

PRODUCTION PRIMAIRE ET BIOMASSE CHLOROPHYLLIENNE DANS LE LÉMAN

PRIMARY PRODUCTION AND CHLOROPHYLL *a* BIOMASS IN LAKE GENEVA

Campagne 2005

PAR

Rémy D. TADONLEKE

avec la collaboration technique de

Pasca CHIFFLET, Jean-Christophe HUSTACHE et Jean-Paul MOILLE

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

RÉSUMÉ

La biomasse chlorophyllienne et la production primaire ont été mesurées en 2005 lors de 19 campagnes d'échantillonnage à la station SHL2.

*La chlorophylle *a* était, comme en 2004, le facteur prépondérant dans la modification de la transparence de l'eau.*

Les valeurs moyennes de la biomasse chlorophyllienne dans la zone 0-20m (5.6 mg.m⁻³), ainsi que celles de la production annuelle (261 gC.m⁻².an⁻¹), n'ont montré aucune différence significative comparées à celles de 2002, 2003 et 2004. Il en est de même pour les éléments nutritifs dans la zone 0-20 m, à l'exception du phosphore total dont la concentration était plus élevée qu'en 2003.

L'analyse des relations phytoplancton-phosphore indique qu'au cours de ces 4 années, une fraction significative du phosphore était sous forme d'orthophosphates ou séquestré par les hétérotrophes. L'extension, en cours, de cette analyse aux deux dernières décennies pourra aider à comprendre les variations de la biomasse phytoplanctonique en relation avec la baisse des concentrations de phosphore total observée dans le Léman depuis quelques années.

ABSTRACT

The chlorophyll biomass and the primary production were determined in 2005 during 19 sampling surveys at station SHL2.

*As in 2004, chlorophyll *a* was the preponderant factor in the change in the transparency of the water.*

The mean values of the chlorophyll biomass in the 0-20 m zone (5.6 mg.m⁻³), and those of the annual production (261 gC.m⁻².y⁻¹), did not display any significant difference from those of 2002, 2003 or 2004. The same was true of the nutrient elements in the 0-20 m zone, with the exception of the total phosphorus, the concentration of which was higher than in 2003.

Examination of the phytoplankton-phosphorus relationship shows that over these 4 years, a significant fraction of the phosphorus was in the form of orthophosphates or sequestered by heterotrophs. This analysis is currently being extended to the two previous decades in order to help us to understand the changes in the phytoplankton biomass linked to the fall in the concentration of total phosphorus that has been observed in Lake Geneva for some years.

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les données de production primaire et de biomasse phytoplanctonique (estimée par la chlorophylle *a*) dans le lac Léman au cours de l'année 2005. Les relations entre ces variables et les éléments nutritifs sont évaluées pour cette année et pour les trois précédentes (2002, 2003 et 2004).

2. MÉTHODES

L'échantillonnage a été réalisé au cours de cette année 2005 entre le 10 janvier et le 19 décembre aux profondeurs habituelles (0, 1, 2, 3.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 m). Les méthodes d'analyse mises en oeuvre sont les mêmes que celles utilisées depuis plus de 15 ans. Les détails sont présentés dans le rapport CIPEL 2004 (TADONLEKE, 2005). Brièvement, la transparence de l'eau a été estimée à l'aide d'un disque de Secchi. La température dans la colonne d'eau a été mesurée à l'aide d'une sonde multiparamètres.

La production primaire (PP) a été mesurée par l'incorporation du ^{14}C par le phytoplancton, selon la méthode de STEEMAN-NIELSEN (1952). La production journalière du phytoplancton est estimée en multipliant la quantité de carbone incorporée pendant l'incubation par 2.22, coefficient moyen déterminé expérimentalement pour le Léman (PELLETIER, 1983). La chlorophylle *a* (Chl*a*), utilisée ici comme estimateur de la biomasse phytoplanctonique, a été analysée au spectrophotomètre après extraction dans un mélange acétone/eau (90/10, v/v) (STRICKLAND et PARSONS, 1968). La détermination des valeurs de la Chl*a* par unité de surface dans la colonne d'eau a été faite cette année dans la zone 0-20 m. Les analyses chimiques ont été réalisées comme cela est indiqué dans LAZZAROTTO et al. (2005).

Les comparaisons interannuelles des valeurs des variables mesurées ont été faites à l'aide du test de Kruskal-Wallis (K-W), suivi d'un test de comparaison multiple lorsque le K-W était significatif. Les relations statistiques entre ces variables ont été examinées à l'aide de régressions.

3. RÉSULTATS

3.1 Répartition verticale

La répartition verticale de la biomasse et de la production phytoplanctoniques dans la zone 0 - 30 m au cours des 19 campagnes est illustrée sur la figure 1. Les variables phytoplanctoniques calculées à partir de ces données sont récapitulées dans le tableau 1.

