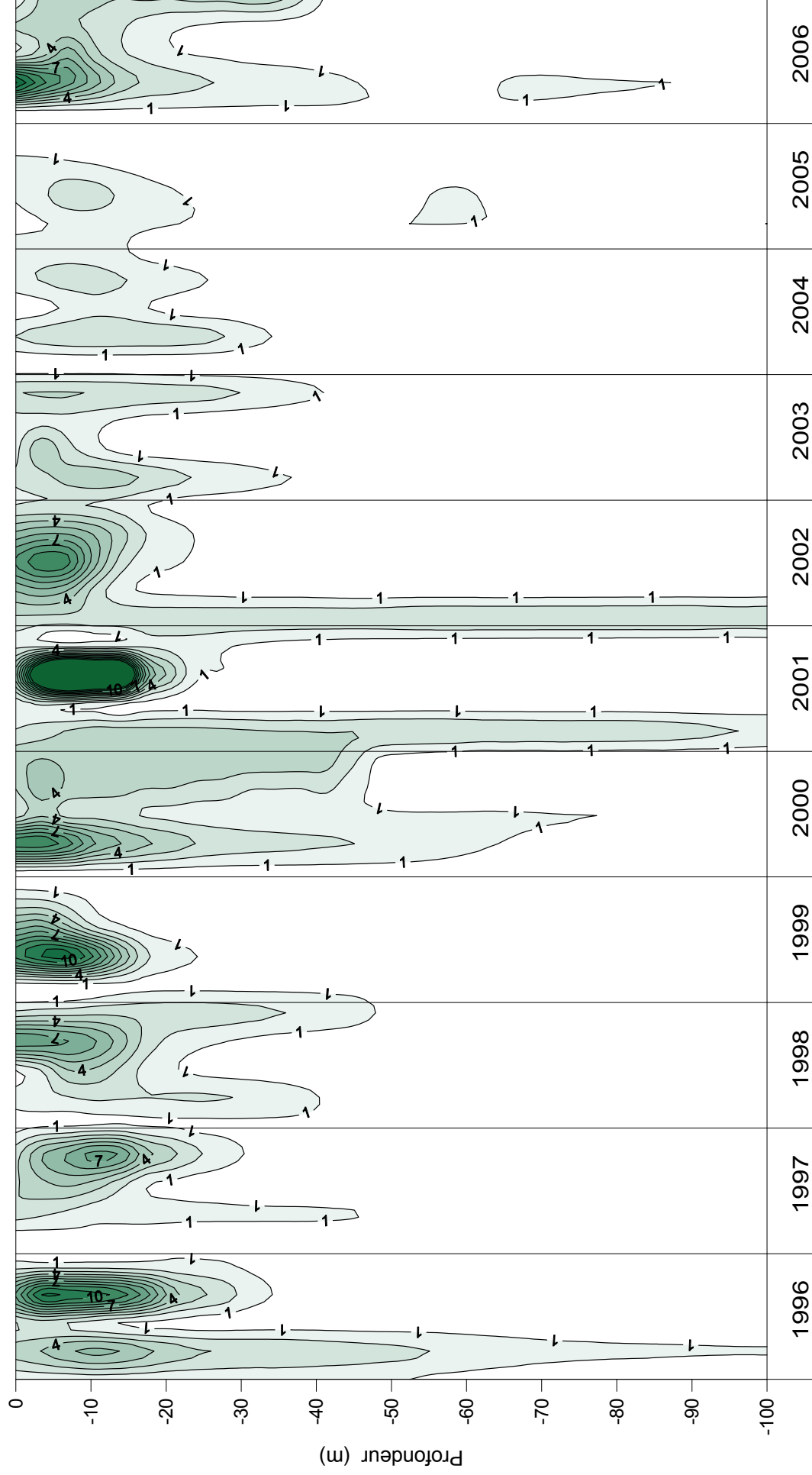


Figure 13 : Concentration en chlorophylle a dans les différentes couches du Léman (Grand Lac - SHL2). (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 13 : 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)).

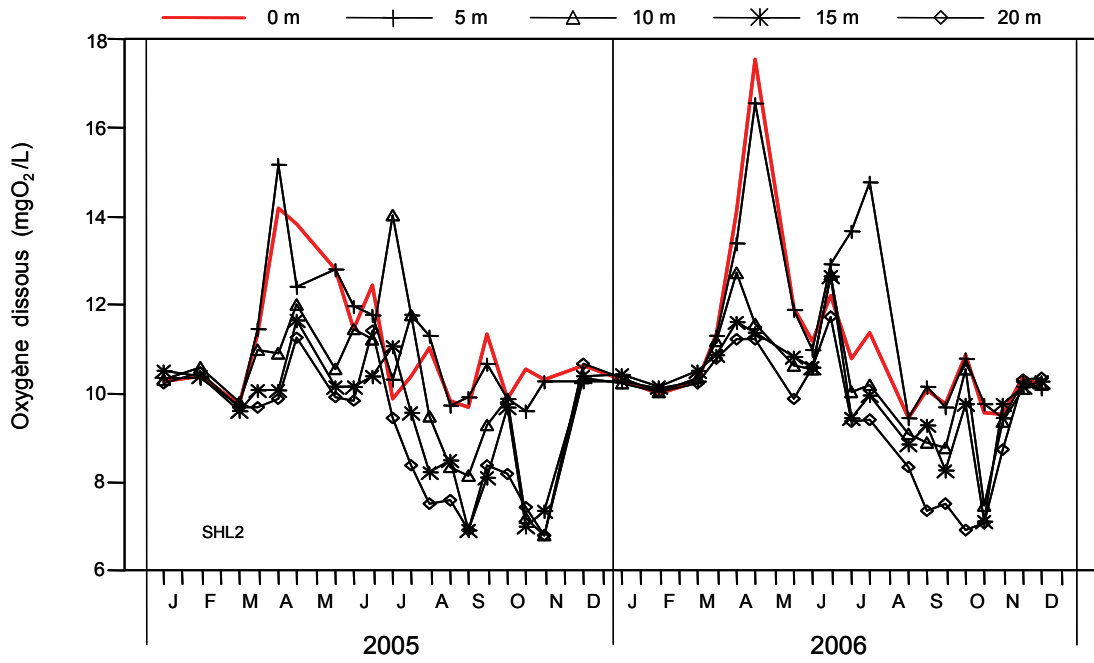


Figure 14 : Concentration en oxygène dissous des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).
Figure 14 : Concentration of dissolved oxygen in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

