

ÉVOLUTION PHYSICO-CHEMIQUE DES EAUX DU LÉMAN

PHYSICAL-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA

Campagne 2008

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'année 2008 peut être considérée comme une année chaude. L'hiver 2007-2008 a été également chaud et le brassage n'a pas dépassé les 100 premiers mètres de la colonne d'eau entre février et mars. Le fond du lac est réoxygéné au maximum le 22 mai avec 5.1 mgO₂/L.

L'activité phytoplanctonique débute dès le mois de mars et consomme le faible stock initial en phosphore.

La période des eaux claires est observée le 13 mai avec une transparence de 15.0 m. Puis, l'activité phytoplanctonique reprend jusqu'au mois de novembre.

La couche appauvrie en phosphore est significativement plus importante que les années précédentes et l'activité phytoplanctonique est limitée.

Malgré le faible brassage, la désoxygénation continue du fond n'entraîne pas de relargage important de phosphore.

Le stock moyen en phosphore augmente légèrement. Cependant, le stock épilimnique remis à disposition lors du brassage est nettement plus faible que les années précédentes et permet de limiter la production phytoplanctonique cette année.

Le stock d'azote total et d'azote nitrique montrent une légère baisse par rapport aux trois années précédentes.

Le stock en chlorure est stable et se rapproche de la concentration moyenne des apports au lac.

ABSTRACT

The year 2008 can be described as having been a warm year. The winter of 2007-2008 was also warm, and churning did not extend beyond the first 100 meters of the water column between February and March. The reoxygenation of the bottom of the lake peaked on 22 May at 5.1 mgO₂/L.

Phytoplanktonic activity began in March, and consumed the low initial reserve of phosphorus.

The clear-water phase was observed on 13 May, with a peak transparency value of 15.0 m. Phytoplanktonic activity then resumed until the month of November.

The phosphorus-depleted layer was significantly higher than in the preceding years, and phytoplanktonic activity was limited.

Despite low churning, the continuous de-oxygenation of the bottom water did not result in any major release of phosphorus.

The mean reserve of phosphorus increased slightly. However, the epilimnic reserve that became available during churning was much lower than in the preceding years, which limited phytoplankton production this year.

The chloride reserve remained stable, and was similar to the mean concentration of the inflows into the lake.

1. MÉTHODES

Les stations de mesure des paramètres physico-chimiques dans les eaux du Léman sont représentées sur la figure 1 :

- SHL2 au centre du Grand Lac entre Evian et Lausanne (coord. CH : 534.700/144.950) qui correspond à la partie la plus profonde du lac (-309.7 m),
- GE3 au centre du Petit Lac dans la fosse de Chevrens entre Coppet et Chevrens (coord. CH : 506.100/128.040) (-71 m).

Ce rapport traitera de l'étude du Grand Lac à la station SHL2. L'étude du Petit Lac à GE3 fait l'objet d'un rapport tous les 5 ans, le prochain est prévu en 2010.

La station SHL2 est admise comme représentative du Grand Lac au point de vue physico-chimique quant à l'évolution à long terme (BLANC *et al.*, 1993). Les stocks et concentrations moyennes pondérées sont calculés à partir des mesures obtenues sur les prélèvements à différentes profondeurs en ce point SHL2 (Annexes 1 et 2).

Profondeurs et fréquence d'échantillonnage - station SHL2 (Grand Lac)

Afin de déterminer l'évolution de la qualité des eaux du Grand Lac, les prélèvements sont effectués à 20 profondeurs au point SHL2 :

0 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 250 ; 275 ; 290 ; 300 ; 305 et 309 m.

La fréquence d'échantillonnage est adaptée au cycle biologique du lac : lorsque l'activité biologique et la composition chimique du lac changent, la fréquence du suivi est plus importante. Elle est prévue : mensuelle de décembre à février, mois pendant lesquels l'activité biologique est réduite ; bimensuelle de mars à novembre, lorsque l'activité est intense et que le lac subit de fortes et rapides fluctuations.

Il y a eu 20 campagnes de prélèvements en 2008, réparties selon les dates indiquées dans le Tableau 1.

Les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'INRA-UMR CARTELE de Thonon-les-Bains (Unité Mixte de Recherche entre l'INRA et l'Université de Savoie ; Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques des Ecosystèmes Limniques), qui procède également à diverses mesures "in situ". Lors de chaque prélèvement, une sonde de pression est couplée à la bouteille de prélèvement afin de déterminer la profondeur réelle de prélèvement. L'étude des relevés de la sonde indique des écarts toujours inférieurs à 2 m par rapport à la profondeur théorique et une variabilité allant de 0 à 3 m. Ces écarts sont considérés comme acceptables pour la présente étude.

Les échantillons sont analysés par le laboratoire de chimie de l'INRA-UMR CARTELE de Thonon-les-Bains. Les méthodes utilisées sont validées bi-annuellement par des analyses inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. En 2008, les résultats des différents laboratoires sont concordants (STRAWCZYNSKI, 2009). Les analyses sont validées par des cartes de contrôle de justesse et de répétabilité. Les incertitudes des méthodes sont indiquées dans l'Annexe 3.

De plus, lors de chaque campagne, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH, turbidité, chlorophylle *a* in vivo et transmission de la lumière sont réalisés à l'aide d'une sonde multiparamètre immergeable (BLANC *et al.*, 1993). La figure 2 représente deux profils de sonde effectués à deux périodes distinctes : le 11 février 2008 lors du brassage et le 2 juin 2008 lors de l'activité phytoplanctonique importante.

Tableau 1 : Dates des campagnes de prélèvement.

Table 1 : Dates of the sampling campaigns.

Campagne n°	Date	Campagne n°	Date
1	8 janvier 2008	11	10 juillet 2008
2	11 février 2008	12	28 juillet 2008
3	3 mars 2008	13	6 août 2008
4	31 mars 2008	14	18 août 2008
5	9 avril 2008	15	9 septembre 2008
6	21 avril 2008	16	29 septembre 2008
7	13 mai 2008	17	15 octobre 2008
8	22 mai 2008	18	27 octobre 2008
9	2 juin 2008	19	4 novembre 2008
10	17 juin 2008	20	15 décembre 2008

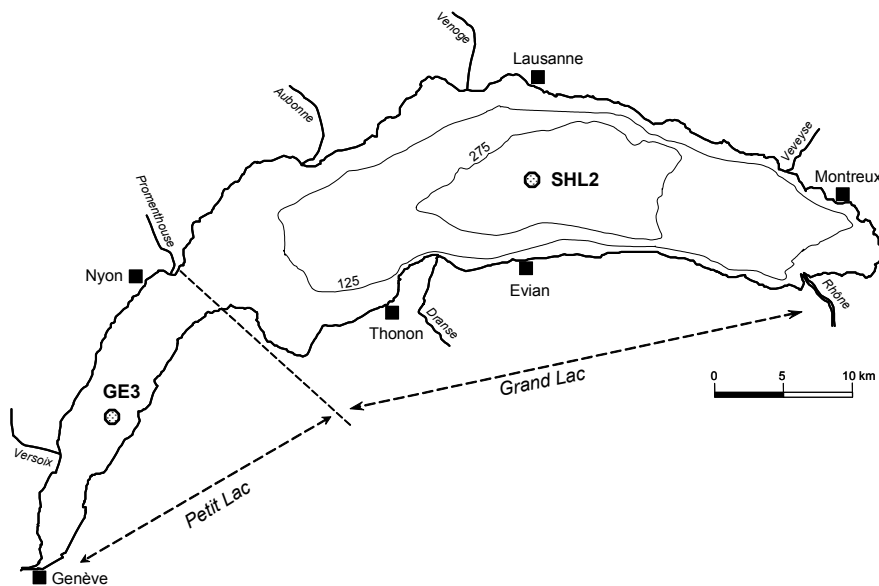


Figure 1 : Situation des points de prélèvement.

Figure 1 : Location of the sampling stations.

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

L'hiver 2007-2008 a été chaud comme l'hiver précédent et plus chaud que la plupart des hivers depuis le début du suivi du lac. La température de l'air, notamment en hiver, a été supérieure à la moyenne 1951-2008 de plus de 2 °C (QUETIN, 2009).

L'hiver n'a donc pas permis l'homogénéisation thermique du lac, mais seulement un refroidissement des eaux superficielles jusqu'à un minimum de 6.4 °C lors de la campagne du 11 février 2008. Cette température minimale hivernale, bien que légèrement inférieure à celle de 2007 (6.9 °C) est relativement élevée par rapport aux années précédentes.

En 2005 et 2006, deux brassages consécutifs ont permis de réoxygéner le fond du lac. En 2007 et en 2008, les brassages des eaux n'ont affecté que les 100 premiers mètres.

Lors de la campagne du 11 février 2008, la colonne d'eau est homogène en température jusqu'à 90 m avec une température de 6.4 °C, puis chute jusqu'à 5.5 °C au fond. La surface de l'eau s'est ensuite réchauffée, mais l'homogénéisation maximale de la colonne d'eau en oxygène dissous est observée lors de la campagne du 31 mars jusqu'à environ 100 m, alors que l'activité biologique avait débuté (TADONLEKE, 2009). La vitesse moyenne du vent au mois de mars a été élevée (QUETIN, 2009), le brassage permis par ces vents forts a entraîné la réoxygénation partielle de la colonne d'eau. La concentration en oxygène dissous au fond du lac est alors de 4.3 mgO₂/L. La réoxygénation du fond se poursuit jusqu'au 22 mai pour atteindre 5.1 mgO₂/L.

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

La figure 4 montre un réchauffement en 2008 jusqu'à 100 m dans la colonne d'eau. En dessous de 100 m, ce réchauffement est très limité.

La figure 6 indique une stabilité thermique moins importante de l'épilimnion durant l'été 2008 par rapport à 2007.

Après l'hiver relativement chaud, l'été présente des températures habituelles avec un maximum de 23.2 °C en surface le 6 août (figure 6).

La figure 7 représente l'évolution de la température depuis 1996 de la colonne d'eau du lac en SHL2.

Les deux brassages complets de 2005 et 2006 ont entraîné le refroidissement des couches profondes. Nous observons le réchauffement progressif de ces couches, notamment du fait des faibles brassages en 2007 et 2008.

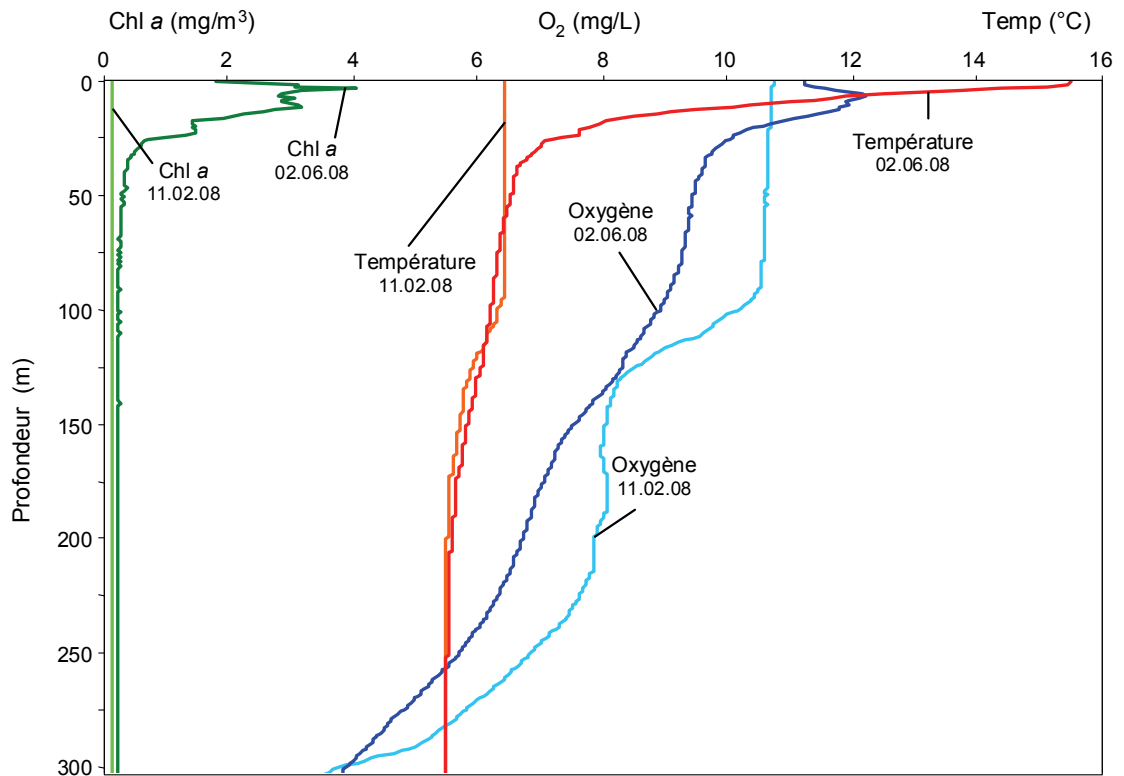


Figure 2 : Profil physico-chimique à SHL2 mesuré avec une sonde multiparamètres lors du brassage partiel (11.02.2008) et lors de la stratification thermique (02.06.2008).

Figure 2 : Multi-parameter Water Quality Logger profile at SHL2 : 12.Feb.08 (during churning) and 02.Jun.08 (during thermal stratification).