Alors que les valeurs de Chl *a* sont totalement homogènes dans la zone échantillonnée lors des trois premières campagnes (janvier à mi-mars), celles de la production primaire sont nettement plus élevées dans la zone 3.5-7.5 m. Toutefois, ces valeurs restent relativement faibles (3-7 mg Chl*a*.m⁻³ et < 23 µgC.L⁻¹.inc⁻¹), même si elles sont supérieures à celles observées à la même période au cours de l'année 2004 (< 2 mg Chl*a*.m⁻³ et < 10 µgC.L⁻¹.inc⁻¹). A partir de la 4^e campagne (21 mars), bien que la stratification thermique soit très peu marquée (données non présentées), la biomasse et la production augmentent considérablement et les tendances dans les profils verticaux de ces deux variables deviennent semblables. Les plus fortes valeurs sont généralement mesurées entre 2 et 10 m. Les valeurs de Chl*a* commencent à redevenir homogènes dans la colonne d'eau dès le 22 août, alors que celles de la production primaire restent stratifiées jusqu'à la dernière campagne (19 décembre).

Tableau 1 : Principaux paramètres de la production primaire. $\sum A$: production primaire totale lors de l'incubation; PPj : production primaire journalière calculée; Amax : production maximale lors de l'incubation correspondant à la biomasse Chl Amax; Tds : profondeur de disparition du disque de Secchi.

Table 1 : Main primary production parameters. $\sum A$ Total primary production during the incubation period; PPj : calculated daily primary production; Amax : maximal production during the incubation period, corresponding to Chl Amax biomass; Tds, Secchi depth.

DATE	$\sum A$ (mgC.m ⁻² .inc ⁻¹)	PPj (mgC.m ⁻² .j ⁻¹)	Amax (mgC.m ⁻³ .inc ⁻¹)	Chl Amax (mgC.m ⁻³)	Chl 0-20 (mgC.m ⁻²)	Chl 0-30 (mgC.m ⁻²)	Tds (m)
10.01.2005	260	578	22.2	7.4	143	216	7.8
07.02.2005	288	639	20.9	5.2	105	154	8.0
07.03.2005	228	507	14.6	3.1	62.5	94.8	8.6
21.03.2005	909	2'018	93.9	8.1	155	205	4.6
04.04.2005	700	1'555	88.4	10.2	166	195	3.2
26.04.2005	1'102	2'447	275	45.5	239	282	3.0
17.05.2005	1'053	2'337	174	13.2	130	139	2.5
06.06.2005	774	1'718	92.3	8.6	89.7	98.5	7.6
20.06.2005	750	1'665	59.8	1.0	33.1	37.5	8.2
04.07.2005	389	863	38.8	1.4	130	193	8.8
18.07.2005	696	1'545	77.3	7.2	128	149	5.2
09.08.2005	766	1'700	139	10.9	180	193	2.2
22.08.2005	152	338	39.1	3.5	59.2	71.4	5.2
05.09.2005	836	1'856	121	8.5	92.1	98.2	7.0
27.09.2005	493	1'094	85.9	4.4	106	115	4.4
10.10.2005	325	782	25.4	2.2	50.3	92.4	9.5
24.10.2005	487	1'081	44.0	2.9	56.8	85.6	8.2
08.11.2005	314	696	52.7	8.7	123	136	5.8
19.12.2005	228	507	24.7	5.4	76.4	112	7.6