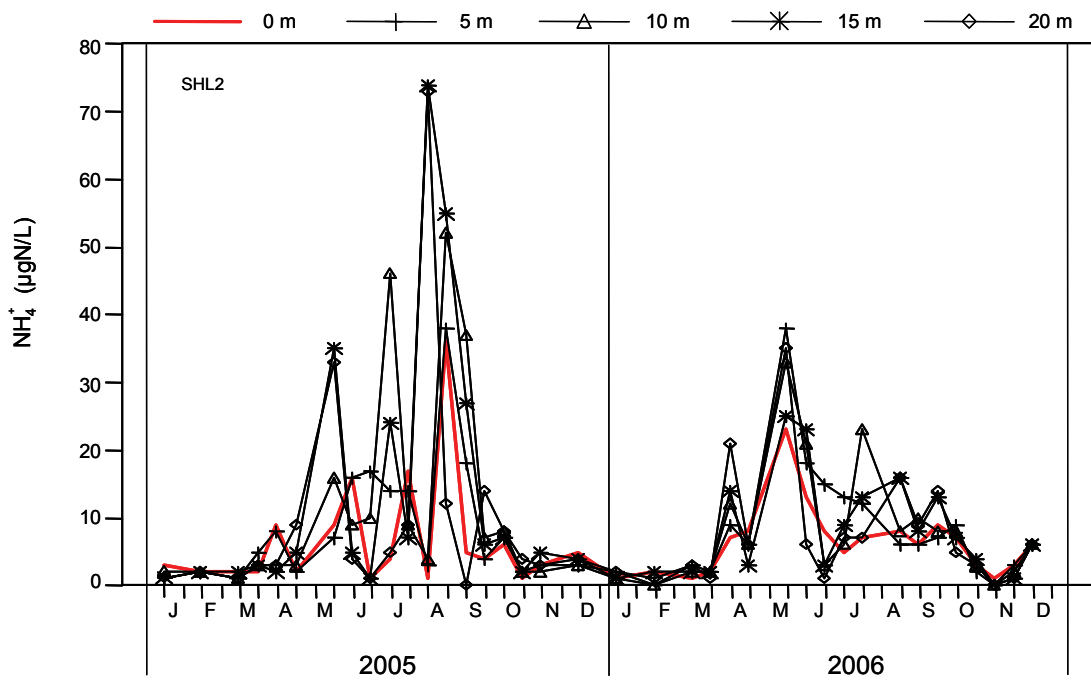


Figure 15 : Concentration en azote ammoniacal des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).
Figure 15 : Concentration of ammoniacal nitrogen in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

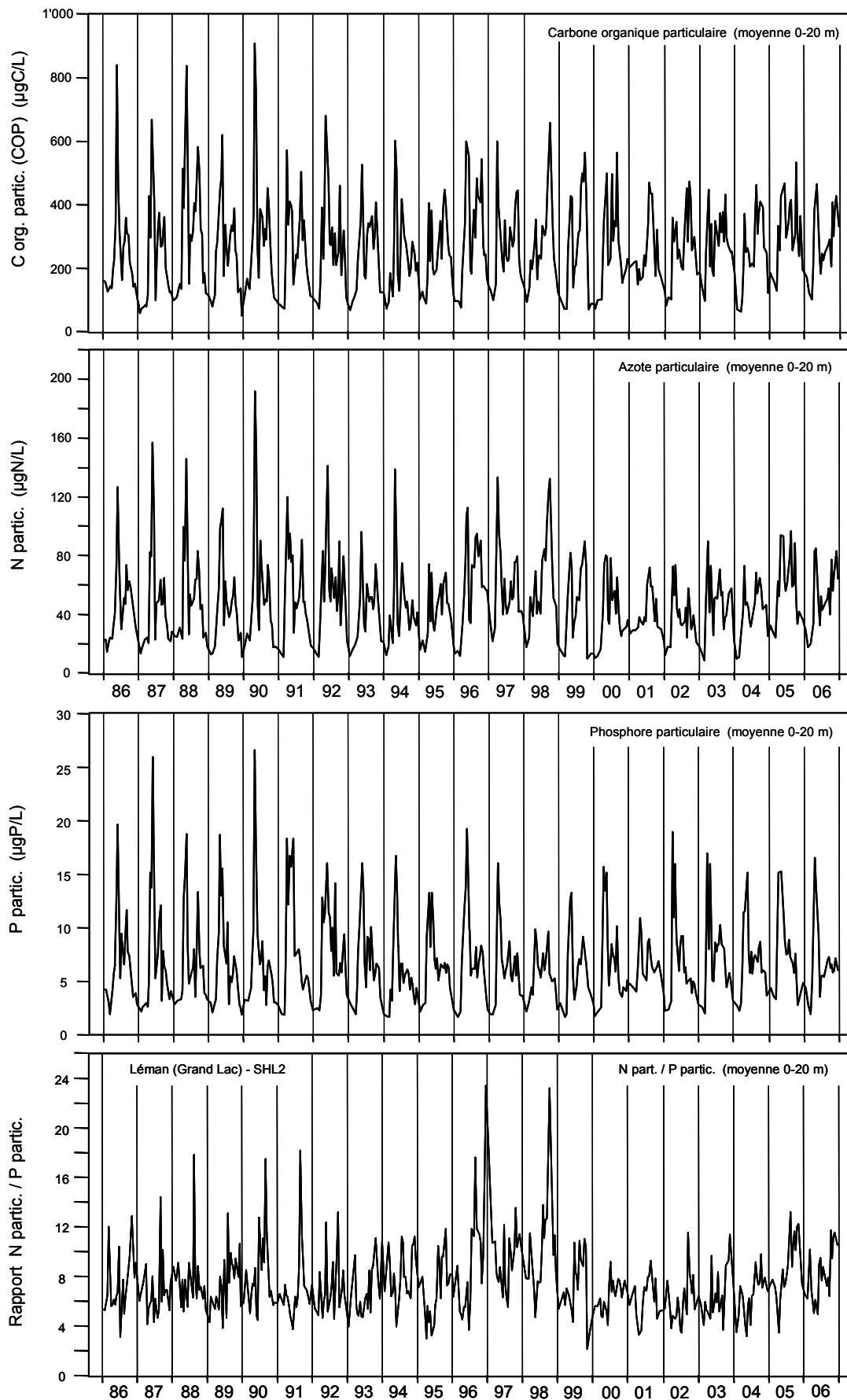


Figure 16 : Concentrations en carbone organique, azote et phosphore particulaires des eaux de la couche superficielle (0-20 m) et rapport Nparticulaire / Pparticulaire, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 16: 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).