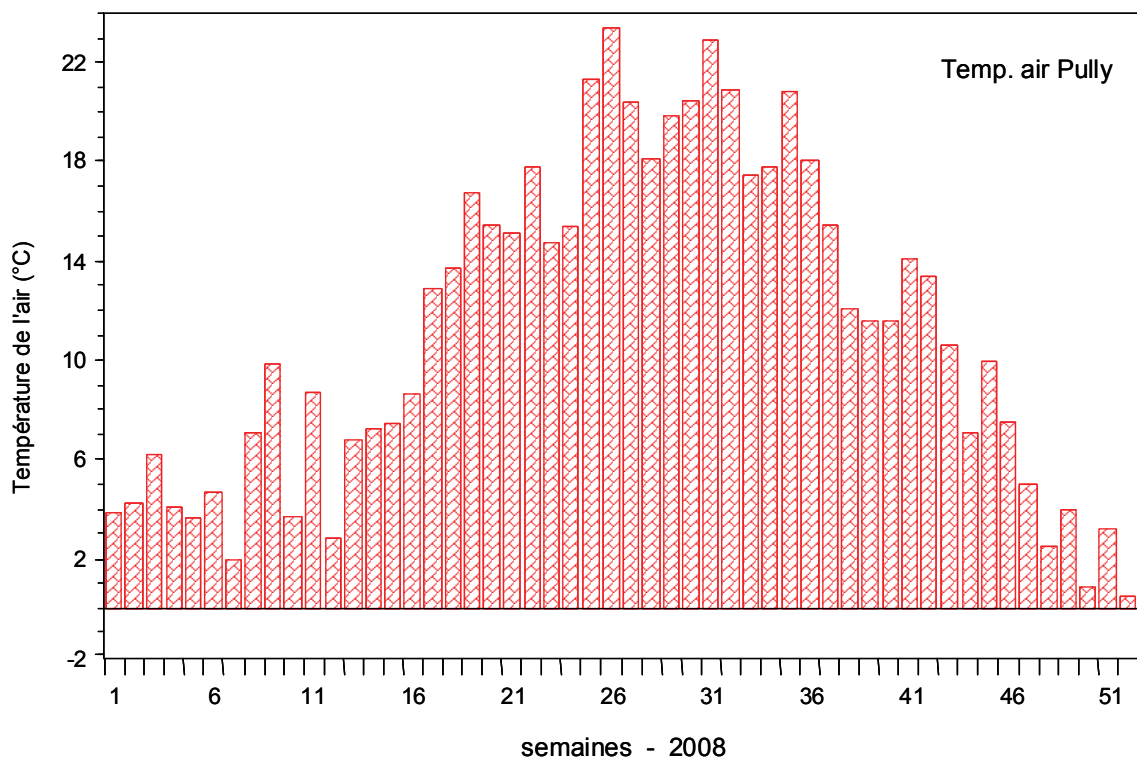


Figure 3 a : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully en 2008.

Figure 3 a : Mean weekly air temperature at the Pully station in 2008.

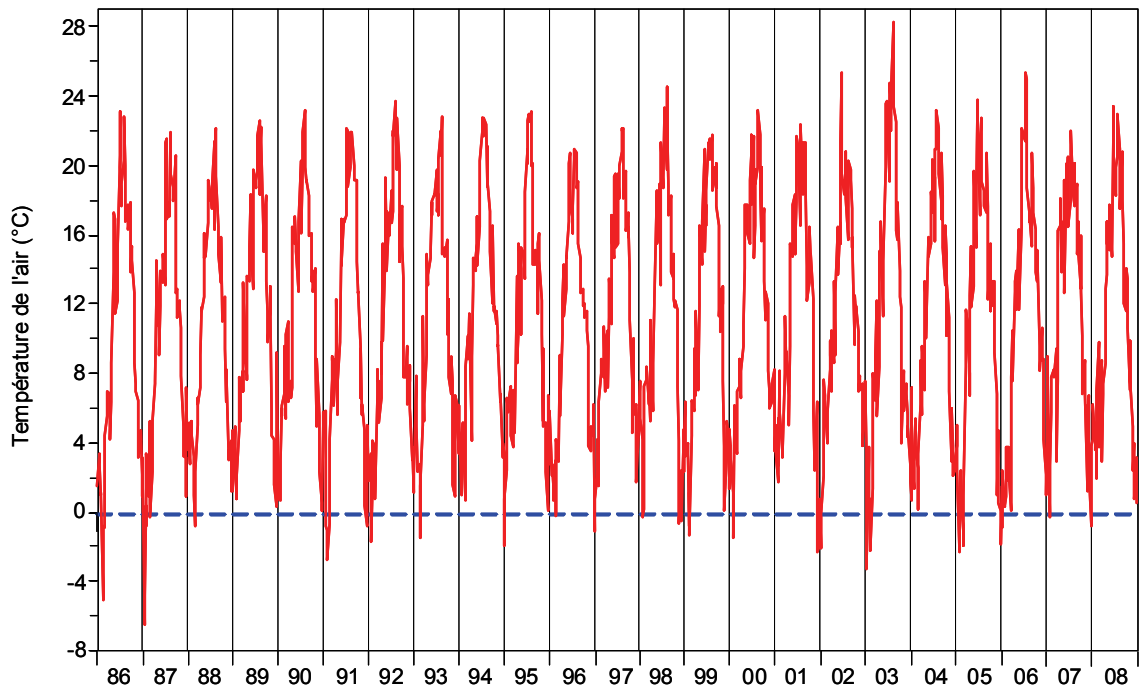


Figure 3 b : Température moyenne hebdomadaire de l'air à la station de Pully de 1986 à 2008.
Figure 3 b : Mean weekly air temperature at the Pully station from 1986 to 2008.

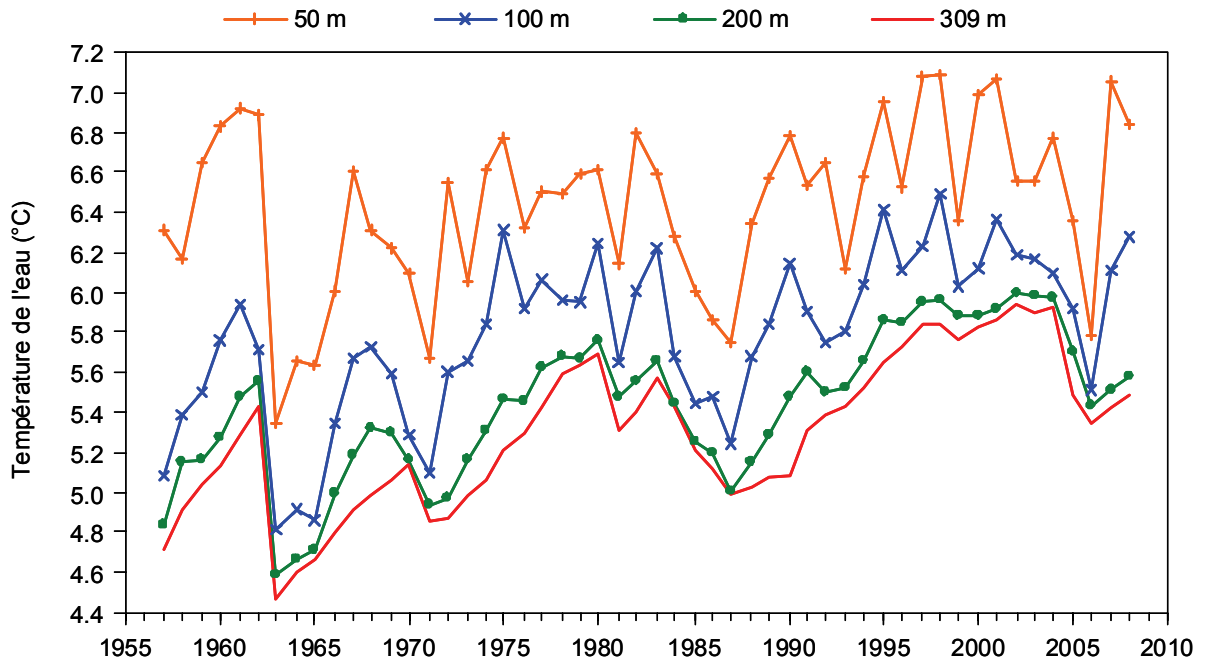


Figure 4 : Evolution de la température moyenne de l'eau à 50, 100, 200 et 309 mètres de profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2).
Figure 4 : Change in the mean annual water temperature at depths of 50, 100, 200 and 309 meters, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

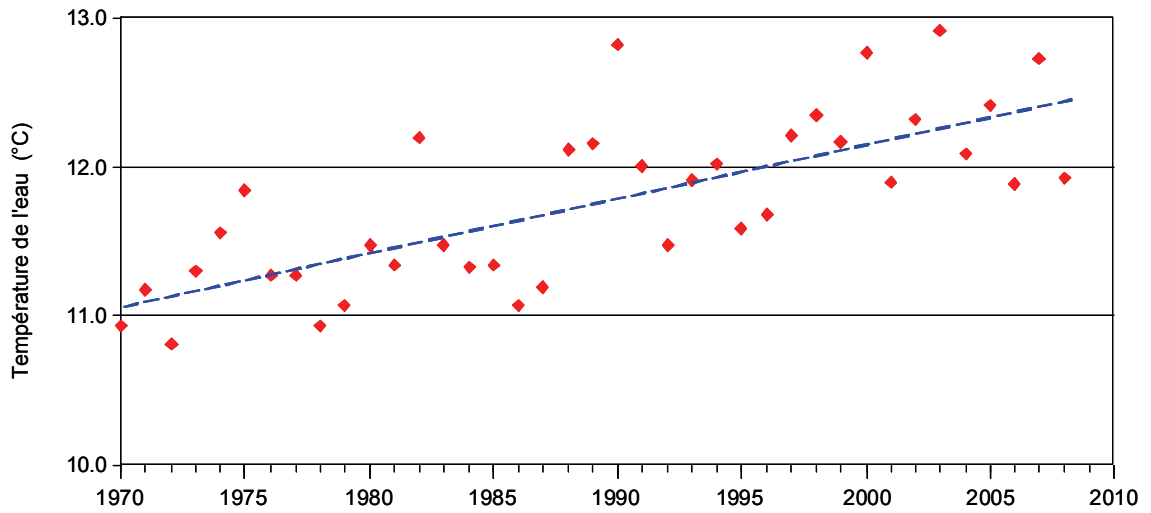


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau du Léman à 5 mètres de profondeur - Grand Lac (SHL2).

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

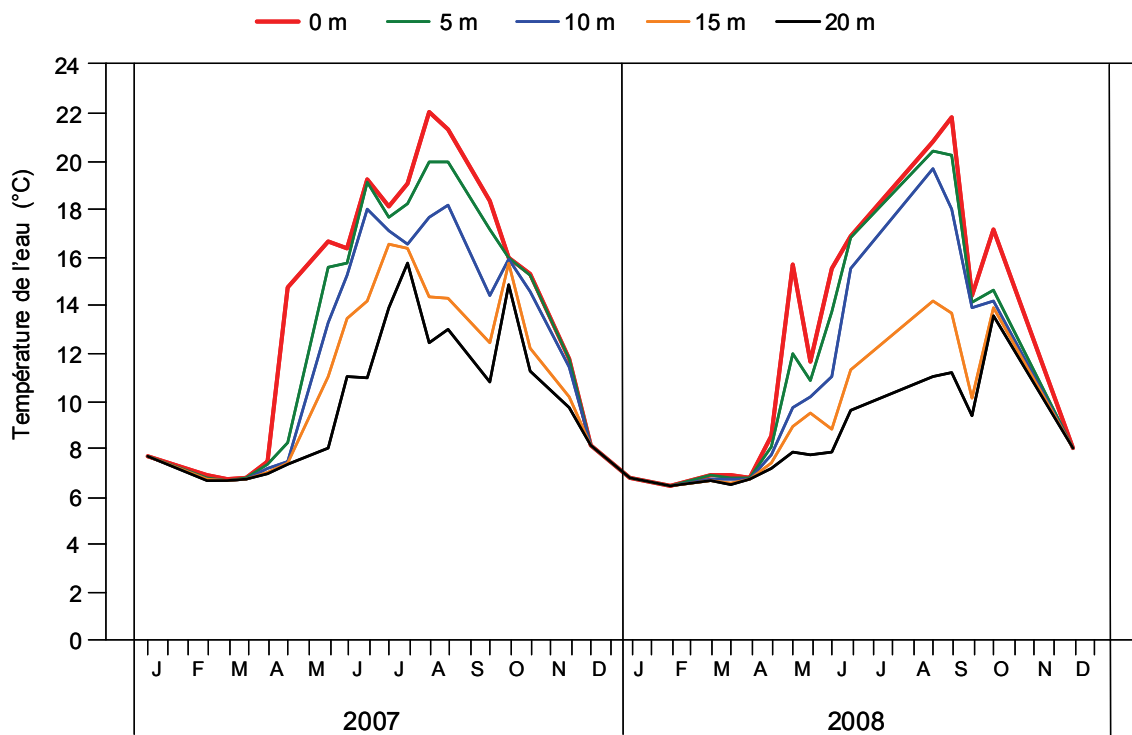


Figure 6 : Température de l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m) Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Température (°C) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2008