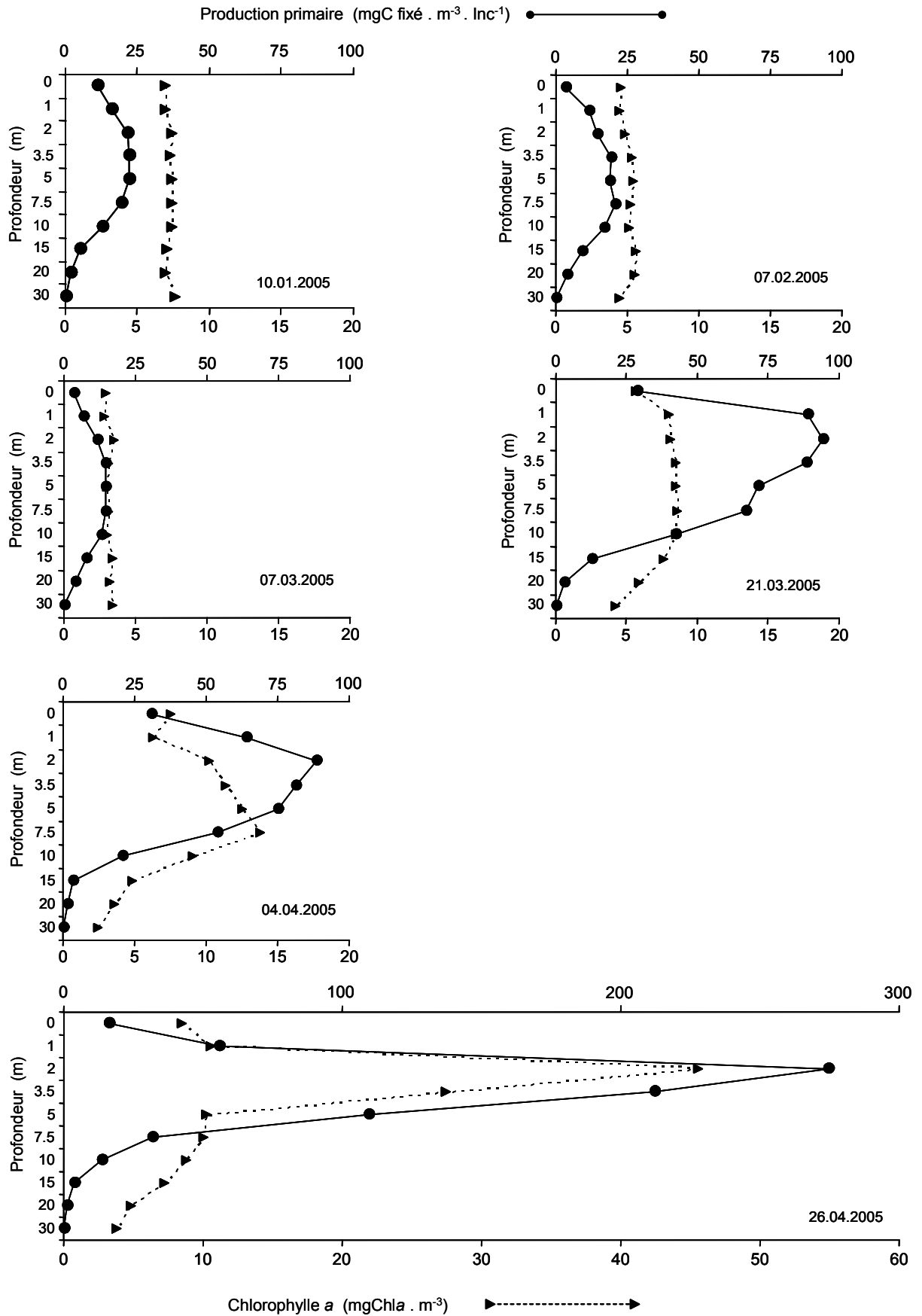


Figure 1 : Profils verticaux de la production primaire (traits pleins, échelles supérieures en mgC fixé par m³ par incubation) et de la biomasse exprimée en chlorophylle a (traits pointillés, échelle inférieure en mgChla par m³) au point SHL2 du 10 janvier au 26 avril 2005.

Figure 1: Vertical profiles of the primary production (unbroken line, upper scale in mgC fixed per m³ per incubation) and phytoplankton biomass expressed in terms of chlorophyll a (dotted line, lower scale in mgChla per m³) at station SHL2 from January 10 to April 26, 2005.