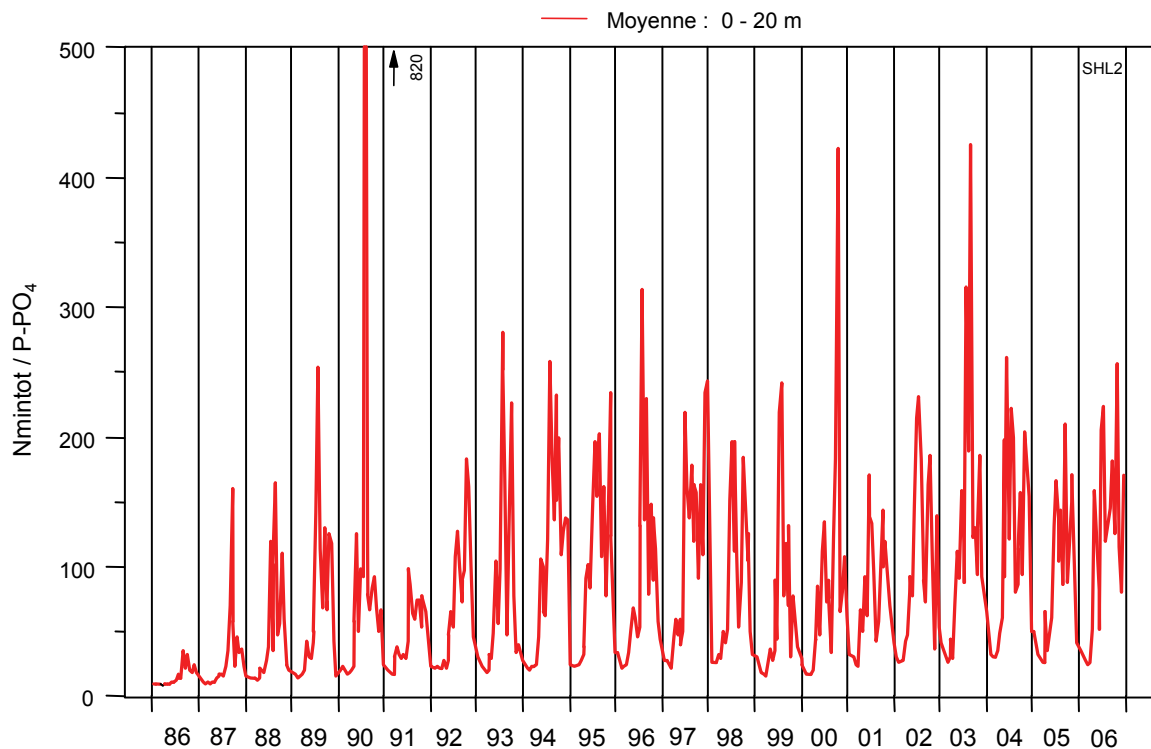


Figure 17 : Rapport Nminéral / P-PO₄, Léman - Grand Lac (SHL2).
 Figure 17 : Nminéral / P-PO₄, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

4. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

Deux brassages complets se succèdent dans le lac Léman, en 2005 et 2006, et entraînent une très bonne réoxygénation des eaux du fond et une dynamique spéciale en 2006. Après le brassage, un maximum est observé le 27 mars avec 10.9 mgO₂/L au fond. La décomposition par les bactéries de la matière organique sédimentée appauvrit ensuite le fond en oxygène dissous jusqu'à la fin de l'année sans toutefois atteindre des valeurs faibles. Le minimum est observé en fin d'année avec 3.37 mgO₂/L avec une couche appauvrie en oxygène dissous dans les 5 derniers mètres.

Cette dynamique limite l'anaérobiose et le phénomène de réduction du manganèse et du fer. Ainsi le relargage entraîné par la réduction des sels de manganèse et de fer est limité. Le relargage du manganèse est surtout important le 17 août avec 310 µg/L au fond, puis reste faible tout le reste de l'année avec une concentration inférieure à 100 µg/L. Il en est de même du relargage du fer avec un maximum le 24 avril avec 70 µg/L et des valeurs faibles tout le reste de l'année.

La faible réduction des sels de manganèse et de fer limite la diffusion du phosphore contenu dans les sédiments, constituant la charge interne du lac. Le phosphore est donc faiblement relargué durant toute l'année avec une dynamique très différente des dernières années et pas de pics significatifs, le maximum observé est de 49 µgP/L le 11 décembre.

La situation est identique pour la silice qui ne présente pas de pics mais un maximum de 5.44 mg/L en décembre. Contrairement aux années précédentes, la réduction de l'azote nitrique en azote ammoniacal a été limitée, ce dernier présente des concentrations toujours inférieures à 10 µgN/L hormis le 6 juin (15 µgN/L) et le 18 juillet (26 µgN/L).

La température des eaux du fond est constante toute l'année entre 5.3°C et 5.4°C, soit stable par rapport à 2005.

Ainsi la dynamique du fond de l'année 2006 est particulière du fait des deux brassages complets consécutifs. Les phénomènes de relargage ont été fortement limités par l'important stock d'oxygène apporté lors des brassages. La contribution de la charge interne lors des dernières années a été estimée à une valeur de l'ordre de 30 à 60 tonnes de phosphore. En 2006, l'excès de phosphore entre 290 m et le fond du lac en fin d'année est estimé à 20 tonnes de P ; son impact sera considérablement limité lors des prochains brassages.