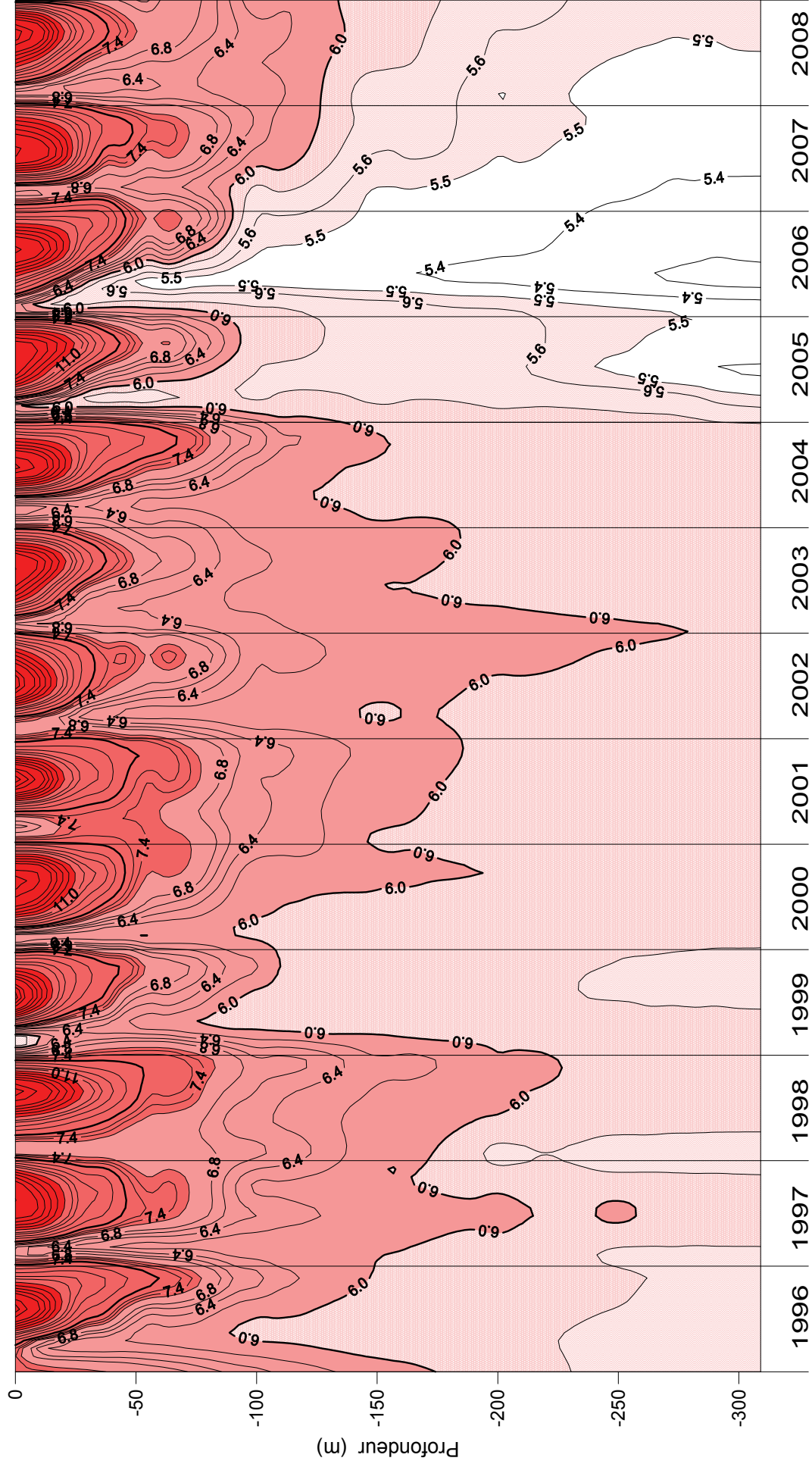


Figure 7 : Température des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de présentation graphique peuvent apparaître (différence de lissage des courbes d'isothermes)).

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)).

3. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES

Le brassage permet de remettre à disposition les nutriments dans la colonne d'eau à partir des couches inférieures. Ce brassage étant faible, la redistribution des nutriments est effectuée sur une plus faible partie de la colonne d'eau que lors des brassages complets, surtout pour le phosphore.

Au moment du brassage partiel des eaux, la concentration en orthophosphate est de l'ordre de 10 à 12 µgP/L jusqu'à 50 m. Cette valeur est la plus élevée sur l'ensemble de l'année. Les valeurs en surface chutent dès la campagne suivante. Sur l'ensemble de l'année après février, les teneurs dans les 15 premiers mètres se maintiennent au-dessous de 10 µgP/L (figures 8 et 9). Ces teneurs sont exceptionnelles par rapport à la chronique. La figure 10 représente l'évolution du stock entre 0 et 50 m lors du brassage depuis 1996 et indique que le stock d'orthophosphate mis à disposition par le brassage pour la production primaire est significativement plus faible en 2008.

Pour l'azote nitrique, le brassage du 11 février remet à disposition 0.51 mgN/L de 0 à 50 m, puis jusqu'à 100 m le 31 mars (figure 11).

La redistribution en silice se marque également lors du brassage du 11 février avec 1.5 mg/L jusqu'à 50 m et augmente jusqu'au fond avec 4.8 mg/L (figure 14). Ces concentrations en surface diminuent dès la campagne suivante (figure 12).

L'activité phytoplanctonique est visible dès la campagne du 3 mars 2008 avec une consommation de l'orthophosphate et de la silice en surface. Cette activité entraîne une augmentation de la concentration en carbone organique total qui passe de 1.09 à 1.22 mgC/L en surface.

Les concentrations en orthophosphate passent de 11 à 7 µgP/L en surface entre le 11 février et le 3 mars, tout comme la silice qui est consommée et diminue de 1.51 à 1.35 mg/L. La production primaire augmente significativement aussi le 3 mars 2008 : de 250 à 760 mgC.m⁻².inc-1 (TADONLEKE, 2009).

La transparence passe de 15 m le 11 février, le maximum de l'année, à 7.7 m le 3 mars, et continue de chuter jusqu'au 21 avril avec 3.8 m, le minimum de transparence (figure 13). Ce minimum de transparence correspond au pic de nanoplancton (RIMET et DRUART, 2009).

La phase des eaux claires est bien marquée avec 10 m de transparence le 13 mai et correspond au pic printanier du mézoplancton crustacé (PERGA et LAINE, 2009). Ce zooplancton consomme fortement les diatomées et autres algues en présence (RIMET et DRUART, 2009).

L'activité zooplanctonique entraîne une augmentation de la concentration en azote ammoniacal (excrétions, ...). Il est ainsi possible d'observer l'évolution de cette activité dans les couches superficielles. Entre le 21 avril et le 13 mai, cette concentration est importante entre 7.5 et 30 m avec un maximum de 33 µgN/L le 13 mai à 15 m. Durant cette période, les cladocères, plus spécifiquement herbivores, sont prépondérants et consomment la biomasse phytoplanctonique (RIMET et DRUART, 2009).

La concentration en orthophosphate est faible à nulle, souvent ne dépassant pas 4 µgP/L, à partir du 9 avril jusqu'au 4 novembre et ceci jusqu'à 20 m. La consommation algale entraîne par diffusion un appauvrissement en orthophosphate dans les couches inférieures à l'activité phytoplanctonique. La couche déphosphatée atteint 50 m avec 4 µgP/L à 50 m le 8 août.

La consommation de l'orthophosphate est exceptionnelle et plus importante encore qu'en 2007 (figure 27). Cette concentration ne dépasse pas 20 µgP/L jusqu'à 100 m, au lieu de 30 µgP/L habituellement. Cet appauvrissement est tel que la croissance algale est limitée cette année avec un maximum relativement faible par rapport à la chronique (TADONLEKE, 2009).

La concentration en silice augmente pendant la phase des eaux claires (figure 12). Cette augmentation est principalement due à la disparition des diatomées, composées de silice. La concentration en silice passe de 0.43 mgSiO₂/L le 13 mai à 1.25 mg/L le 22 mai, puis diminue à nouveau jusqu'à des valeurs faibles et ceci jusqu'en novembre. En novembre, la biomasse chlorophyllienne chute fortement (TADONLEKE, 2009) (figure 15). Le minimum est atteint le 18 août avec 0.02 mg/L en surface.

Le stock initial en nutriments étant faible, les concentrations en surface sont très faibles toute l'année. Cet appauvrissement est maintenu par l'activité phytoplanctonique jusqu'en novembre.

L'azote nitrique est surtout consommé après la phase des eaux claires jusqu'en novembre, avec un minimum de 0.10 mgN/L le 9 septembre de 0 à 7.5 m.

La concentration en azote ammoniacal est à plusieurs reprises élevée en été entre 10 et 15 m, ainsi qu'en automne, ce qui correspond au pic automnal du zooplancton entre le 29 septembre et le 27 octobre (PERGA et LAINE, 2009).

Les concentrations en carbone et azote particuliers sont cohérentes avec l'activité et la biomasse phytoplanctonique observées. La figure 19 indique moins d'azote et de carbone particulier cette année.

Le carbone organique total (COT) suit cette même tendance avec un maximum le 18 août à 2.5 m avec 1.77 mgC/L. Le COT est important de mi-juin à novembre, supérieur à 1.3 mgC/L jusqu'à au moins 10 m, puis rechute en fin d'année le 15 décembre avec 1.0 mgC/L en surface. Il suit ainsi logiquement les biomasses chlorophylliennes observées (TADONLEKE, 2009).

A partir du mois d'août, les faibles concentrations en nutriments entraînent la diminution de la production primaire (TADONLEKE, 2009). Le refroidissement un peu plus tard en septembre influence aussi l'activité phytoplanctonique.

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. Cependant, elle est moins forte que les années précédentes (figures 16 et 22). La concentration en oxygène dissous atteint au maximum 12.2 mgO₂/L durant la période du 2 juin au 17 juin entre 0 et 2,5 m, soit beaucoup moins que les années précédentes (14.9 mgO₂/L le 16 avril 2007 à 2.5 m, et 18.7 mgO₂/L le 24 avril 2006 à 2.5 m).

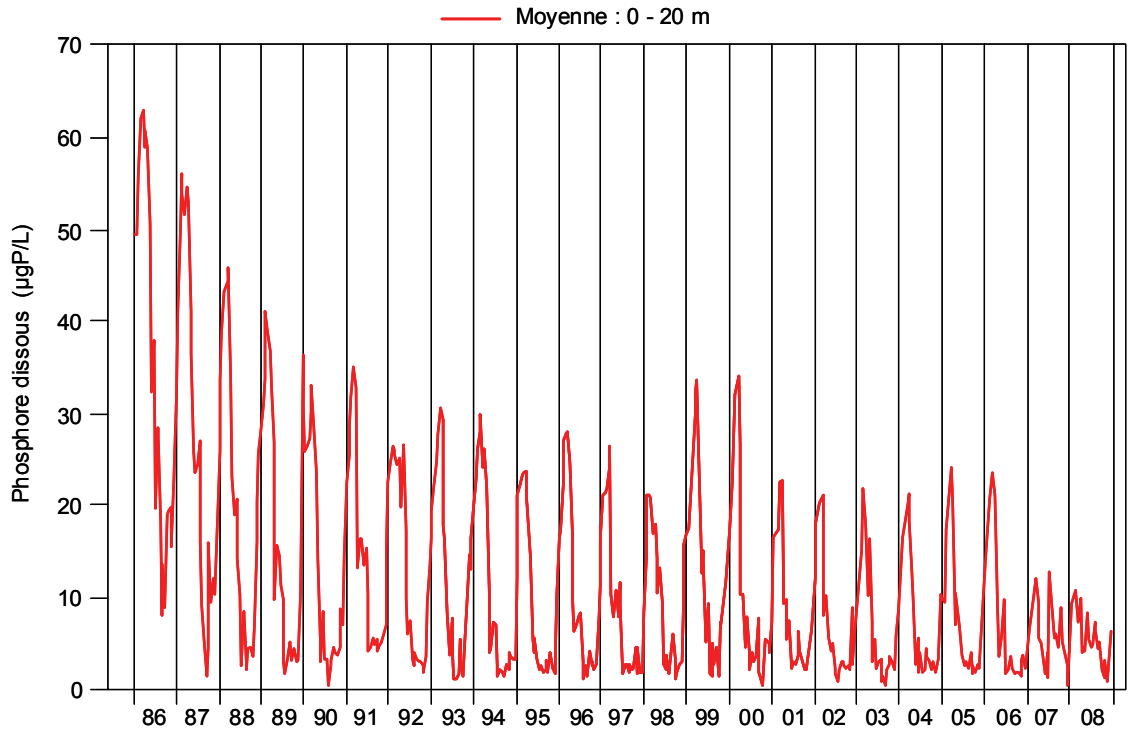


Figure 8 : Concentration en phosphore dissous (P-PO₄³⁻) des eaux de la couche superficielle (moyenne 0-20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

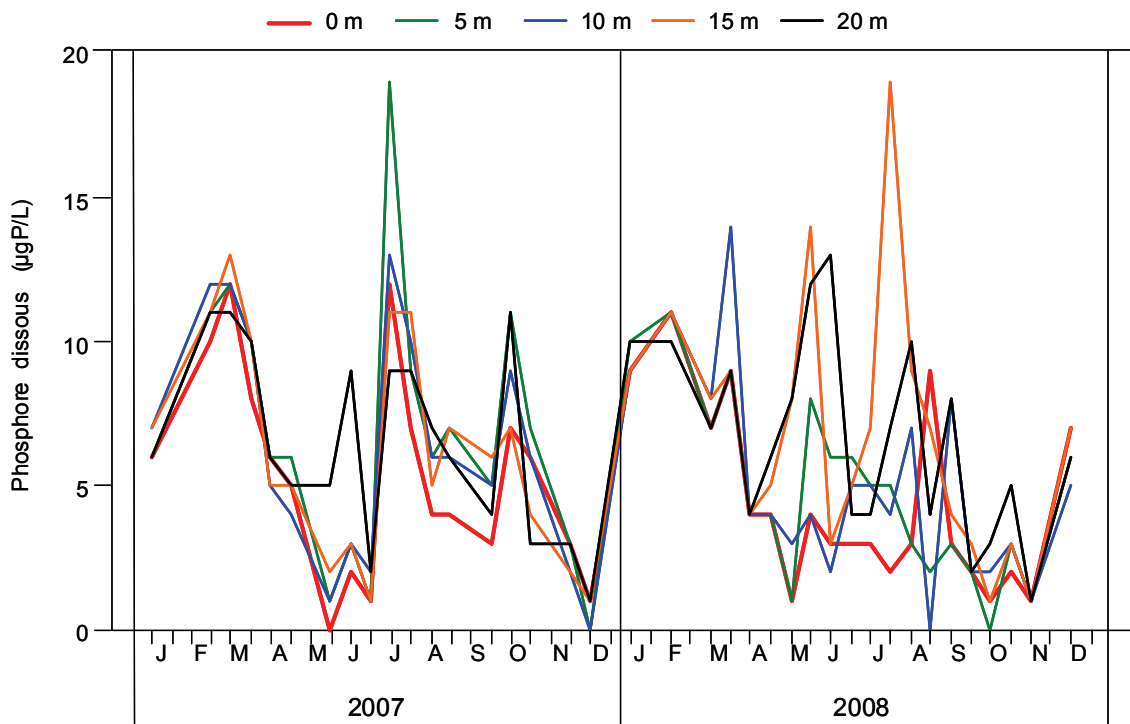


Figure 9 : Concentration en phosphore dissous (P-PO₄³⁻) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 9 : Concentration of dissolved phosphorus (P-PO₄³⁻) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