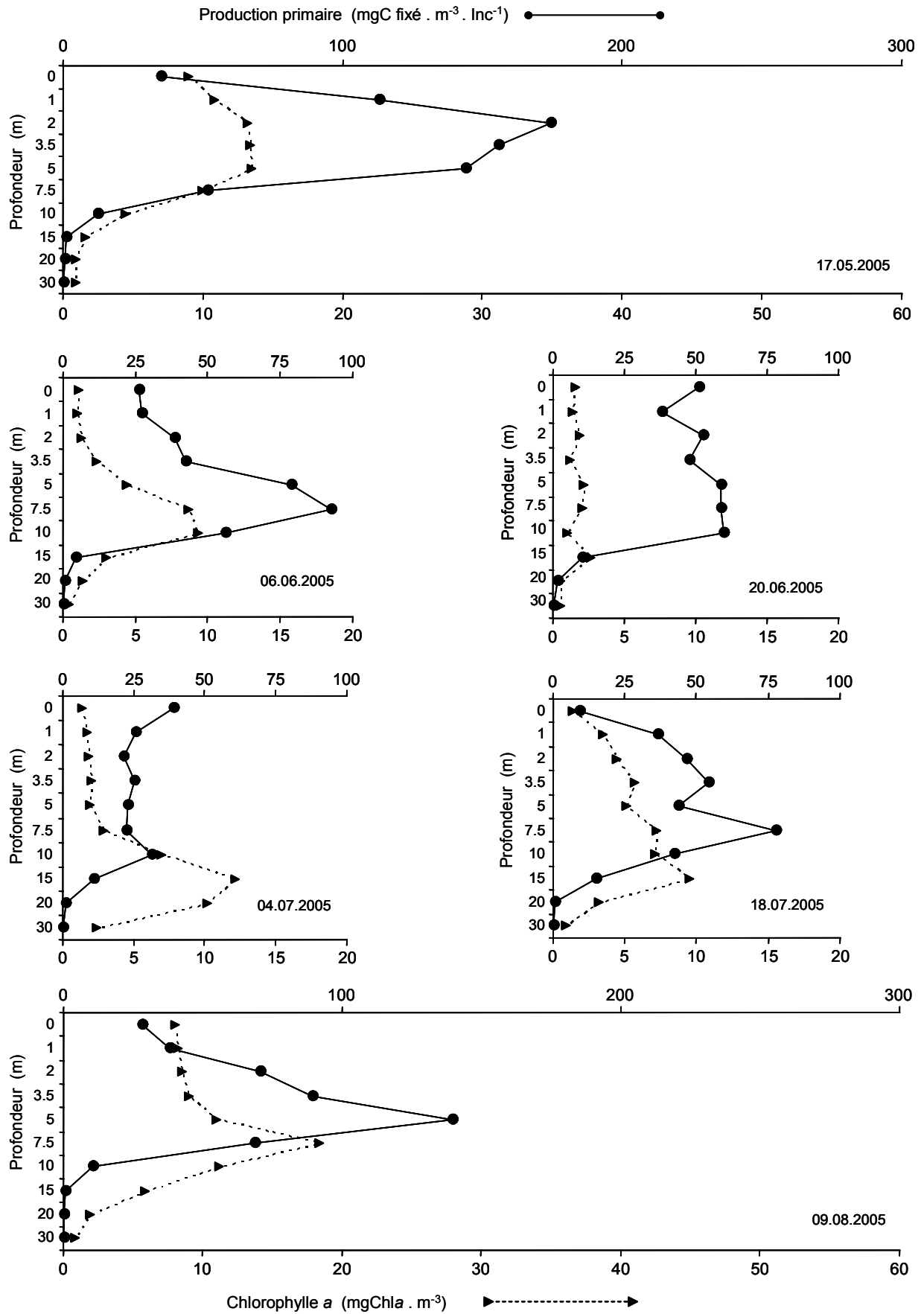
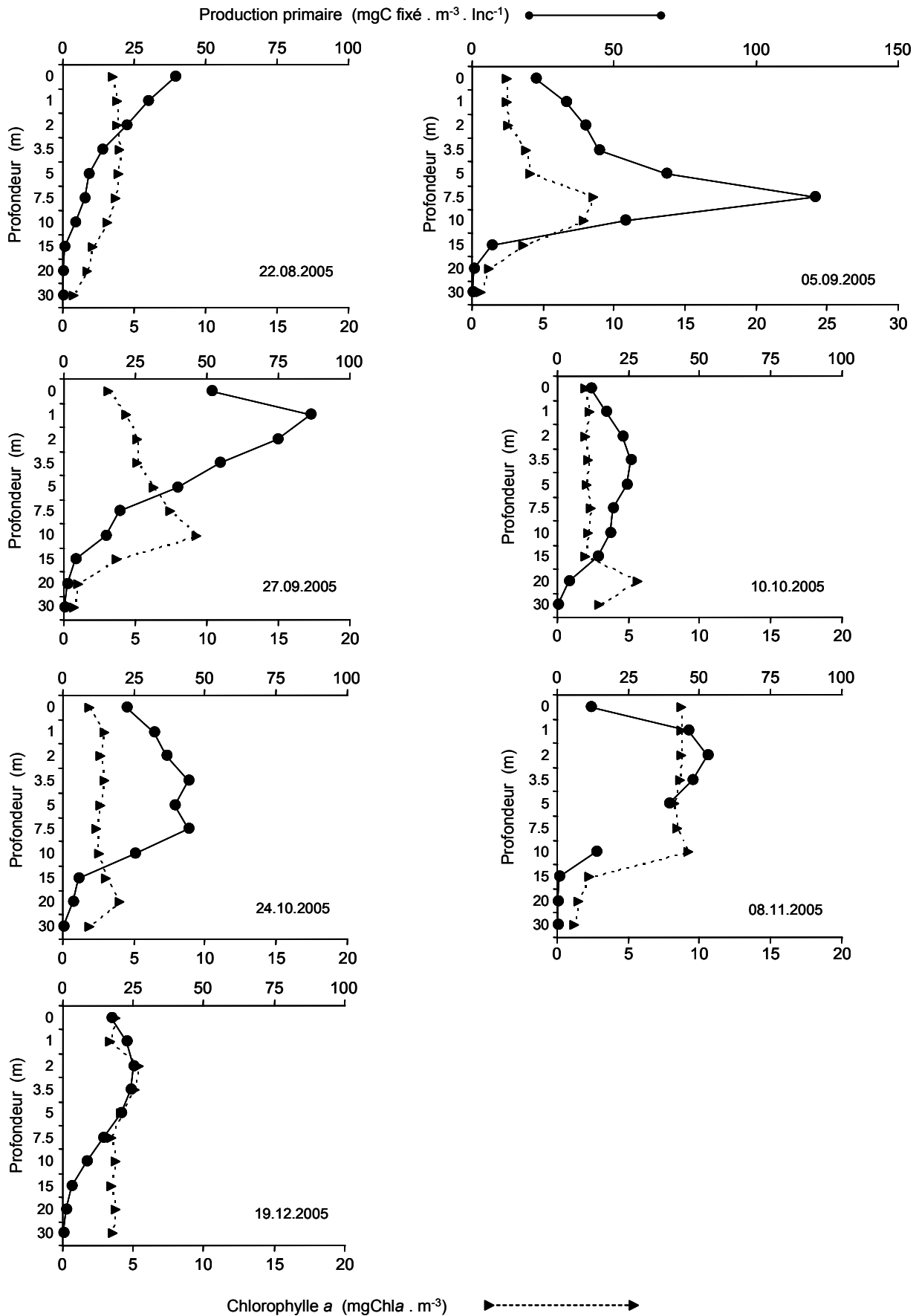


Figure 1 (suite) : Profils verticaux de la production primaire et de la biomasse exprimée en chlorophylle a au point SHL2 du 17 mai au 9 août 2005 (mêmes unités).
 Figure 1 (continued): Vertical profiles of primary production and biomass at station SHL2 from May 17 to August 9, 2005 (same units as above).