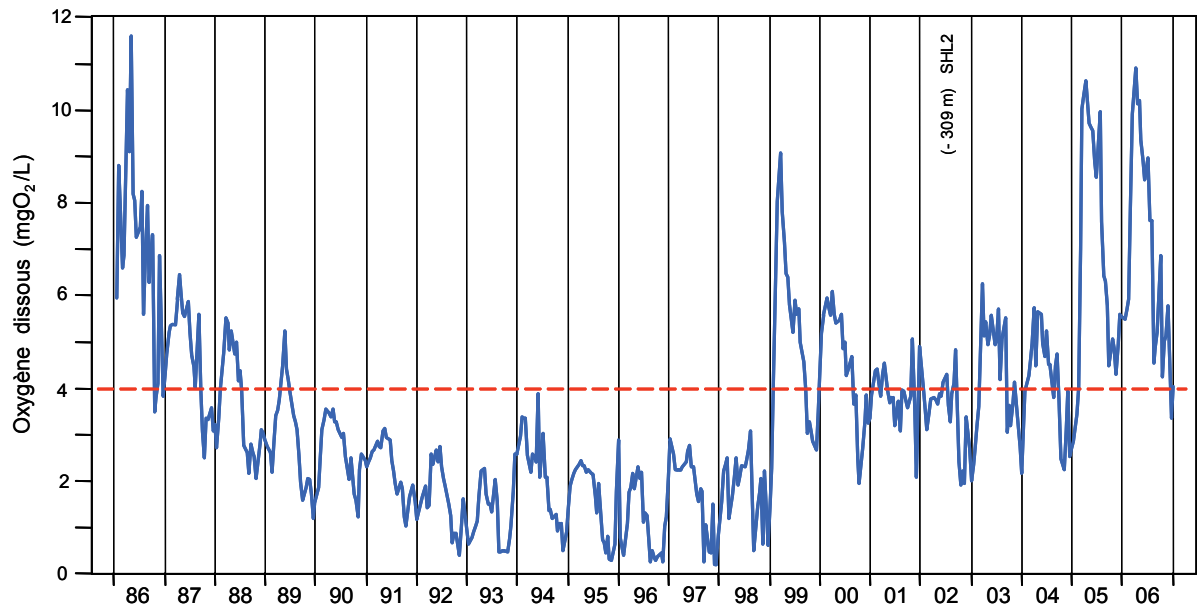


Figure 18 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

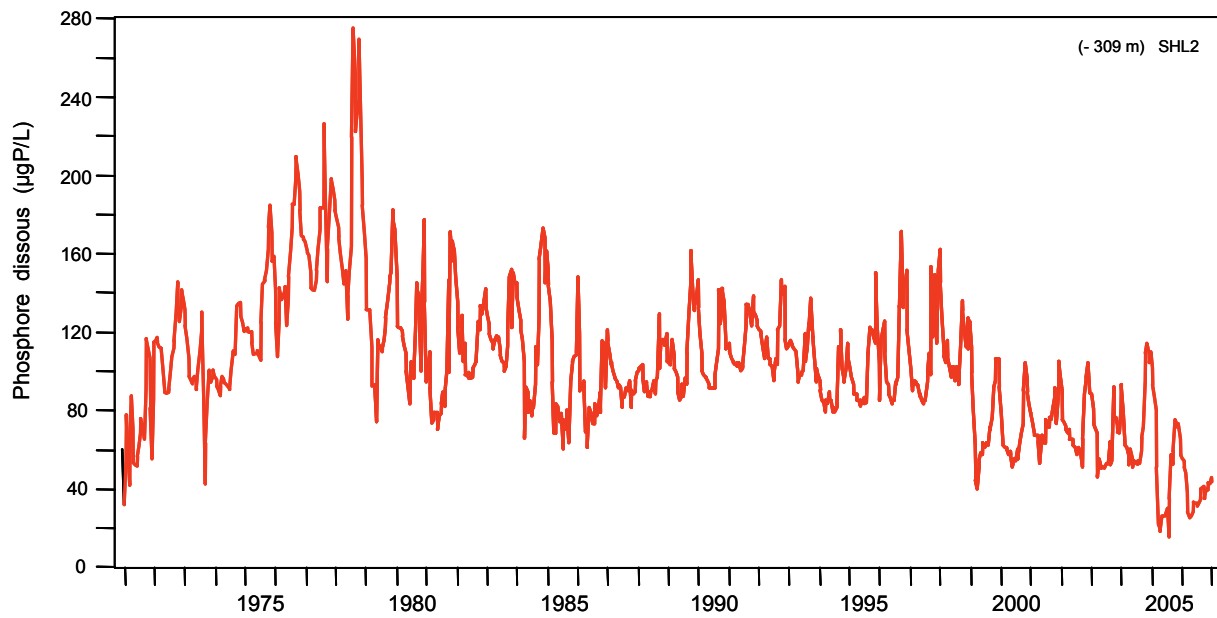


Figure 19 : Concentration en phosphore dissous (PO_4^{3-}) des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Oxygène (mg/L) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2006

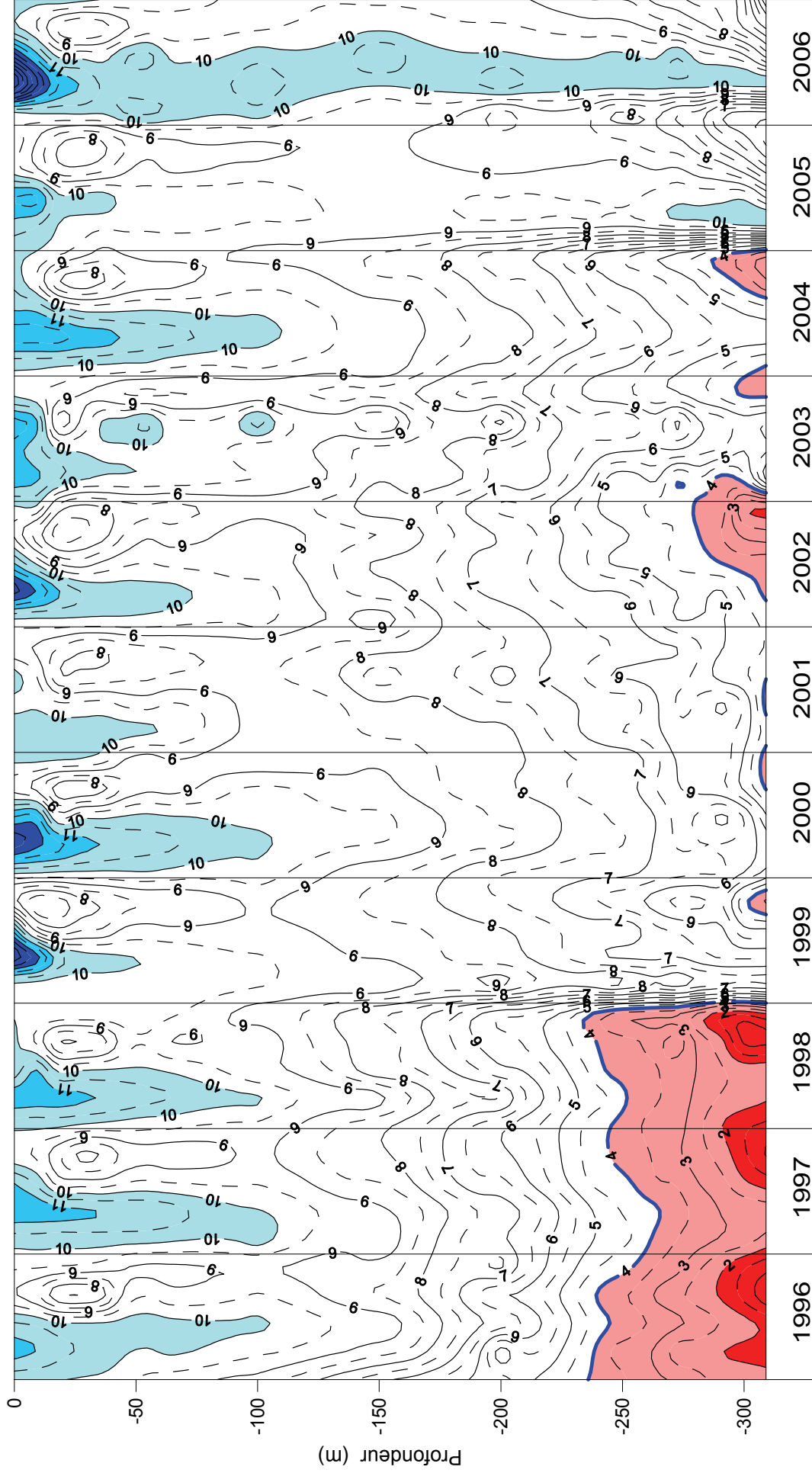


Figure 20 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur. (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 20 : 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).