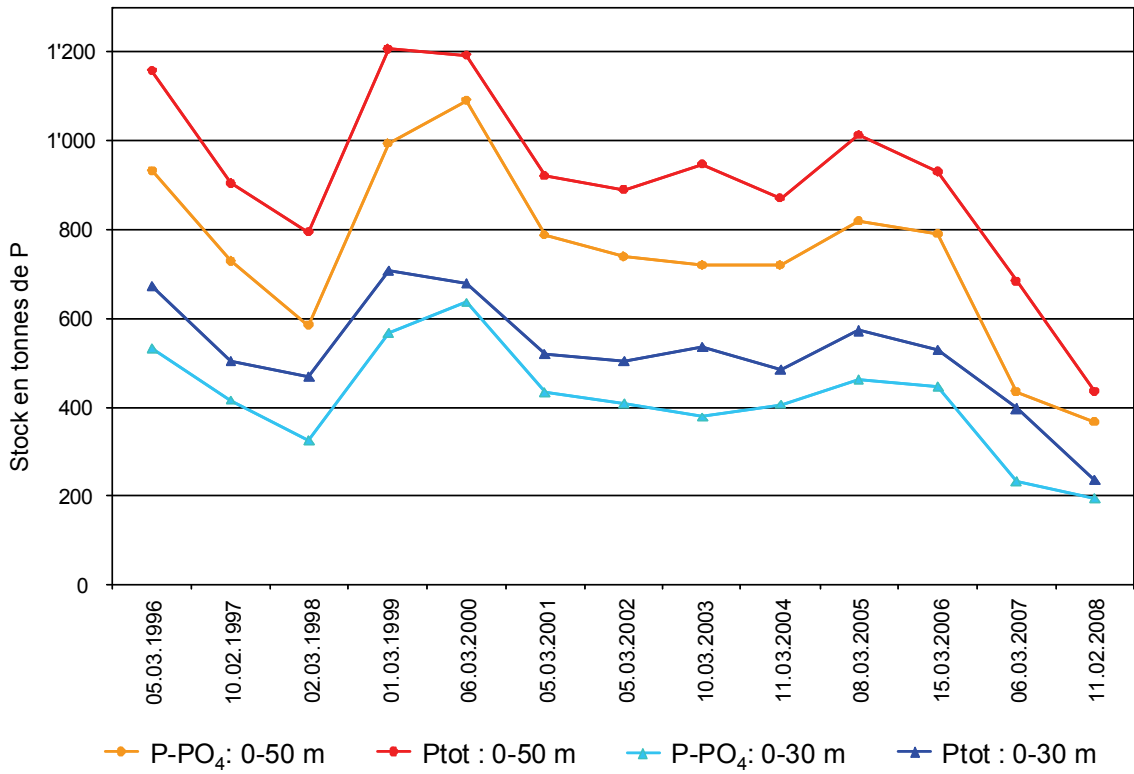


Figure 10 : Concentration en phosphore dissous (P-PO₄³⁻) et phosphore total dans les couches 0-30 m et 0-50 m lors du brassage des eaux de 1996 à 2008 (Grand Lac - SHL2).

Figure 10 : Concentrations of dissolved phosphorus (P-PO₄³⁻) and total phosphorus (Ptot) in the water in the surface layers (0-30 and 0-50 m) during the waters churning from 1996 to 2008, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

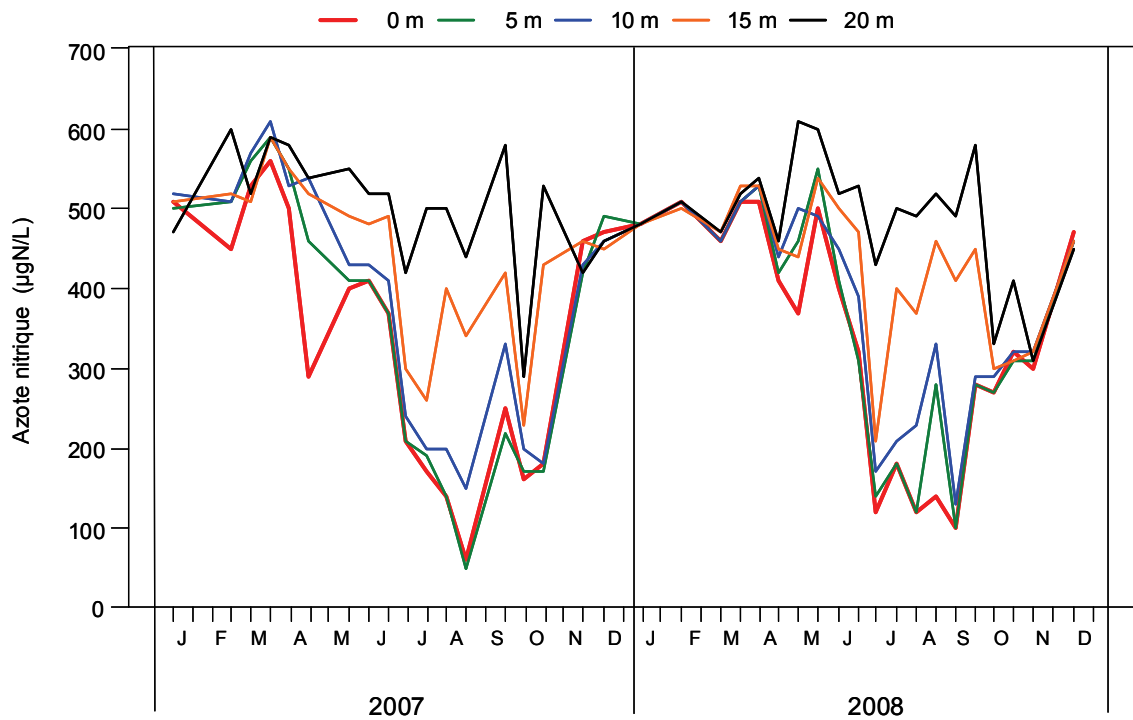


Figure 11 : Concentration en nitrate (N-NO₃⁻) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 11 : Concentrations of nitrate (N-NO₃⁻) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

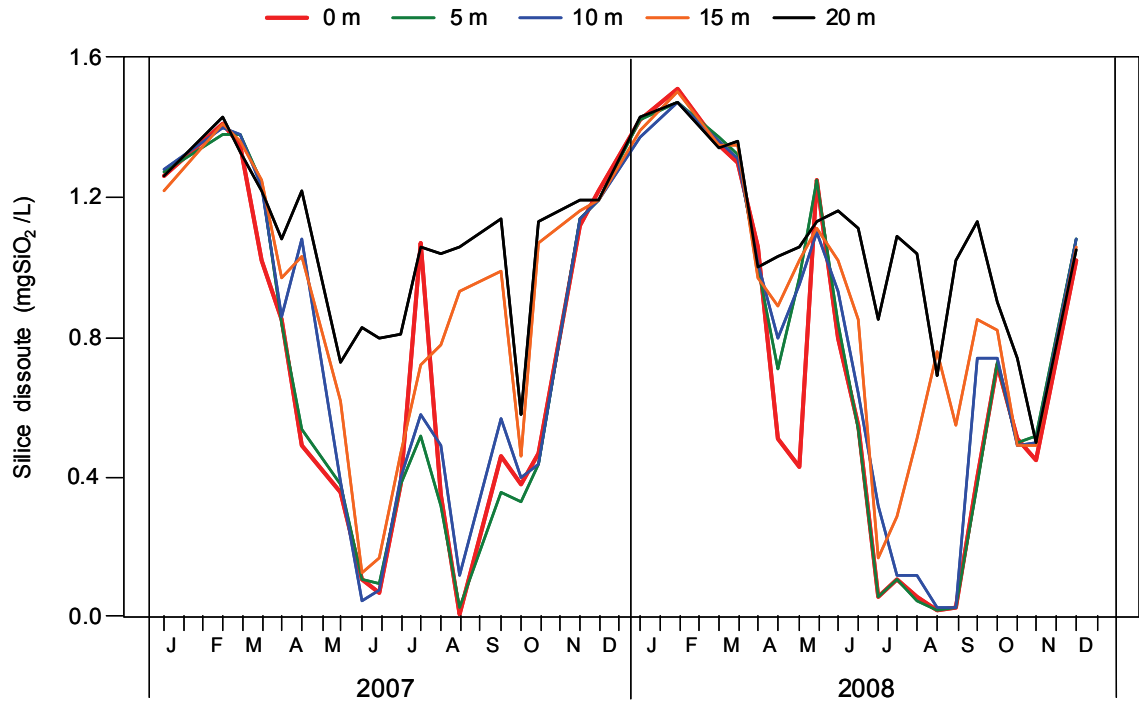


Figure 12 : Concentration en silice (SiO_2) des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 12 : Concentrations of dissolved silica (SiO_2) in the water in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

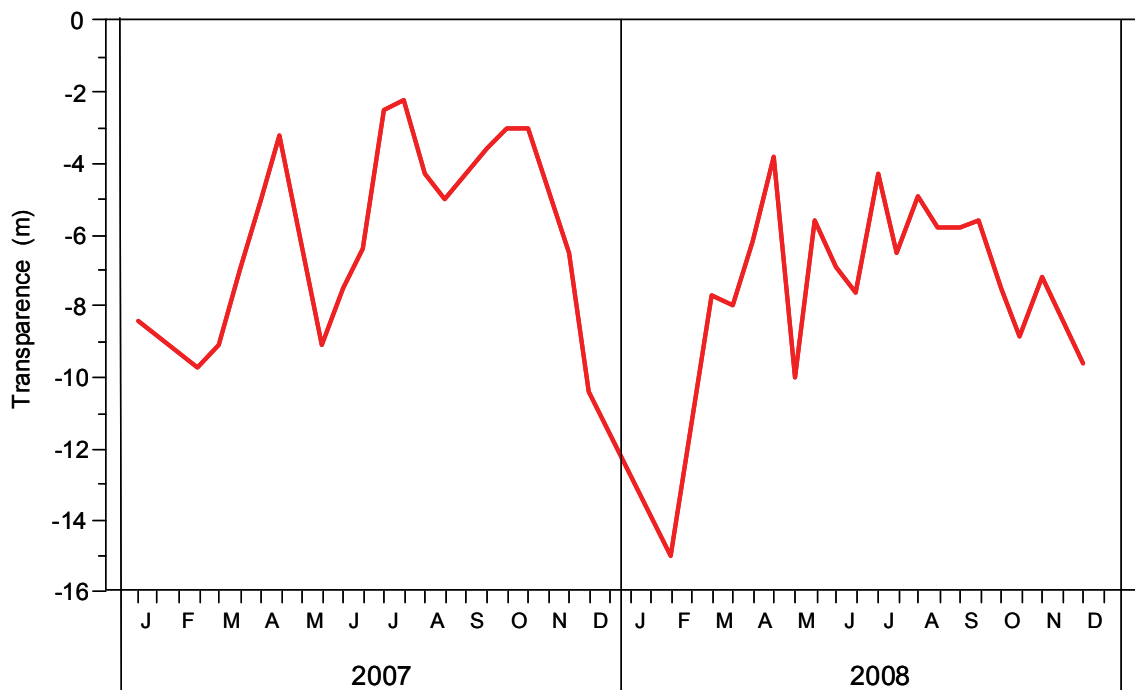


Figure 13 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 13 : Transparency measured using a Secchi disk, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

Silice dissoute / SiO₂ (mgSiO₂/L) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2008

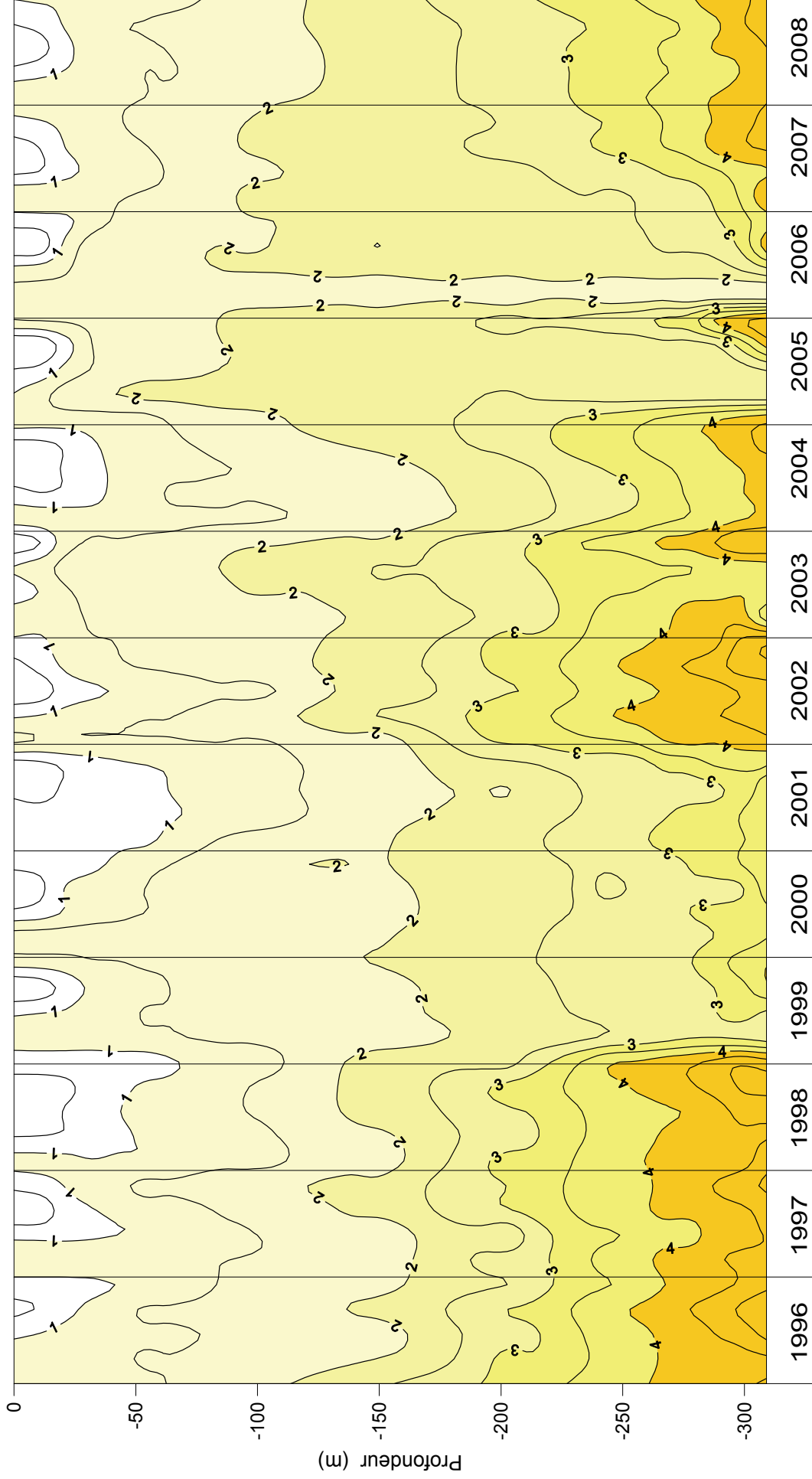


Figure 14 : Concentration en silice dissoute (SiO₂) des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur. (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 14 : Concentration of dissolved silica (SiO₂) 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)).