3.2 Variations saisonnières 2005 et comparaison avec les années 2002, 2003 et 2004

L'évolution saisonnière de la transparence de l'eau, de la température de l'eau à 0 m, ainsi que de la biomasse, de la production phytoplanctonique intégrées dans la zone 0-20 m et des valeurs de productivité, est présentée sur la figure 2. Les valeurs minimales de la transparence sont obtenues entre le 4 avril et le 17 mai puis le 9 août, coïncidant avec les pics de Chla. Une relation statistique significative et négative, semblable à celle obtenue en 2004 ($R^2 = 0.70$) est observée entre les deux variables ($R^2 = 0.68$, ici la Chla dans 0-10 m), indiquant que la Chla était encore le facteur majeur dans l'atténuation de la lumière dans la colonne d'eau. Les pics de Chla coïncident avec la prépondérance, en termes de biomasse carbonée, de la chlorophycée *Closterium aciculare* suivie de la cyanobactérie *Oscillatoria cf. janus* pour le 26 avril et des cyanobactéries *Oscillatoria cf. janus* et *Pseudanabaena galeata*, suivies des chlorophycées *Eudorina elagans* et *C. aciculare* pour le 9 août (DRUART et al., 2006, dans ce volume).

Les plus fortes valeurs de production primaire (entre 2'017 et 2'450 $\text{mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) sont obtenues entre le 21 mars et le 17 mai, coïncidant avec des pics de Chla. Après le 17 mai les valeurs de production décroissent globalement pour atteindre l'un des minima (517.2 $\text{mgC.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) à la dernière campagne (19 décembre). Cette évolution temporelle est différente de celle de la température de surface (0 m), mais très semblable à celles observées pour la production primaire en 2002 et 2003 (LEBOULANGER, 2004). En 2004, bien que la plus forte valeur de PP a été observée le 20 septembre (TADONLEKE, 2005), deux des six valeurs les plus élevées, ont été observées entre mars et mai. Les résultats de ces quatre dernières années indiquent ainsi que le phytoplancton est souvent productif au printemps ou très productif au printemps entre fin mars et mi-mai. Ces pics de production précèdent la phase d'eau claire (juin) qui se caractérisait en 2005 par des pics de productivité (figure 2), traduisant probablement la disponibilité de la lumière et une intense activité de broutage du phytoplancton par le zooplancton. Il apparaît, par exemple, que l'importance relative, en termes de biomasse carbonée, du nanophytoplancton (algues de taille $< 20 \mu\text{m}$), qui est souvent préférentiellement consommé par le zooplancton, chute significativement pendant ce mois de juin, et redevient inférieure à celle du microphytoplancton (algues de taille $> 20 \mu\text{m}$) qu'elle excédait le 17 mai (figure 5 de DRUART et al., 2006, dans ce volume).

3.3 Comparaison interannuelle des valeurs de biomasse chlorophyllienne, de production primaire et de capacité photosynthétique

Les valeurs moyennes de la Chla dans la zone 0-20m, de la production primaire, de la capacité photosynthétique (rapport de la production maximale dans la colonne d'eau par la biomasse chlorophyllienne à la même profondeur), ainsi que des concentrations en éléments nutritifs pour 2002, 2003, 2004 et 2005 sont présentées dans le tableau 2. Aucune différence significative ($P > 0.05$) n'est observée entre les 4 années pour ces variables, à l'exception du phosphore total pour lequel la concentration moyenne est significativement plus faible en 2003 que pendant les 3 autres années.

Tableau 2 : Evolution au cours des 4 dernières années de la production primaire nette annuelle (PPAN en $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$), de la capacité photosynthétique (Amax / Chl Amax) et des concentrations de chlorophylle a (mg.m^{-3}) et des éléments nutritifs intégrés sur 0-20 m.

Table 2 : Annual change in the net primary production (PPAN in $\text{gC.m}^{-2}.\text{y}^{-1}$), photosynthetic capacity and concentrations of chlorophyll a (mg.m^{-3}) and nutrients in the 0-20 m layer over the last four years.

Année	2002	2003	2004	2005
PPAN	232.0	272.0	256.0	261.0
Chl a (0-20 m)	5.6	4.9	4.5	5.6
Amax / Chl Amax	10.2	13.7	13.6	13.5
P-PO4 (mg.m^{-3})	6.1	6.7	7.4	7.0
Phosphore total (mgP.m^{-3})	16.7	8.0	16.5	17.6
Azote total (mgN.m^{-3})	551	535.0	562.0	514.0
Azote total / Phosphore total (atome/atome)	37.0	32.2	38.4	37.4

3.4 Relation entre phytoplancton et éléments nutritifs

L'un des objectifs de ce suivi est de comprendre s'il y a une relation entre la baisse des concentrations de phosphore observée depuis plusieurs années et les variables phytoplanctoniques. Une meilleure compréhension de ces liens passe par l'analyse de ces relations au niveau saisonnier. Cet exercice a été réalisé dans ce rapport avec la production primaire et la Chla mesurées lors des 4 dernières années. La figure 3 montre les résultats obtenus pour la Chla.