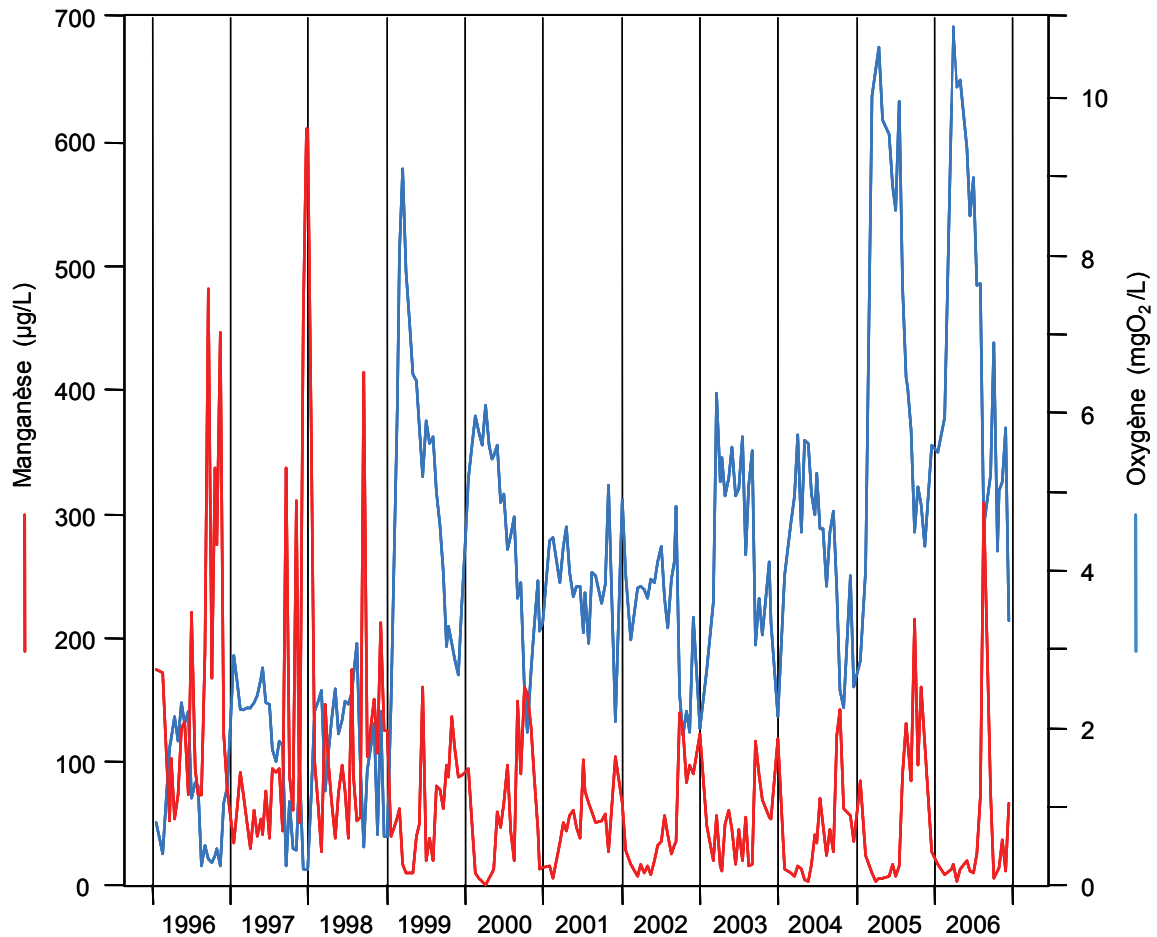


Figure 21 : Comparaison des concentrations en manganèse total et en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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 concentrations moyennes pondérées ¹ 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

Les deux brassages complets consécutifs du lac ont entraîné un forte réoxygénation de la colonne d'eau avec 10.4 mgO₂/L en moyenne le 15 mars et 9.80 mgO₂/L en moyenne sur toute l'année, soit une réoxygénation plus importante qu'en 2005 et que ces 20 dernières années. Une telle oxygénation a été observée en 1986 (brassage important) avec 9,86 mgO₂/L en moyenne sur l'année.

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, 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 mgO₂/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 mgO₂/L depuis 1957.

Ainsi sur les figures 20, 22 et 23, on remarque que depuis les années 1970, 2005 fut la seule année durant laquelle la concentration en oxygène dissous fut toujours supérieure à 4 mgO₂/L. En 2006 la concentration en oxygène dissous descend ponctuellement et légèrement au dessous de 4 mgO₂/L en fin d'année avec 3.37 mgO₂/L.

¹ Les concentrations moyennes pondérées sont calculées de la façon suivante :

$$C = \frac{\sum (C_i \cdot V_i)}{V} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} C_i = \text{concentration dans la strate} \\ V_i = \text{volume de la strate} \\ V = \text{volume total du Grand Lac} \end{array}$$