Chlorophylle a (mgChla / m3) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2008

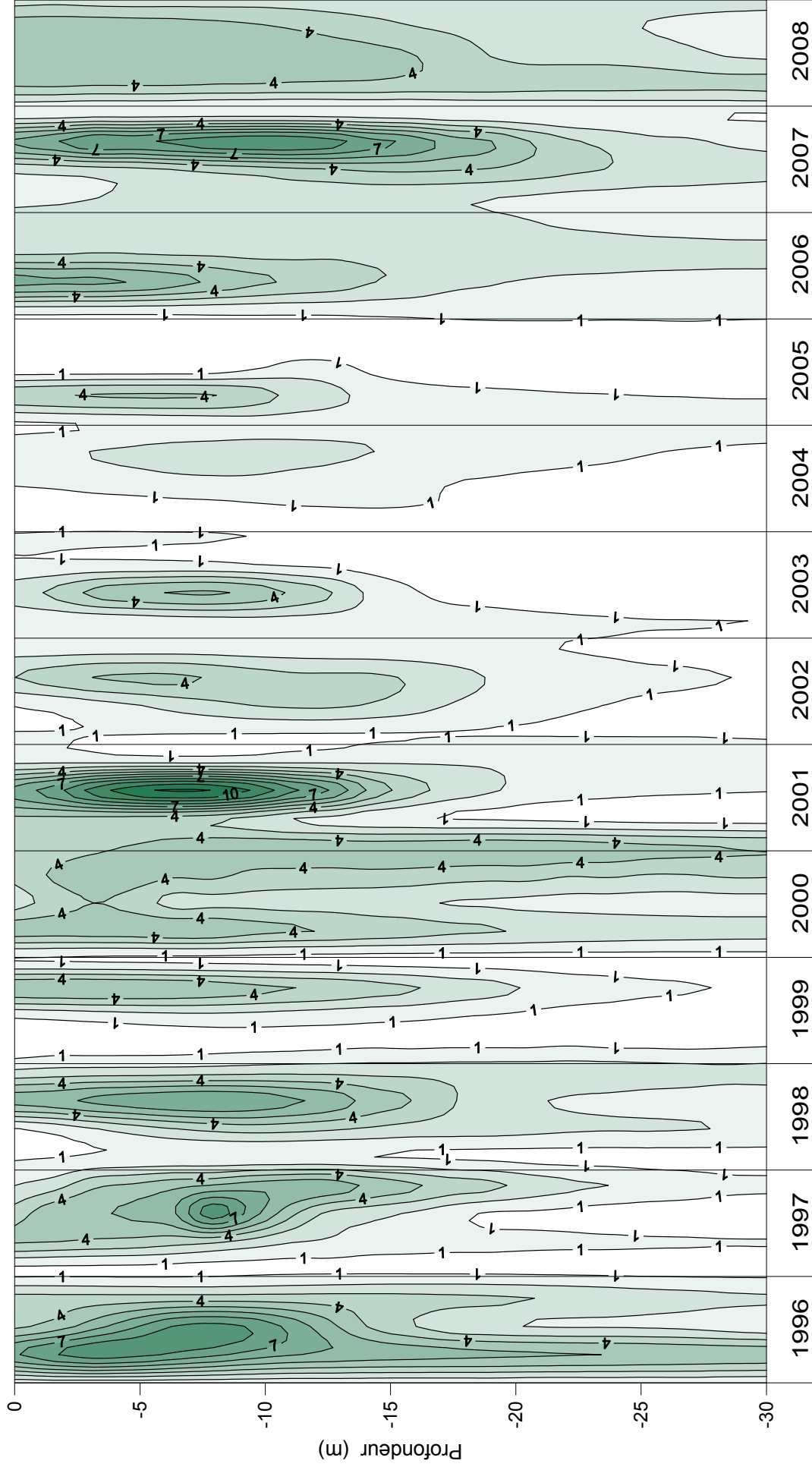


Figure 15 : Concentration en chlorophylle a dans les différentes couches du Léman (Grand Lac - SHL2). (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 15 : 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)).

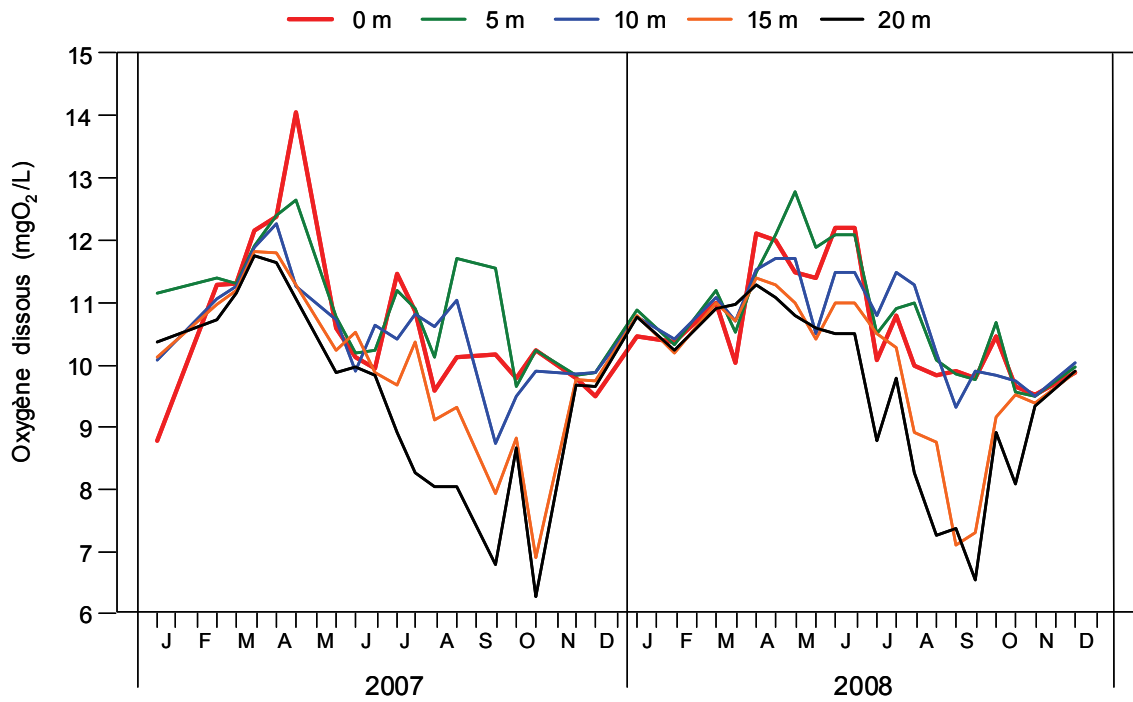


Figure 16 : Concentration en oxygène dissous des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

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

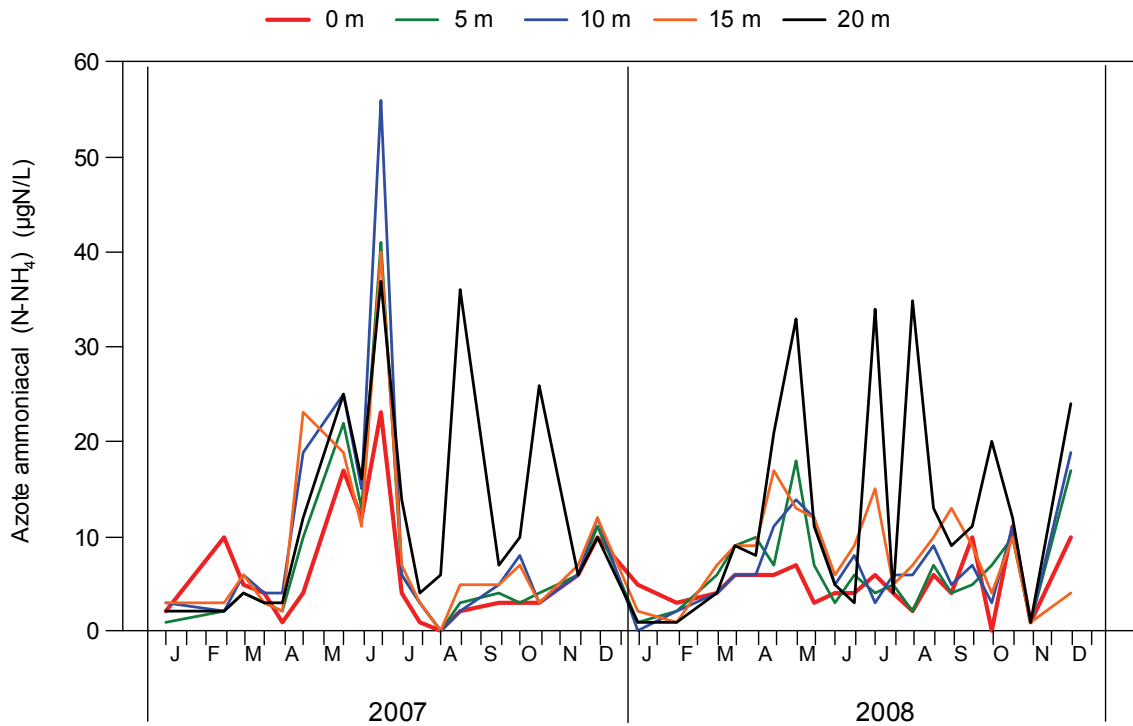


Figure 17 : Concentration en azote ammoniacal des eaux des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 17 : Concentration of ammoniacal nitrogen in the surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

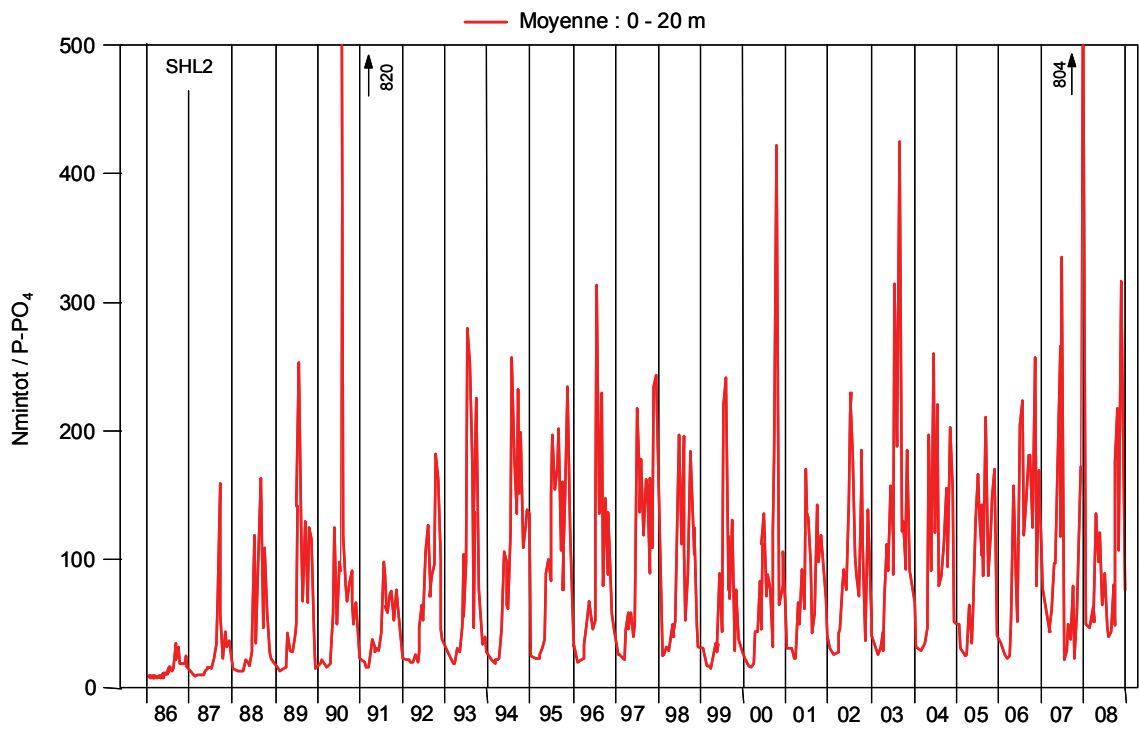


Figure 18 : Rapport Nminéral / P-PO₄, Léman - Grand Lac (SHL2).
Figure 18 : Nminéral / P-PO₄, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