Bien qu'étant faible, la relation entre la production primaire et le phosphore total est significative et positive pour l'ensemble des 4 années ($R^2 = 0.07$, $P = 0.02$). Elle est, par ailleurs, non significative pour 2003 et 2004 ($P > 0.13$), marginale pour 2002 ($R^2 = 0.18$, $P = 0.056$) et significative, positive et assez forte pour 2005 ($R^2 = 0.32$, $P = 0.015$). Ces résultats suggèrent que la baisse des concentrations de P, pourrait effectivement aboutir globalement à une diminution de la production primaire dans le Léman, même si l'effet semble faible.

Pour la Chla, les données combinées montrent une absence de relation significative avec le phosphore total (figure 3a). Lorsque les années sont considérées individuellement, seule l'année 2005 montre une relation significative, mais faible ($R^2 = 0.25$, $P = 0.03$), entre ces deux variables.

Avec le phosphore particulaire, la Chla montre de fortes relations positives, aussi bien pour l'ensemble des données que pour 2002, 2003 et 2004; seule 2005 montre une relation significative faible (figure 3b). Cependant, quand on considère la Chla comme variable explicative du P particulaire, il apparaît que la pente et l'ordonnée à l'origine de la relation, pour les données combinées [$\text{Log (P. Particulaire)} = 0.42 + 0.62 \text{ Log(Chla)}$, $R^2 = 0.57$, $P < 0.0001$], sont significativement différentes, respectivement, de 1 et de 0 ($P < 0.05$). Ces résultats indiquent qu'au moins pour ces quatre années, une importante partie du phosphore était soit séquestré dans les organismes non photosynthétiques, soit sous forme minérale dans l'environnement. Il apparaît en effet que les orthophosphates représentent en moyenne 33, 39, 39 et 38 % du phosphore total, respectivement en 2002, 2003, 2004 et 2005. Par ailleurs, la séquestration du phosphore est connue chez les hétérotrophes, notamment quand cet élément devient peu abondant dans le milieu, comme il est observé pour les orthophosphates (moyenne dans 0-20 m, généralement entre 1 et 3 $\mu\text{gP.L}^{-1}$) entre mai et septembre au cours de ces années d'étude. D'autre part, les données des années 1969 à 1999 montrent une relation significative et positive entre le biovolume de zooplancton sédimenté et le phosphore total (BALVAY, 2000). Les analyses ci-dessus doivent toutefois être prises avec un peu de réserve, et réalisées non seulement avec la Chla, mais aussi avec les biomasses issues du biovolume du phytoplancton, dans la mesure où le rapport Chla/biovolume d'une cellule algale peut varier significativement avec les conditions du milieu.

Ces analyses phytoplancton-phosphore sont en cours de réalisation sur la série chronologique des 15 à 20 dernières années, et prendront en compte le zooplancton, afin de voir si les deux arguments évoqués ci-dessus (phosphore sous forme minérale et/ou dans les organismes hétérotrophes) peuvent aider à expliquer pourquoi les baisses de P total ne sont pas suivies de baisses substantielles au niveau des biomasses phytoplanctoniques. Comme il a été mentionné dans le rapport de l'année 2004 (TADONLEKE, 2005), la structure en taille du phytoplancton doit également être prise en compte pour une meilleure compréhension du processus. L'augmentation de la proportion du nanophytoplancton de 9 % en 2004 à 12 % en 2005 (DRUART et al., 2006 dans ce volume) semble en accord avec la diminution, bien que non significative, de la concentration en orthophosphates de 2004 à 2005 (Tableau 2), dans la mesure où les algues planctoniques de petite taille sont, en général, meilleures compétitrices que les algues planctoniques de grande taille quand les éléments nutritifs deviennent rares.

4. CONCLUSIONS

Au cours de cette année 2005, les pics de production sont enregistrés au printemps, comme déjà observé pour les années 2002, 2003 et 2004. Ni les valeurs de production primaire, ni celles de la biomasse chorophyllienne ne diffèrent significativement d'une année à l'autre, globalement en accord avec la constance interannuelle observée au niveau des concentrations en éléments nutritifs.

Cependant, l'analyse des relations saisonnières phytoplancton-phosphore suggère que :

- la baisse des concentrations de P pourrait effectivement aboutir à la baisse de la production primaire dans le Léman,
- les proportions relativement élevées de phosphore sous forme d'orthophosphates dans le milieu, notamment au printemps, ainsi que le phosphore dans les organismes hétérotrophes pourraient aider à comprendre comment varie la biomasse phytoplanctonique en relation avec cette baisse des concentrations de phosphore total.

BIBLIOGRAPHIE

- BALVAY, G. (2000) : Evolution du zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1999, 79-90.
- DRUART, J.-C., ROBERT, M. et TADONLEKE, R. (2006) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 89-100.
- LAZZAROTTO, J. , RAPIN, F. et CORVI, C. (2005) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2004, 31-53.
- LEBOULANGER, C (2004) : Dynamique de la production phytoplanctonique et de la biomasse chlorophyllienne dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2003, 58-68.
- PELLETIER, J.P. (1983) : Mesure de la production primaire en milieu aquatique : problèmes méthodologiques et éléments d'interprétation. Rev. Fr. Sci. Eau, 2, 339-366.
- STRICKLAND, J.D.H. et PARSONS, T.R. (1968) : A practical handbook of seawater analysis. Bull. Fish. Res. Board Canada, 167, 311 p.
- STEEMAN-NIELSEN, E. (1952) : The use of radioactive carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. J. Cons. Int. Exploit. Mer, 18, 117-140.
- TADONLEKE, R.D. (2005) : Production et biomasse phytoplanctoniques dans le Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2004, 91-99.