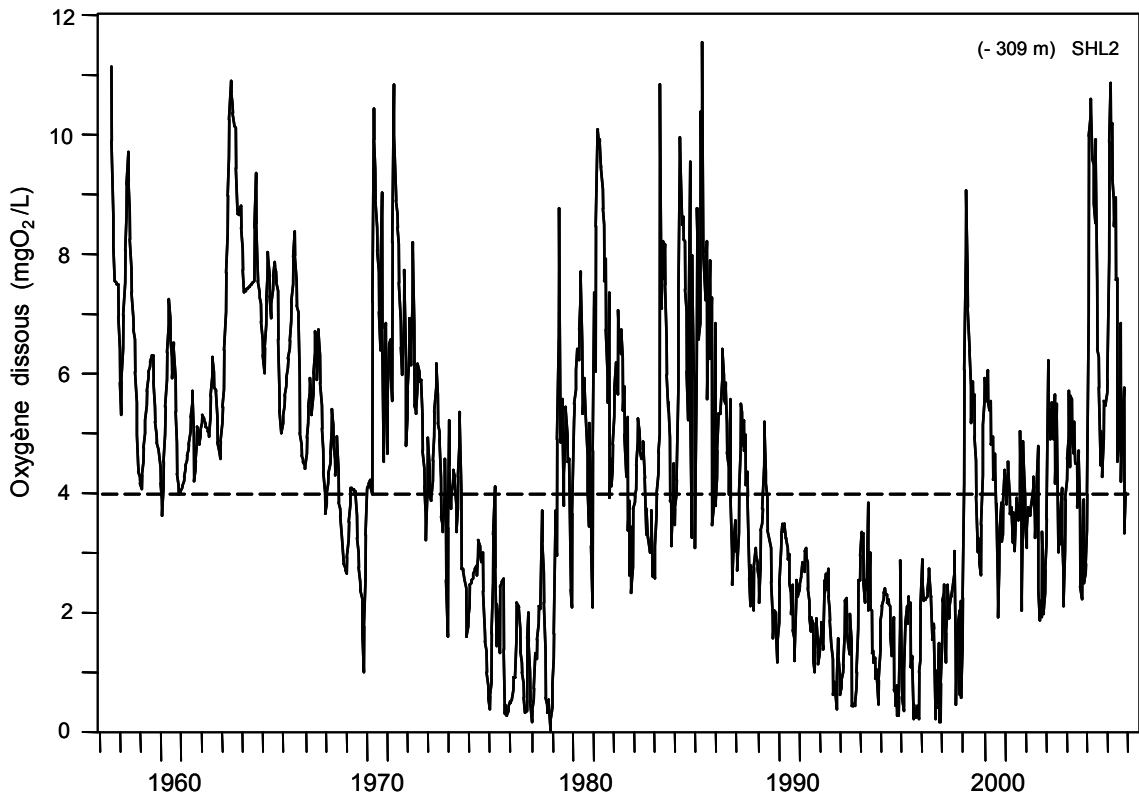


Figure 22 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

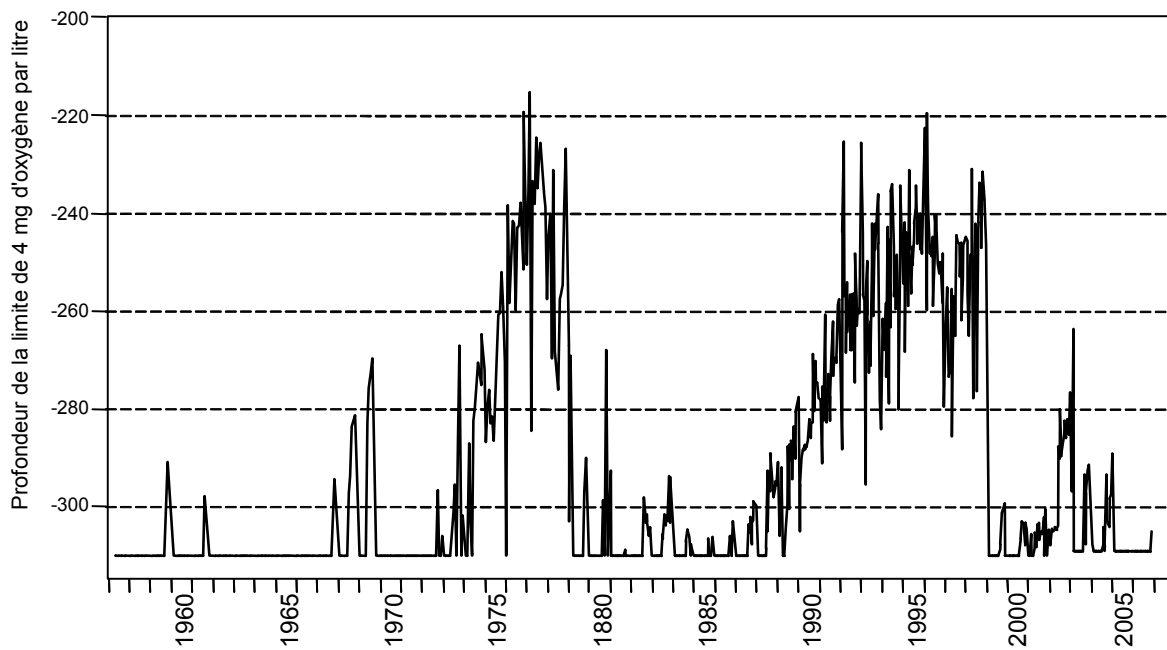


Figure 23 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mgO₂/L dans le Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Le stock de phosphore diminue de 6 % par rapport à 2005 et passe de 2'520 tonnes de P en 2005 à 2'370 tonnes de P en 2006, soit 150 tonnes de moins. La concentration moyenne du Léman est donc de 27.7 µgP/L en 2006 et continue la tendance des 20 dernières années à la diminution vers l'objectif fixé de 20 µgP/L pour limiter raisonnablement la production algale. Si la diminution continue de la même manière que depuis 1986, la concentration moyenne du lac en phosphore total devrait atteindre 20 µgP/L aux alentours de 2018 .

Le phosphate suit la même tendance avec une baisse de 6 % et une concentration moyenne de 22.6 µgP/L, soit 1'940 tonnes de P.

La diminution du stock de phosphore de cette année ne peut être attribuée à la consommation et au piégeage par le bloom important de cyanobactéries (DRUART, 2007). En effet, ce bloom a été localisé géographiquement et, en moyenne sur l'année 2006, en SHL2 la biomasse de cyanobactéries a été inférieure à celle de 2005 (278 µgC/L en 2006 contre 349 µgC/L en 2005).

Un bilan global entrée/sortie du phosphore ne peut être effectué de manière simple sur le lac en comparant les flux des apports et le flux à l'exutoire (QUETIN, 2007) avec le stock du lac. Les interactions et les échanges entre la fraction dissoute et la fraction particulaire du phosphore sont constants et importants, avec une fonction de relargage du P-particulaire dans le lac dans certains cas (à l'interface rivière lac lorsque le lac est peu concentré en été, au niveau des sédiments en conditions réduites...) ou une fonction de puit de phosphore par les particules dans d'autres cas (lorsque les particules ont un pouvoir fixateur suffisant) avec un piégeage et une sédimentation. La modélisation de la dynamique complète du phosphore est donc complexe et il faut aussi considérer l'inertie du système induite par le temps de séjour de l'eau dans le lac, variable selon les strates. Les variations interannuelles des flux des apports ne peuvent expliquer directement les variations interannuelles du stock de phosphore dans le lac.

La figure 22 indique l'évolution de la concentration en orthophosphate dans la colonne d'eau depuis 1996.

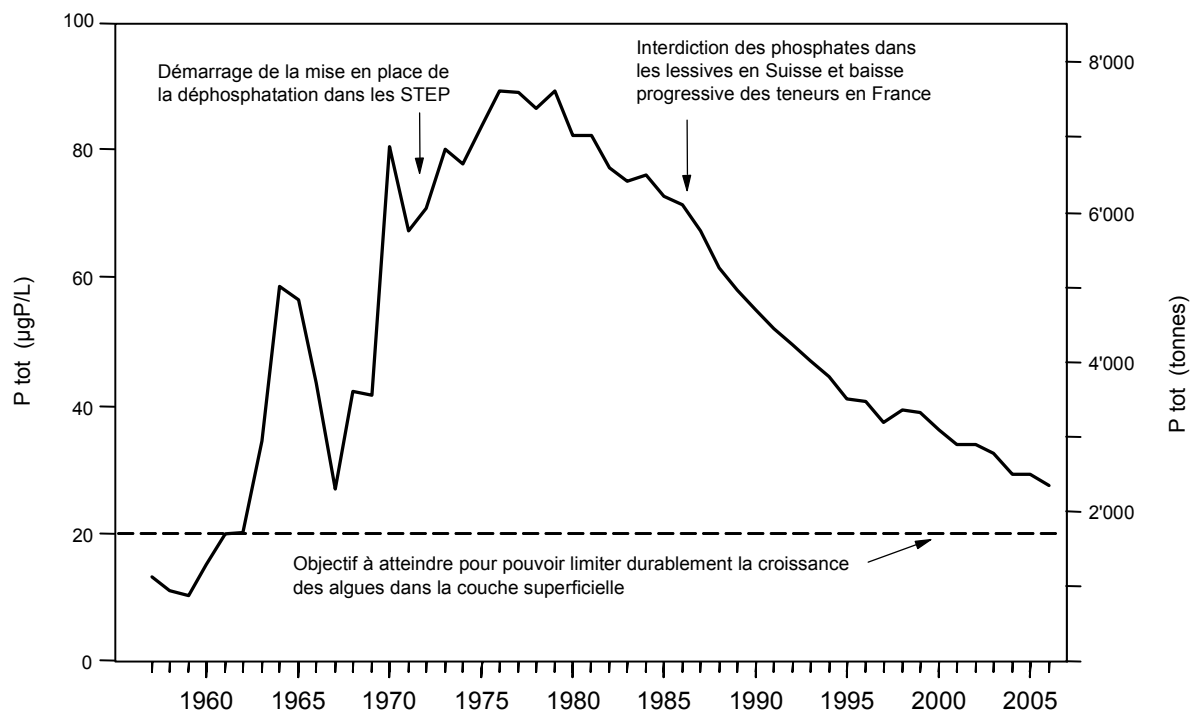


Figure 24 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore total contenu dans le Léman de 1957 à 2006 - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in weighted mean annual total phosphorus concentration and total phosphorus content of the lake Geneva from 1957 to 2006 - Grand Lac (SHL2).