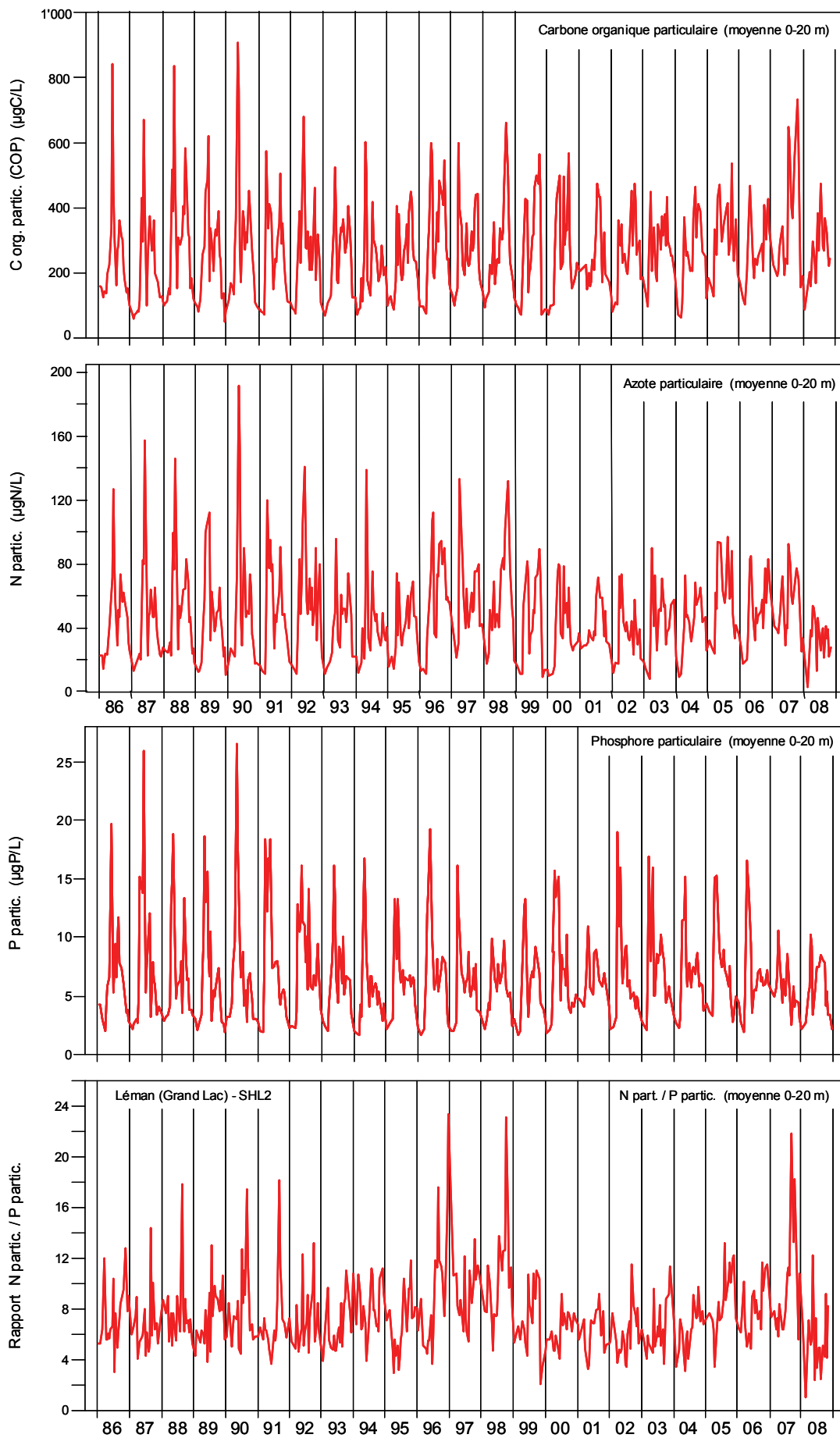


Figure 19 : Concentrations en carbone organique, azote et phosphore particulaires des eaux de la couche superficielle (0-20 m) et rapport Nparticulaire / Pparticulaire, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 19: Concentrations of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus in the water in the surface layer (0-20 m) and the Nparticulaire / Pparticulaire, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

4. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DANS LES COUCHES PROFONDES

Le faible brassage de 2008, comme en 2007, n'a pas permis une réoxygénation complète du fond du lac. La concentration en oxygène dissous au fond atteint au maximum 5.1 mgO₂/L le 22 mai, soit moins que les trois années précédentes (6.1 mgO₂/L le 6 mars 2007). L'activité microbienne dans l'hypolimnion entraîne la consommation de l'oxygène dissous lors de la dégradation de la matière organique. La concentration en oxygène dissous diminue graduellement jusqu'en fin d'année pour atteindre un minimum de 2.3 mgO₂/L le 17 octobre. Ainsi, malgré le faible brassage, la désoxygénation du fond du lac, bien que significative, est moins importante que celles observées dans les années 80-90 (figure 22).

A partir du 27 juillet, la concentration du fond du lac en oxygène dissous est inférieure à 4 mgO₂/L et le reste jusqu'à la fin de l'année (figures 20 et 21). Cette désoxygénation entraîne plusieurs phénomènes propres à ces conditions réductrices : la réduction de certains métaux comme le manganèse et le fer, la formation d'azote ammoniacal, le relargage à partir des sédiments et des eaux interstitielles de phosphore et dans une moindre mesure de silice, ainsi qu'une augmentation de la turbidité du fait de ce relargage et remise en suspension des sédiments et de l'eau interstitielle.

En 2008, nous n'observons pas de période de conditions réductrices importantes entraînant un fort relargage : le maximum de phosphore total au fond est de 74 µgP/L le 15 octobre, soit relativement modéré par rapport aux années précédentes et la silice passe de 4.93 mg/L à 5.40 mg/L à la même période. Le manganèse présente aussi un pic au fond du lac le 15 octobre et rechute dès la campagne suivante. L'azote ammoniacal ne dépasse pas 9 µgN/L.

Comme l'indique la figure 21, le phénomène de relargage est donc très limité et plus faible que l'année précédente (150 µgP/L en phosphore total au maximum le 27 août 2007).

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

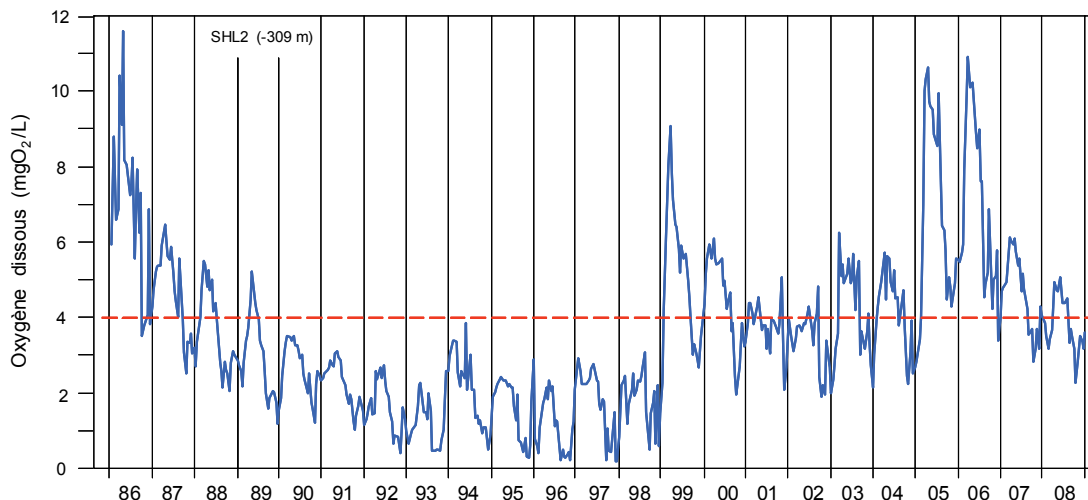


Figure 20 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

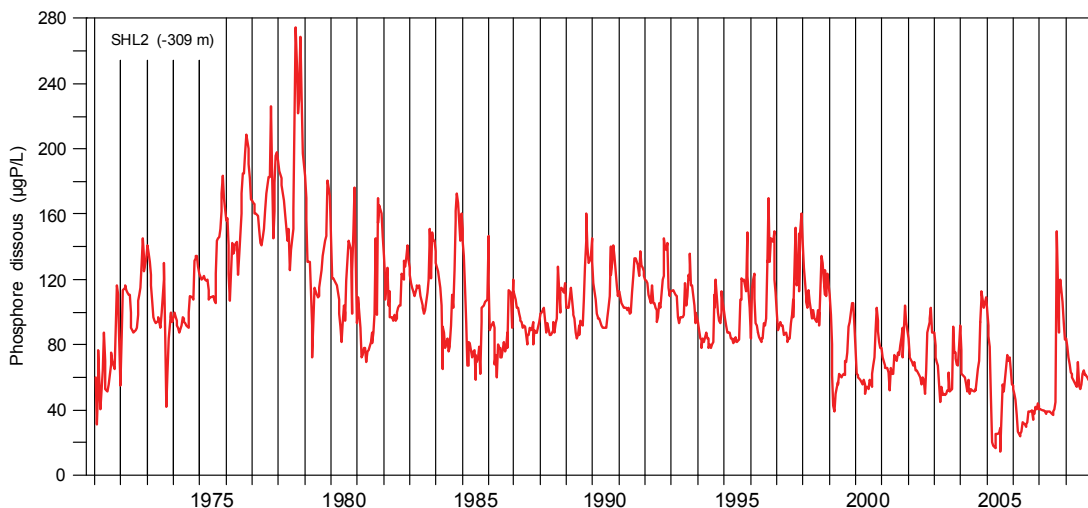


Figure 21 : Concentration en phosphore dissous (P-PO₄³⁻) des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

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

Oxygène (mg/L) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2008

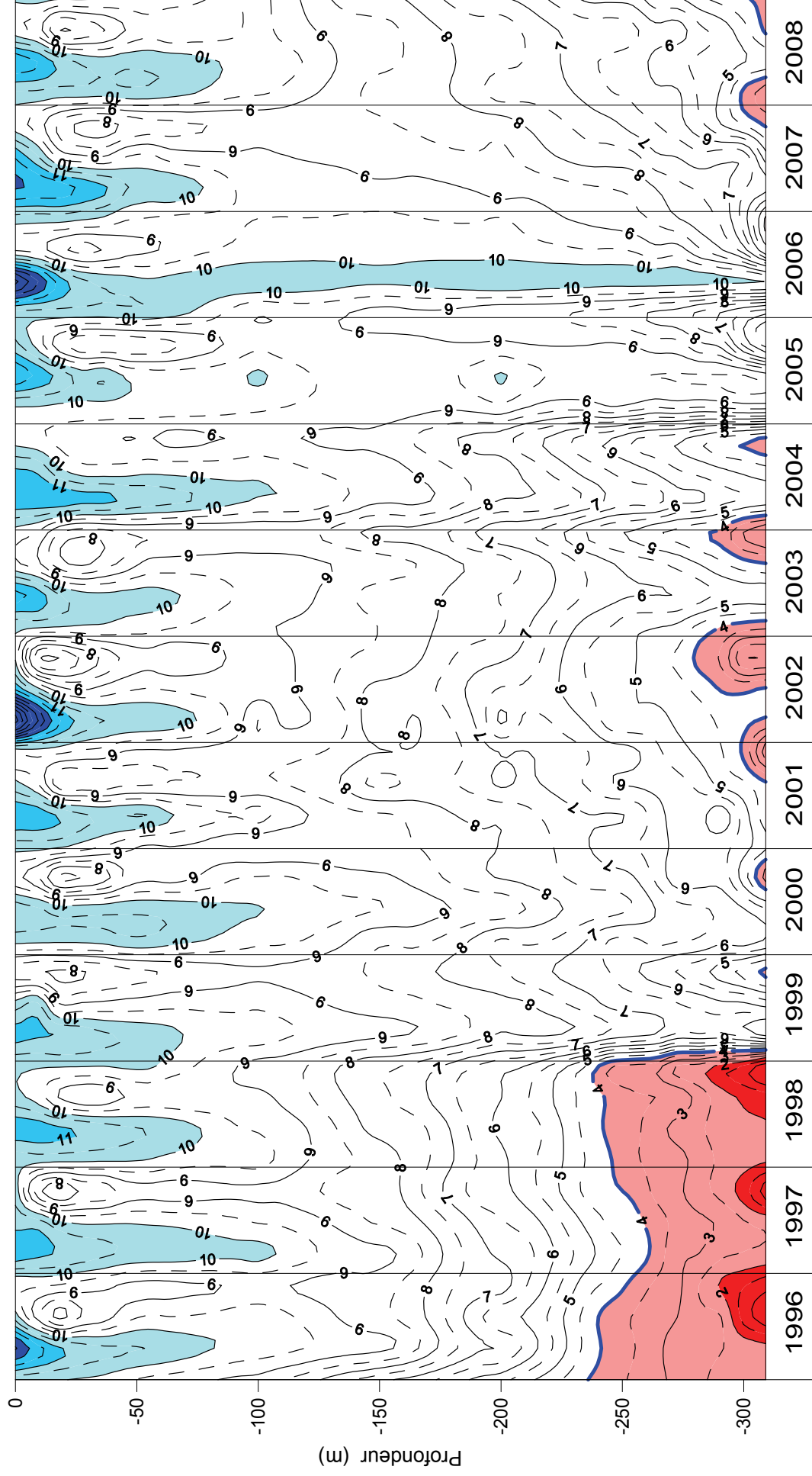


Figure 22 : Concentration en oxygène dissous des eaux du Léman (Grand Lac - SHL2) en fonction de la profondeur. (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître - différence de lissage des courbes d'isovaleurs).