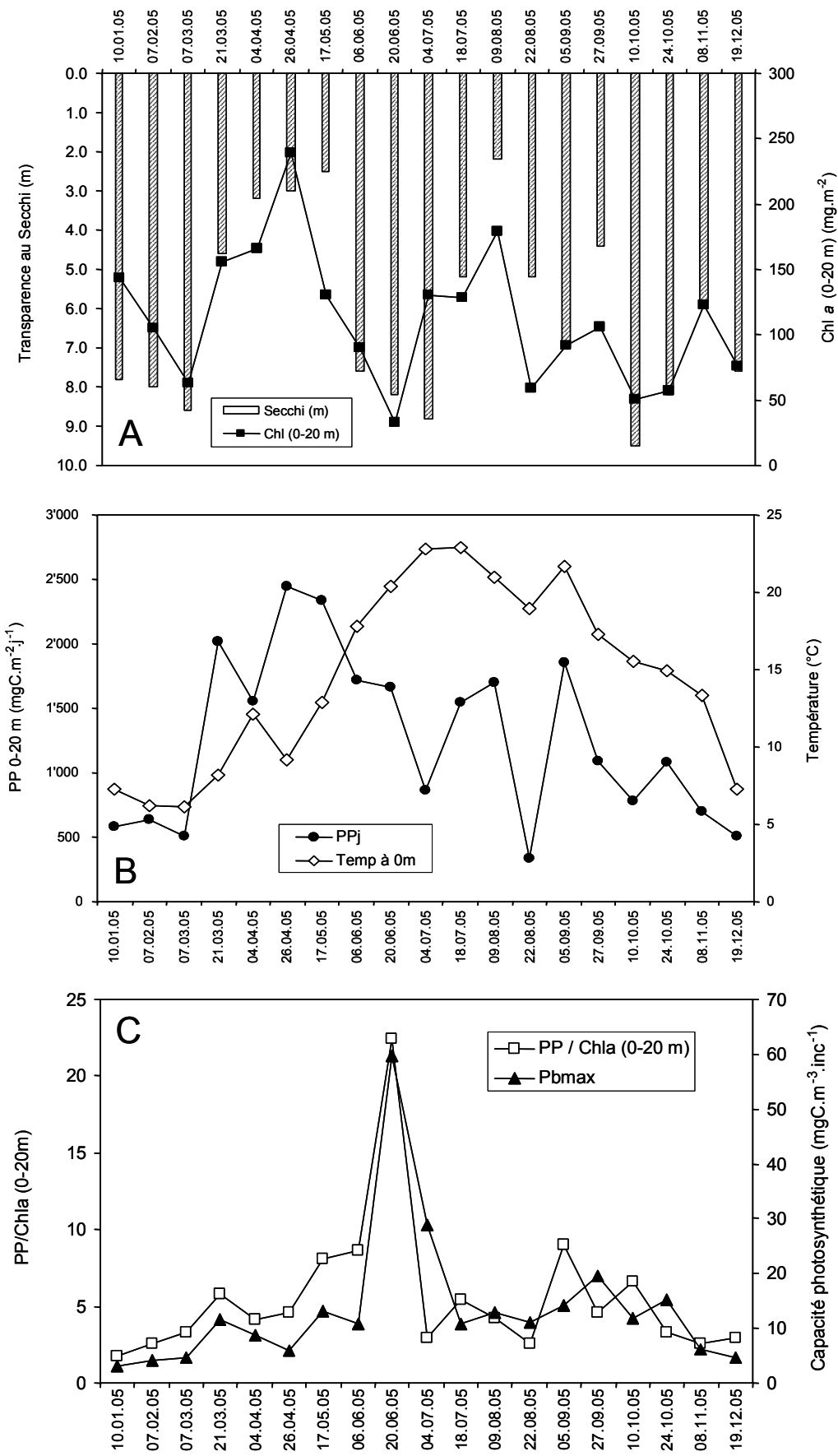


Figure 2 : Variations saisonnière de la transparence de l'eau et de la chlorophylle a dans zone 0-20 m (A), de la température à 0 m et de la production primaire dans la zone 0-20 m (B) et des indices de productivité (C) en 2005.

Figure 2 : Seasonal changes of the water transparency and of chlorophyll a in the 0-20 m zone (A), of the temperature at 0 m, the primary production in the 0-20 m zone (B) and of the production indices (C) in 2005.