Orthophosphate / P-PO4 (µgP/L) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2006

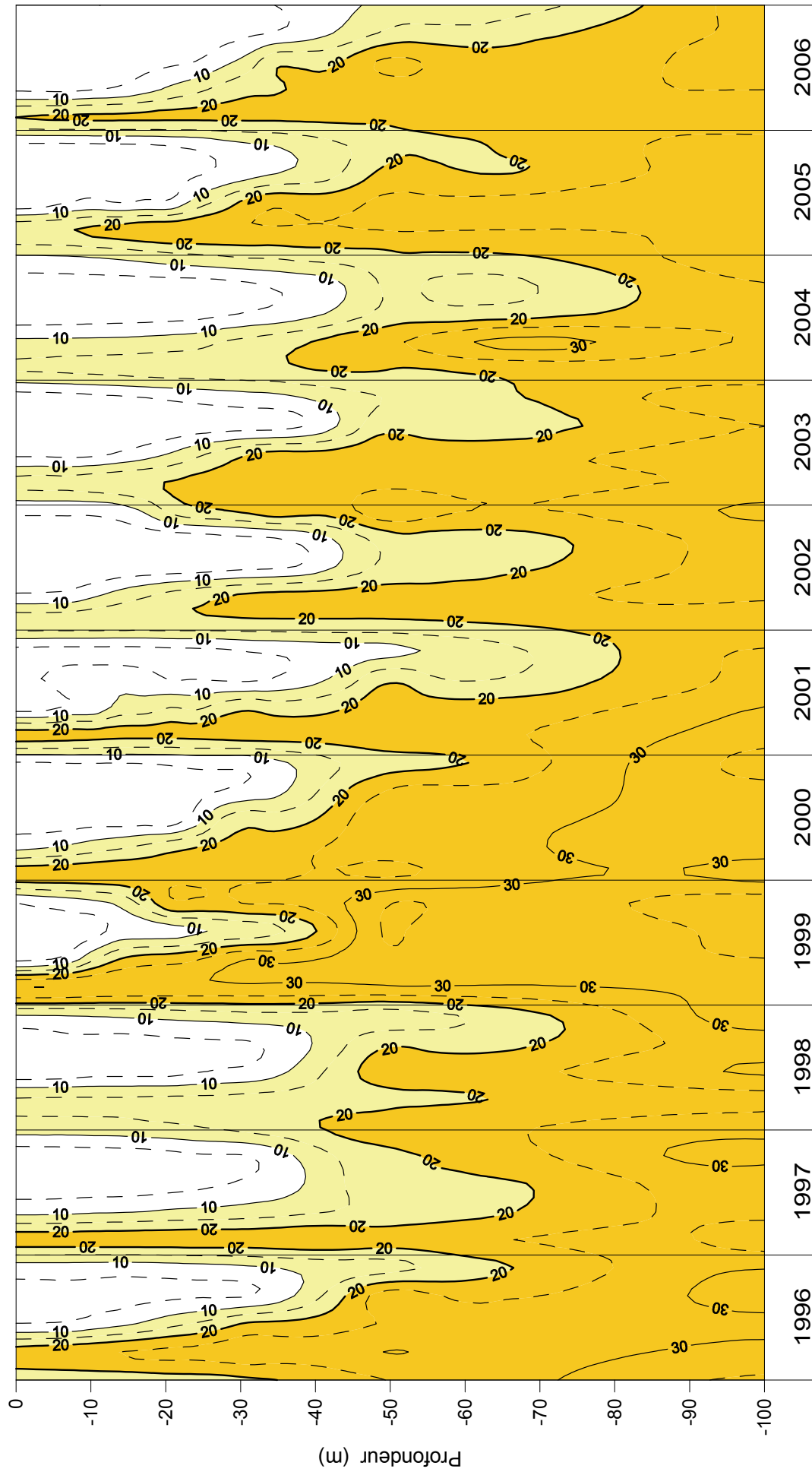


Figure 25 : Concentration en phosphore dissous ($P-PO_4^{3-}$) dans les différentes couches du Léman (SHL2) (zone jaune foncée = concentration supérieure à 20 µgP/L; zone jaune claire = concentration entre 10 et 20 µgP/L) (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications 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 (figure 26) et indique que l'année 2006 se distingue par une très forte transparence lors du brassage suivi d'une eau turbide dès le démarrage de l'activité phytoplanctonique.

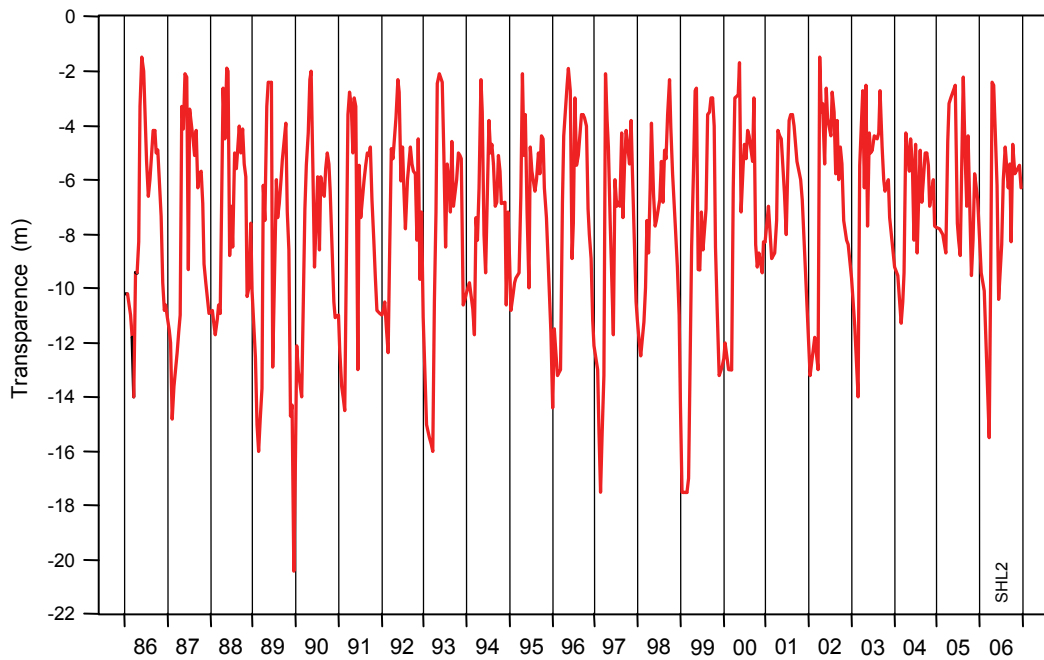


Figure 26 : Evolution de la transparence mesurée avec le disque de Secchi de 1986 à 2005, Léman - Grand Lac (SHL2).

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 augmente de 7 % par rapport à 2005 avec une concentration de 0,67 mgN/L en 2006 soit un stock de 57'460 tonnes de N, l'azote total demeure dans sa variabilité interannuelle des dernières années (figure 27).

L'azote nitrique est constant depuis les années 1990 avec une teneur moyenne annuelle de 0.59 mgN/L en 2006, soit 2.61 mgNO₃/L (la concentration limite de la norme d'eau de consommation en Suisse est de 40 mgNO₃/L et en France de 50 mgNO₃/L).