Figure 22 : 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)).

5. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMÈTRES

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

5.1 Oxygène dissous

Les deux brassages complets consécutifs du lac en 2005 et 2006 ont entraîné un forte réoxygénation de la colonne d'eau avec en 2006 la réoxygénation la plus importante de ces 20 dernières années. Les deux brassages suivant ont été très faibles, et la concentration moyenne sur l'année 2008 est de 8.86 mgO₂/L, soit dans la norme des années sans brassage.

Sur les figures 20 et 23, la limite pointillée indique le seuil des 4 mgO₂/L correspondant aux exigences relatives à la qualité des eaux en Suisse. L'annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 stipule :

"Pour les lacs, il faut également que : la teneur en oxygène de l'eau ne soit, à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à 4 mg/L O₂; elle doit en outre suffire pour que les animaux moins sensibles, tels que les vers, puissent peupler le fond du lac durant toute l'année et en nombre aussi proche que possible de la densité naturelle. Les conditions naturelles particulières sont réservées."

La figure 24 indique l'évolution de l'épaisseur de la couche d'eau de concentration inférieure à 4 mgO₂/L depuis 1957. Malgré le faible brassage, la désoxygénation du fond a été limitée.

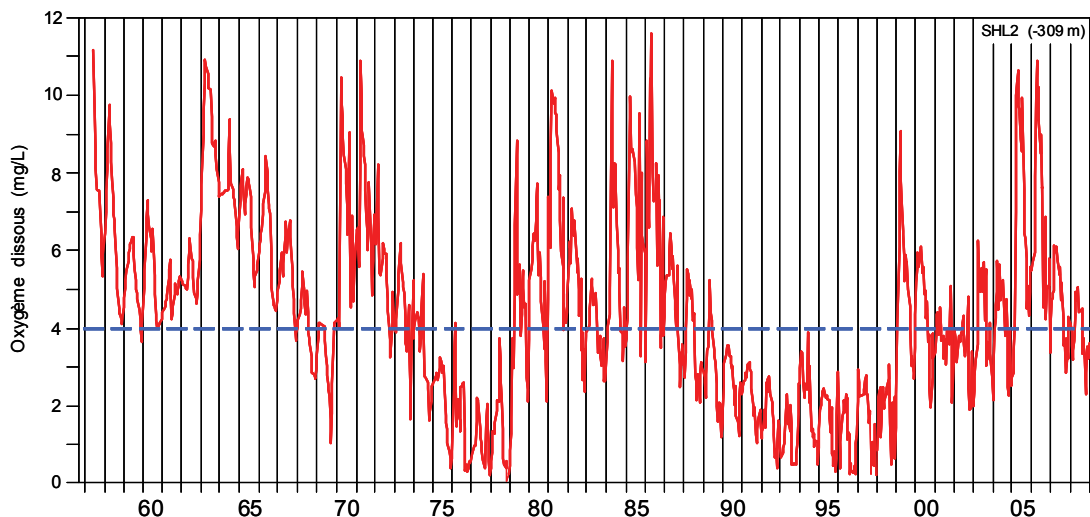


Figure 23 : Concentration en oxygène dissous des eaux du fond, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 23 : Concentration of dissolved oxygen in the water at the bottom of the lake, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

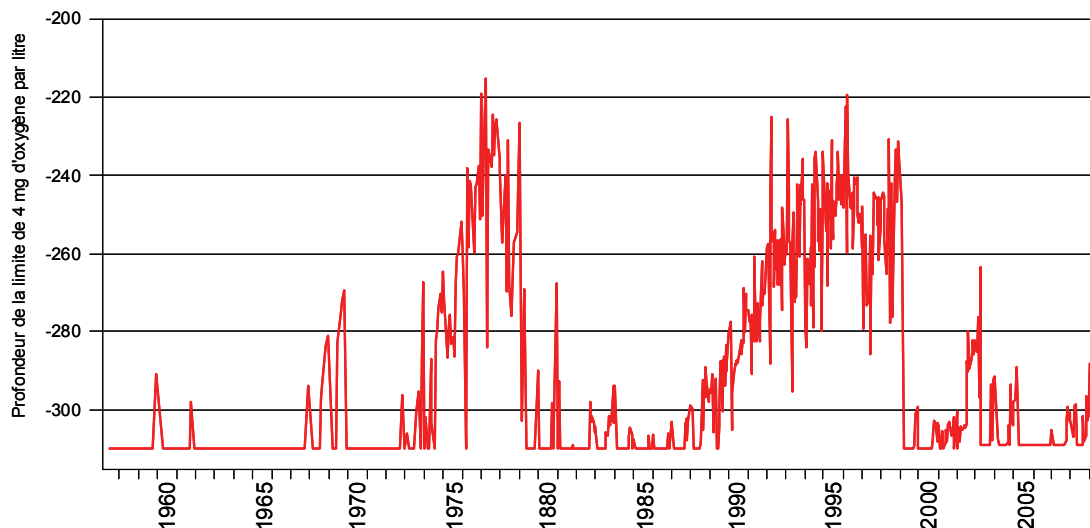


Figure 24 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mgO₂/L dans le Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 24 : Change in the depth of the 4 mgO₂/L threshold in Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

5.2 Phosphore dissous et phosphore total

Malgré la faible diffusion du phosphore à partir des sédiments avant le brassage, le stock moyen en phosphore total a légèrement augmenté par rapport à l'an dernier, soit 2'370 tonnes de P (pour 2'205 tonnes de P en 2007), avec une concentration moyenne de 27.6 µgP/L (figure 25). Il en est de même pour l'orthophosphate : 1'835 tonnes de P, soit 21.4 µgP/L, contre 20.9 µgP/L en 2007. L'objectif est fixé à 20 µgP/L en phosphore total pour limiter raisonnablement la production algale.

La figure 27 indique l'évolution de la concentration en phosphate dans la couche 0-100 m depuis 1996. Cette figure indique un net appauvrissement en phosphore de la zone superficielle.

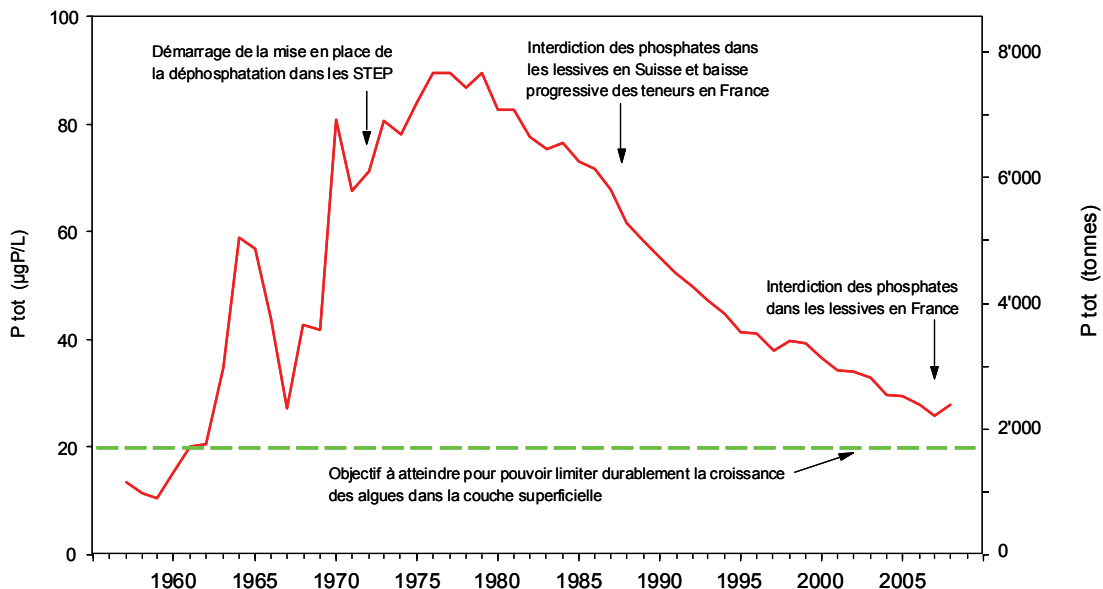


Figure 25 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et du stock de phosphore total contenu dans le Léman de 1957 à 2008 - Grand Lac (SHL2).

Figure 25 : Change in weighted mean annual total phosphorus concentration and total phosphorus content of the Lake Geneva from 1957 to 2008 - Grand Lac (SHL2).

5.3 Transparence

L'évolution de la transparence depuis 1986 est représentée sur la figure 26. L'année 2008 indique une dynamique classique avec une importante transparence hivernale, une période d'eaux claires marquée et une diminution de la transparence liée à l'activité phytoplanctonique.

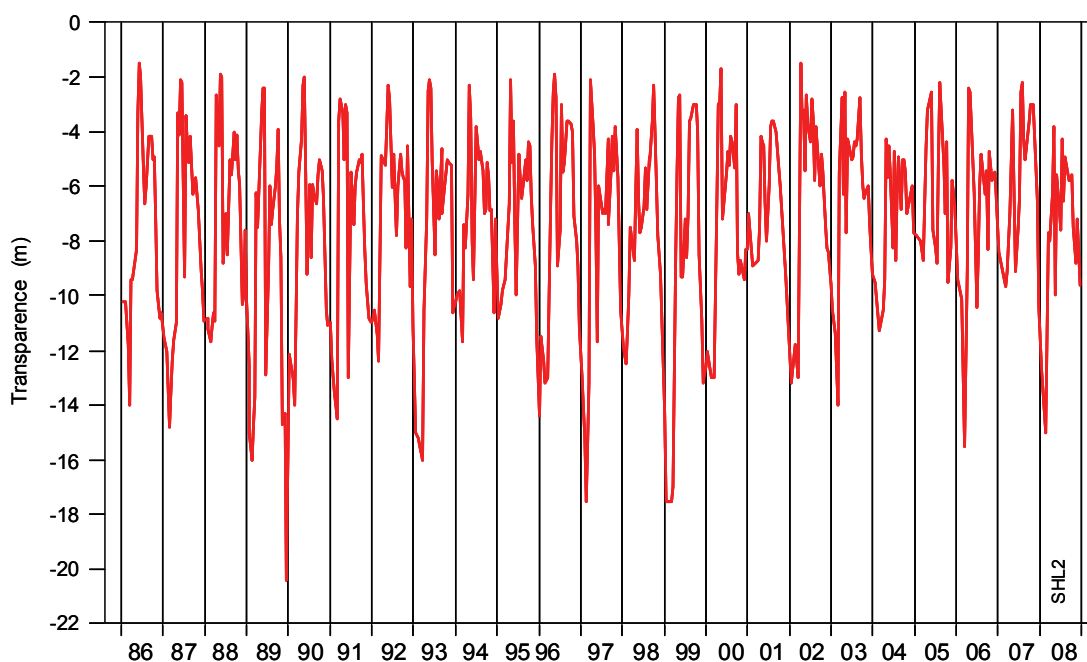


Figure 26 : Evolution de la transparence mesurée avec le disque de Secchi de 1986 à 2008, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 26 : Change in the transparency measured using a Secchi disk from 1986 to 2008, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

Orthophosphate / P-PO4 (µgP/L) - Léman / Grand Lac (SHL 2) - 1996 à 2008

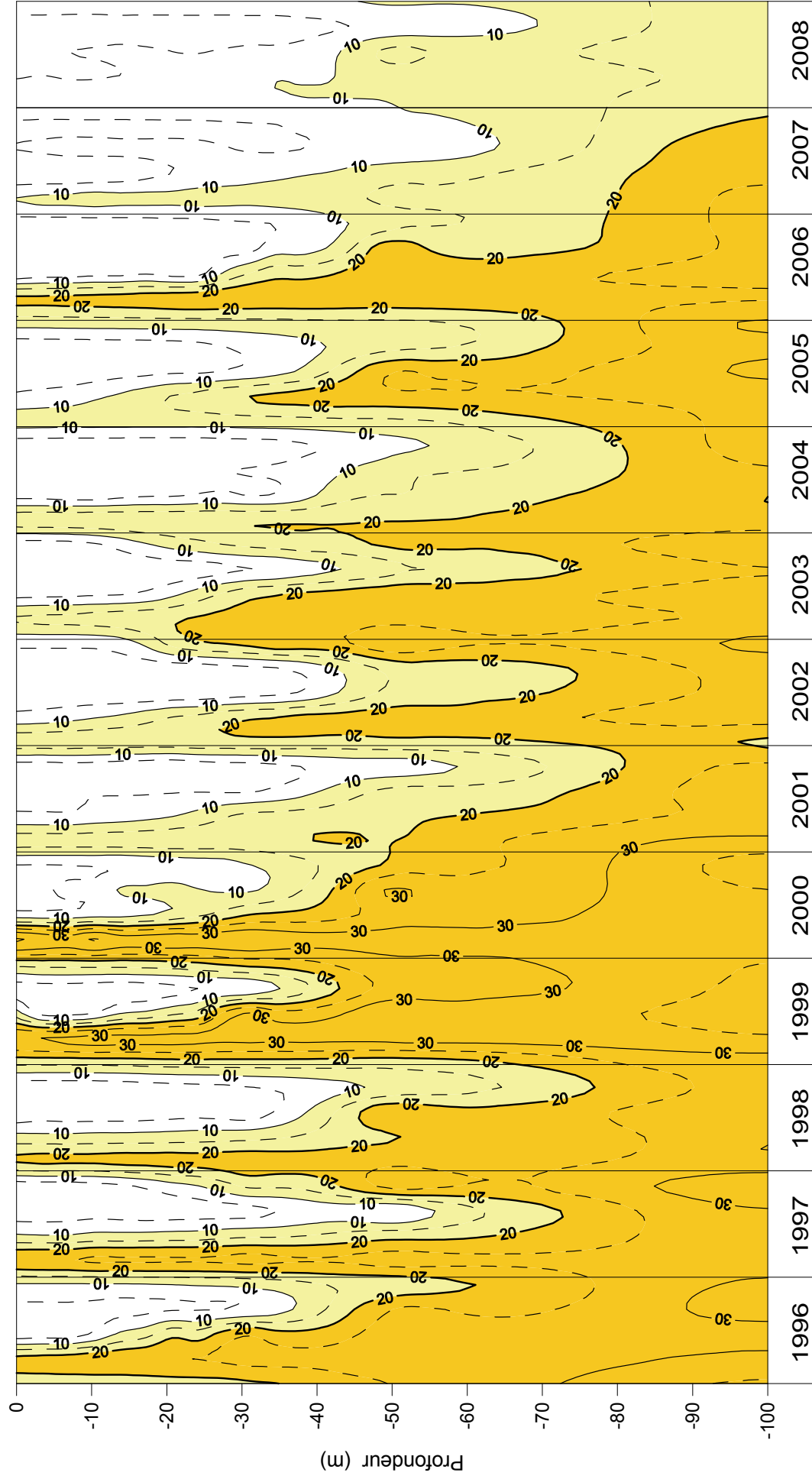


Figure 27 : Concentration en phosphore dissous ($P-PO_4^{3-}$) dans les différentes couches du Léman (SHL2) (zone jaune foncée = concentration supérieure à 20 µgP/L; zone jaune claire = concentration entre 10 et 20 µgP/L) (N.B. : suivant le nombre d'années prises en considération, de très légères modifications de représentation graphique peuvent apparaître (différence de lissage des courbes d'isovaleurs)).