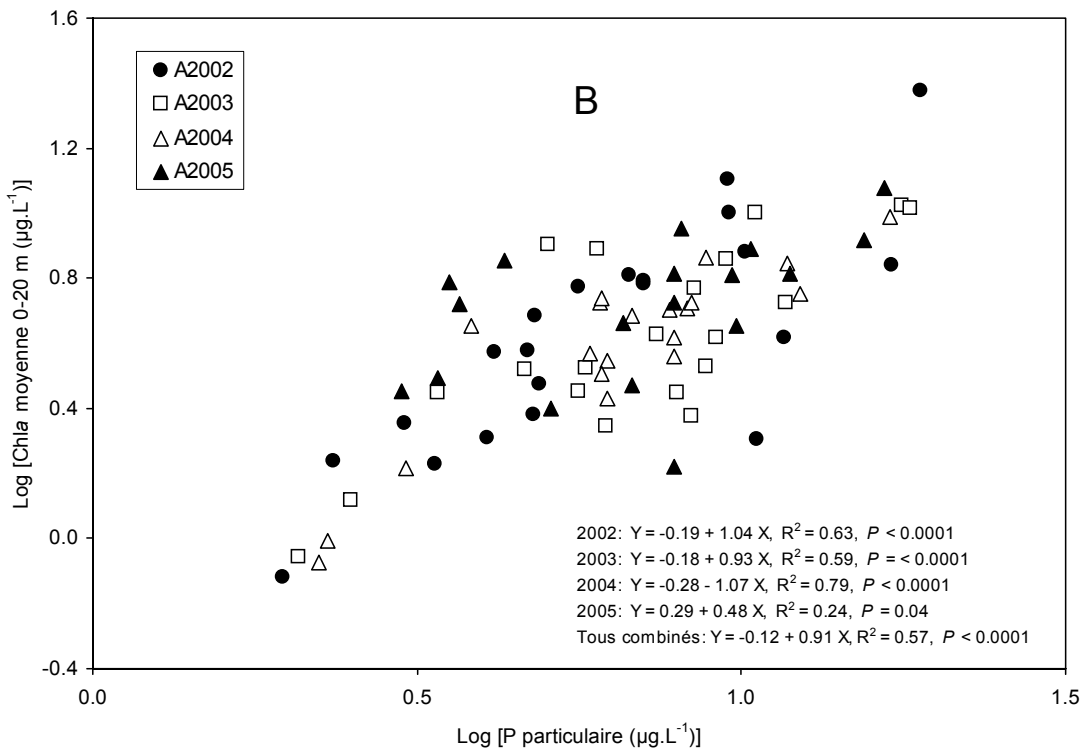
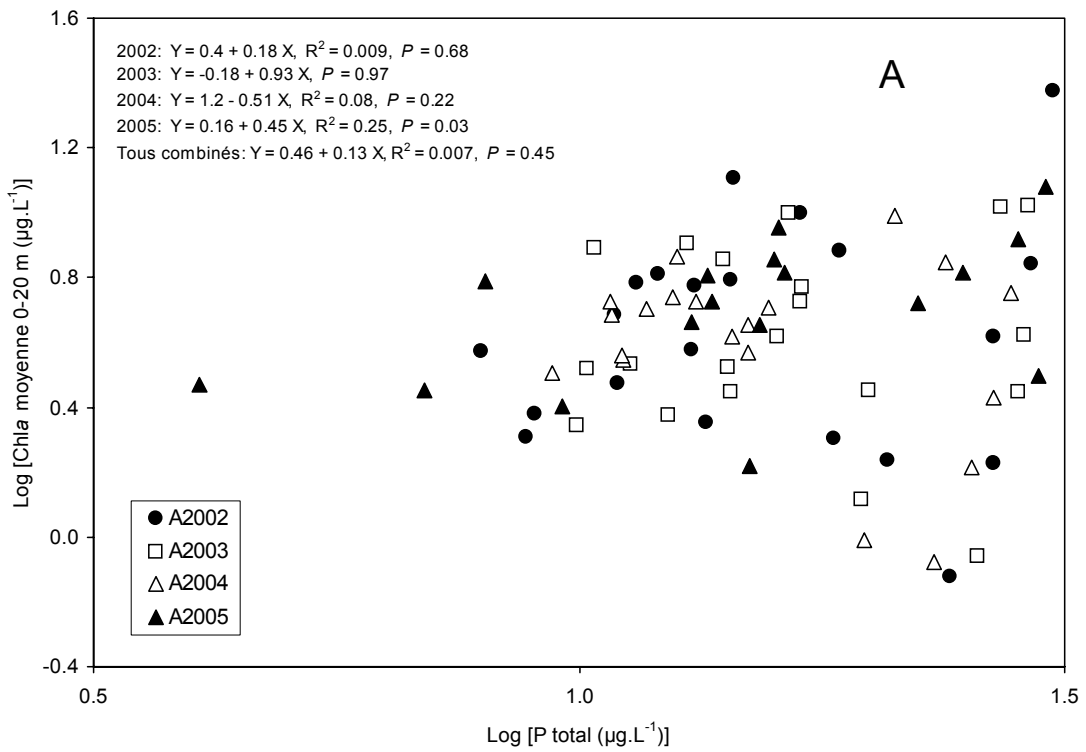


Figure 3 : Relations de la Chlorophylle a avec (A) le phosphore total et (B) le phosphore particulaire en 2002, 2003, 2004 et 2005.

Figure 3 : Relationships between Chlorophyll a and total phosphorus (A) and particular phosphorus (B) in 2002, 2003, 2004 and 2005.

CONSEIL SCIENTIFIQUE

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

RAPPORTS

SUR LES ÉTUDES
ET RECHERCHES ENTREPRISES
DANS LE BASSIN LÉMANIQUE

PROGRAMME QUINQUENNAL 2001-2005
CAMPAGNE 2005

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