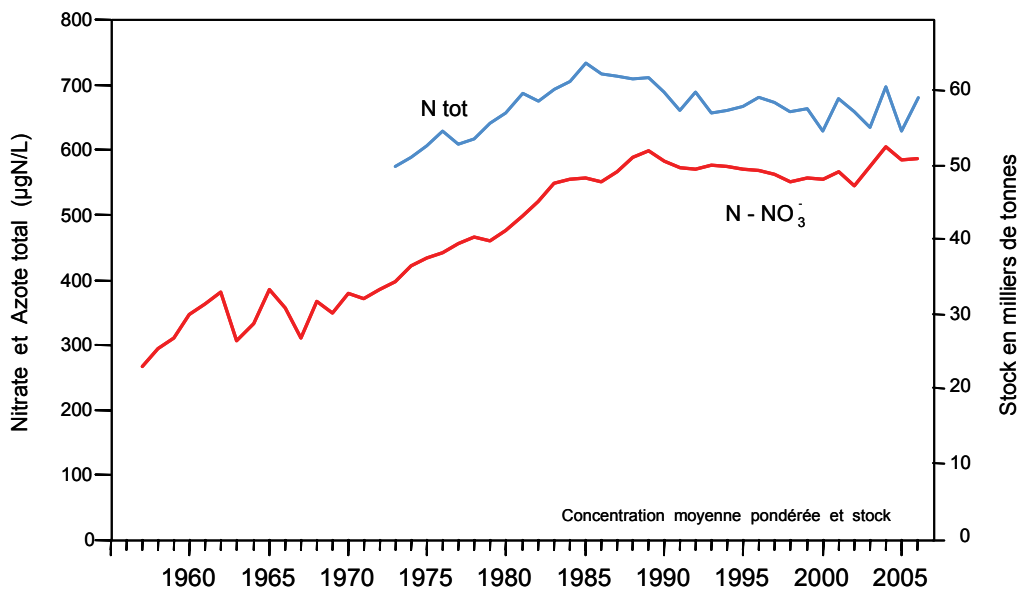


Figure 27 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique contenus dans le Léman de 1956 à 2005, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 27 : Change in the weighted mean annual total nitrogen concentration, in the total nitrogen content and the nitric content of the lake Geneva from 1956 to 2005, 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 et passe de 8.44 mg/L en 2005 à 8.61 mg/L en 2006 (figure 28). Le stock moyen du Grand Lac est alors de 738'040 tonnes de chlorure, soit en augmentation de 2 % par rapport à 2005. Cette augmentation confirme la tendance linéaire d'augmentation.

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 l'industrie majoritairement et les sels de déneigement.

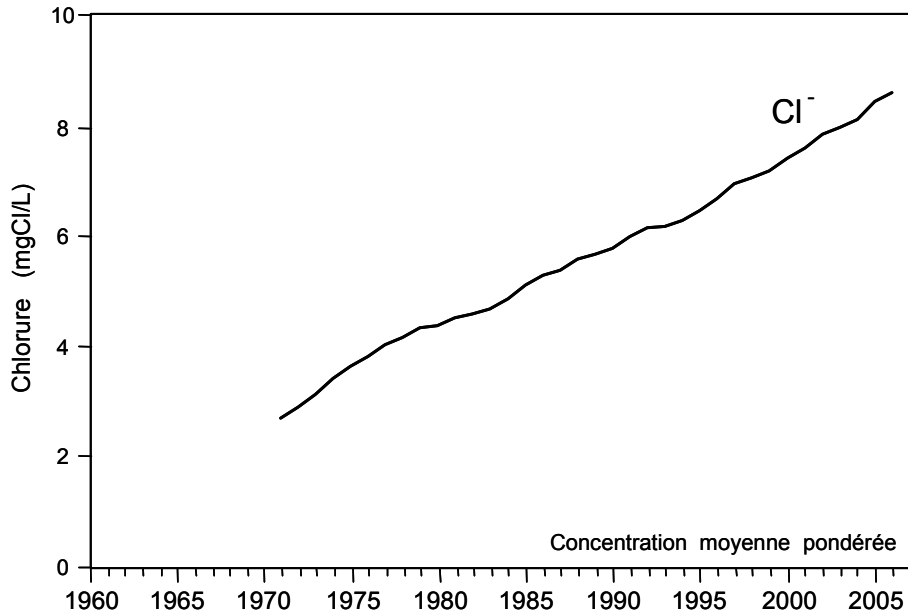


Figure 28 : Evolution de la concentration moyenne annuelle en chlorure, pondérée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2006, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 28 : Change in the weighted mean annual concentration of chloride in the entire mass of the water of the lake from 1971 to 2006, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

6. CONCLUSIONS

Les principales observations en 2006 sont les suivantes :

- L'hiver 2005-2006 a permis un brassage complet qui fait suite au brassage de l'hiver précédent.
- La réoxygénation des eaux du fond par le brassage permet d'atteindre 10.91 mgO₂/L au maximum au mois de mars grâce aux deux brassages consécutifs. La dynamique des eaux du fond montre un relargage extrêmement limité, notamment en phosphore.
- Le phosphore dissous est consommé en quasi-totalité dans les couches superficielles jusqu'à 35 m dès le mois de juin. Cet appauvrissement se constate à 50 m mais de manière plus limitée.
- Les faibles concentrations en phosphore dans l'épilimnion limitent durant plus de la moitié de l'année la production primaire.

Pour les stocks :

- Le phosphore diminue de 6 % par rapport à 2005 et présente une concentration moyenne de 27.7 µgP/L en phosphore total, soit un stock de 2'370 tonnes de P.
- Le stock de chlorure continue d'augmenter (+2 %) pour atteindre 8.61 mgCl/L, soit 738'040 tonnes de Cl.
- L'azote total et l'azote nitrique sont relativement constants 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.

DRUART, J.-C. (2007) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2006, 83-92.

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. (2007a) : Météorologie. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2006, 21-32.

QUETIN, P. (2007b) : 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 2006, 137-162.

STRAWCZYNSKI, A. (2007) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2006, 225-233.

TADONLEKE, R. (2007) : Production primaire et biomasse chlorophyllienne dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2006, 93-102.

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	Nmintot 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

* : valeur interpolée

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

* : 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 2006-2010
CAMPAGNE 2006

*Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut.,
Campagne 2006, 2007*

Editeur :

Commission internationale pour la protection
des eaux du Léman contre la pollution

ACW - Changins - Bâtiment DC
50, route de Duillier
Case postale 1080
CH - 1260 NYON 1

Tél. : CH - 022 / 363 46 69
FR - 00 41 22 / 363 46 69

Fax : CH - 022 / 363 46 70
FR - 00 41 22 / 363 46 70

E-mail : cipel@cipel.org

Site web : <http://www.cipel.org>

La reproduction partielle de rapports et d'illustrations publiés dans les
"*Rapports de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution*"
est autorisée à la condition d'en mentionner la source.
La reproduction intégrale de rapports doit faire l'objet d'un accord avec l'éditeur.