Figure 27 : 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)).

5.4 Azote nitrique et azote total

Les concentrations moyennes en azote total et en azote nitrique sont plus faibles que celles des cinq dernières années, mais restent dans la variabilité observée des concentrations depuis les années 1990 (figure 28). En 2008, la concentration moyenne en azote total est de 0.64 mgN/L, soit un stock de 54'420 tonnes de N. La concentration moyenne en azote nitrique est de 0.53 mgN/L, soit 2.35 mgNO₃/L (la norme d'eau de consommation en Suisse est de 40 mgNO₃/L et en France de 50 mgNO₃/L).

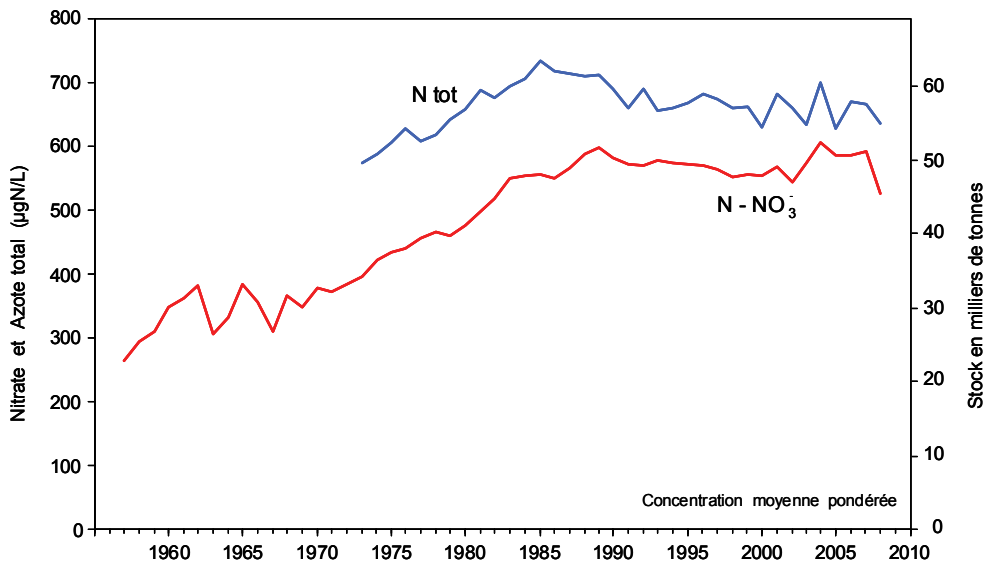


Figure 28 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée et des stocks d'azote total et d'azote nitrique contenus dans le Léman de 1956 à 2008, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 28 : 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 2008, Grand Lac (SHL2).

5.5 Chlorure

Depuis le début des mesures du chlorure dans le Léman en 1971 avec 2.73 mg/L, la teneur du Grand Lac en chlorure est en augmentation quasi linéaire de 2 % par an. Cependant, depuis 2006, le stock est quasi constant, comme indiqué sur la figure 29. En 2008, le stock en chlorure est de 740'861 tonnes soit 8.65 mg/L, contre 8.64 mg/L en 2007. La concentration moyenne dans le lac se rapproche de la concentration moyenne des apports pondérée par les débits (8.7 mg/L en 2007 et 9.6 mg/L en 2008). Si les apports n'évoluent pas de manière importante, la concentration moyenne du lac évoluera moins.

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

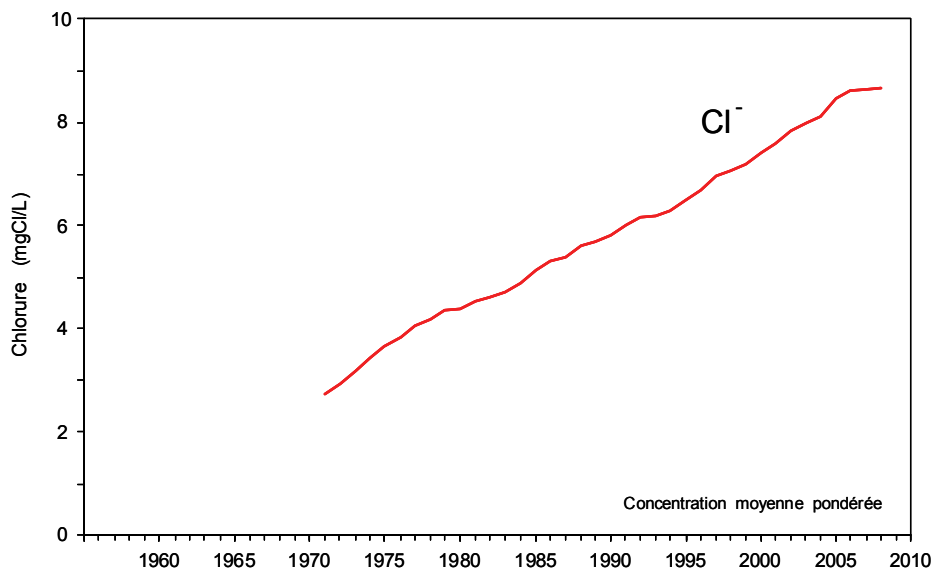


Figure 29 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée en chlorure, pondérée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1971 à 2008, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 29 : Change in the weighted mean annual concentration of chloride in the entire mass of the water of the lake from 1971 to 2008, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

6. CONCLUSIONS

Les principales observations en 2008 sont les suivantes :

- L'hiver 2007-2008 a été chaud, le brassage n'a pas été complet et n'a atteint que les 100 premiers mètres.
- Le fond du lac a été faiblement réoxygéné.
- L'activité phytoplanctonique a redémarré très tôt en mars.
- Le stock de phosphore dans les couches superficielles après le brassage était relativement faible. Il a été consommé rapidement jusqu'à plus de 50 mètres et durant une longue période (jusqu'en novembre), tout comme la silice.
- La période des eaux claires est bien marquée cette année.

Pour les stocks :

- Le stock en phosphore a très légèrement augmenté par rapport à 2007.
- Le stock en chlorure est constant depuis 3 ans.
- Le stock en azote total et en azote nitrique baisse légèrement.

BIBLIOGRAPHIE

- BLANC, P., PELLETIER, J.P. et MOILLE, J.P. (1993) : Variabilité spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques dans l'eau du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1992, 113-162 et 162b-162p.
- GUMY, D. et de ALENCASTRO, L.F. (2001) : Origine de la pollution du Léman par le chlorure. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2000, 261-278.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- PERGA, M.-E. et LAINE, L. (2009) : Evolution du zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 109-116.
- QUÉTIN, P. (2009) : Météorologie. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 21-32.
- RIMET, F. et DRUART, J.-C. (2009) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 91-102.
- STRAWCZYNSKI, A. (2009) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 167-173.
- TADONLEKE, R. (2009) : Production primaire et biomasse chlorophyllienne dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2008, 103-108.

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

ANNEXE 1

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
2007	8.99	25.7	20.9	665	594	2.7	1.0	590	8.63	114.7	17.6	2.3	6.23	5.11
2008	8.86	27.6	21.4	635	531	3.3	1.5	526	8.65	103.4	11.9	2.1	8.13	6.30

* : valeur interpolée

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

ANNEXE 2

Total content in tons.

Année	Oxygène Tonnes	P tot. Tonnes	P-PO ₄ Tonnes	N tot. Tonnes	Nmintot Tonnes	N-NH ₄ Tonnes	N-NO ₂ Tonnes	N-NO ₃ Tonnes	Cl Tonnes	C.O.P. Tonnes	P partic Tonnes	N partic Tonnes
1957	827'900	1'150			22'824	25	109	22'690				
1958	883'900	960			25'370	75	145	25'150				
1959	822'000	890			26'733	30	93	26'610				
1960	819'800	1'320			29'931	105	96	29'730				
1961	802'000	1'720			31'370	290	80	31'000				
1962	885'200	1'750			37'527	770	127	36'630				
1963	883'100	2'970			26'839	510	129	26'200				
1964	874'900	5'050			29'275	750	115	28'410				
1965	878'500	4'870			33'459	375	114	32'970				
1966	894'400	3'760			31'071	415	116	30'540				
1967	823'700	2'320			26'887	180	87	26'620				
1968	808'300	3'640			31'888	465	63	31'360				
1969	772'100	3'580			30'403	360	93	29'950				
1970	830'600	6'920			32'804	245	109	32'450				
1971	830'500	5'790	3'910		32'668	770	138	31'760	237'000			
1972	792'400	6'090	4'830		34'426	1'255	141	33'030	251'000			
1973	801'900	6'900	5'660	49'180	35'306	1'185	201	33'920	271'000			
1974	781'700	6'700	5'420	50'350	37'544	1'180	164	36'200	295'000			
1975	767'500	7'200	5'670	51'970	38'292	905	167	37'220	314'000			
1976	716'800	7'670	6'200	53'820	38'916	1'000	116	37'800	329'000			
1977	712'100	7'660	6'340	52'140	40'115	960	155	39'000	347'000			
1978	732'300	7'440	6'290	52'860	40'558	595	153	39'810	358'000			
1979	765'500	7'670	6'340	54'970	39'929	470	129	39'330	372'000			
1980	776'200	7'070	6'130	56'270	41'574	635	159	40'780	376'000			
1981	798'600	7'080	6'130	58'970	43'490	680	90	42'720	388'000			
1982	791'600	6'640	5'950	57'830	45'274	720	104	44'450	394'000			
1983	787'600	6'460	5'760	59'360	48'000	875	105	47'020	403'000			
1984	810'200	6'550	5'790	60'500	48'488	965	83	47'440	418'000			
1985	817'600	6'260	5'570	62'970	48'855	1'205	50	47'600	439'000			
1986	842'600	6'150	5'300	61'500	47'812	580	72	47'160	454'000	9'138	262	1'630
1987	824'200	5'800	5'000	61'130	49'169	570	69	48'530	462'000	6'247	249	1'203
1988	799'940	5'290	4'665	60'750	50'882	458	74	50'350	480'200	9'882	217	1'472
1989	741'520	4'995	4'430	61'020	51'776	482	74	51'220	486'300	7'993	179	1'220
1990	714'200	4'740	4'145	59'000	50'460	493	77	49'890	496'200	8'715	209	1'400
1991	727'600	4'480	3'880	56'540	49'670	509	81	49'080	514'000	7'840	218	1'292
1992	721'550	4'275	3'495	59'150	49'389	464	105	48'820	528'300	7'811	241	1'515
1993	710'190	4'050	3'460	56'210	49'814	274	80	49'460	529'700	7'548	197	1'142
1994	714'185	3'835	3'380	56'550	49'701	334	92	49'275	538'930	7'166	185	1'203
1995	704'075	3'535	3'170	57'140	49'348	302	101	48'945	554'670	7'722	193	1'123
1996	708'680	3'505	3'085	58'350	49'205	382	93	48'730	572'410	9'205	198	1'913
1997	721'005	3'230	2'885	57'690	48'701	357	94	48'250	596'140	9'207	185	1'981
1998	707'750	3'395	3'020	56'430	47'764	434	80	47'250	604'630	8'596	186	1'897
1999	753'185	3'360	2'990	56'780	48'002	283	64	47'655	615'910	7'905	193	1'134
2000	778'880	3'130	2'725	53'910	47'815	250	115	47'450	635'650	9'413	212	1'263
2001	726'525	2'930	2'465	58'270	48'818	152	66	48'600	651'600	8'065	197	1'105
2002	724'005	2'915	2'530	56'460	46'875	178	67	46'630	672'320	8'322	172	962
2003	737'325	2'805	2'370	54'310	49'550	206	114	49'230	* 684'220	8'034	200	1'205
2004	779'535	2'530	2'235	59'790	52'161	174	107	51'880	696'130	8'108	217	1'280
2005	795'590	2'520	2'065	53'820	50'453	210	133	50'110	722'920	11'840	253	1'888
2006	839'395	2'370	1'940	57'460	50'588	211	98	50'280	738'040	9'210	204	1'594
2007	770'580	2'205	1'795	57'010	50'890	232	88	50'570	739'090	9'826	198	1'506
2008	759'470	2'370	1'835	54'420	45'464	285	129	45'050	740'860	8'864	177	1'018

* : valeur interpolée

Incertitudes élargies * des principales analyses physico-chimiques

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

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