UNIVERSITE CHAMBERY ANNECY SAVOIE

INRA

CARRTEL
Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques

CNRS

Laboratoire EDYTEM
Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne

Région RhôneAlpes

CALB
Communauté d'Agglomération du Lac du Bourget

Cisalb lac du Bourget

Autour du Lac du Bourget

15 - 17 mai 2006
Université de Savoie - Le Bourget du Lac

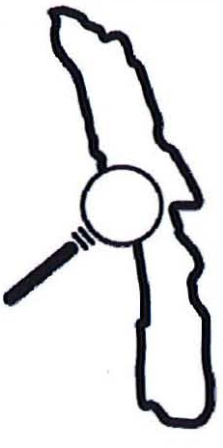
Actes du colloque



Edité par **Jacquet *et al.***

Résumé

L'UMR CARRTEL (INRA - Université de Savoie), l'UMR EDYTEM (CNRS - Université de Savoie) et le CISALB ont organisé du 15 au 17 mai 2006 le premier colloque national pluridisciplinaire concernant le Lac du Bourget. Cet événement a permis aux scientifiques, gestionnaires, utilisateurs et élus locaux de se rencontrer et de partager ensemble et avec un public plus large, les connaissances actuelles portant sur cet écosystème et son bassin versant. Ces actes reprennent les grands thèmes du colloque « Autour du lac du Bourget » sous la forme d'articles, donnant une photographie au printemps 2006 de l'état d'avancement des connaissances acquises et des travaux scientifiques en cours. Centrés sur l'objet lac, les sujets traitent à la fois de la qualité de l'eau, de la biodiversité, du fonctionnement hydrologique, des relations entre le fonctionnement du lac et l'évolution des facteurs de forçage externes locaux et globaux (changements d'usages sur le bassin versant, changement climatique) mais également de son patrimoine naturel et archéologique. Bonne lecture !



ISBN : 2-915351-10-4

Fonctionnement biogéochimique du lac du Bourget: phosphore, phytoplancton, calcite et flux de sédimentation

Biogeochemical functioning of Lake Bourget: Phosphorus, phytoplankton, calcite and settling fluxes

Brigitte Vinçon-Leite [1*], Alexis Groleau [2], Gérard Sarazin [2], Catherine Quiblier [3], Gérard Paolini [4], Bruno Tassin [1]

(1) CEREVE, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Avenue Blaise Pascal, 77455 Champs sur Marne - (*) bvl@cereve.enpc.fr
(2) LGE, Université Denis Diderot Paris VII, 4 place Jussieu, 75005 Paris
(3) USM505, Muséum National d'Histoire Naturelle, 12 rue Buffon, 75005 Paris
(4) Cellule technique du lac du Bourget, CCLB, 1500 Bd Lepic, 73100 Aix les Bains

Résumé. Les travaux d'assainissement menés dans le bassin versant du lac du Bourget depuis 1980 ont réduit les apports en nutriments et les concentrations en phosphore directement assimilable par les algues. Néanmoins, paradoxalement, l'état trophique du lac ne s'est pas significativement amélioré, des développements de cyanobactéries toxiques (*Planktothrix rubescens*) observés régulièrement depuis 1996, constituant une menace pour les usages de l'eau. Afin de préciser les processus principaux intervenant dans le cycle du phosphore, plusieurs programmes de recherche successifs, basés sur une double approche de terrain et de modélisation mathématique ont été entrepris de 1988 à 1998. Les flux de sédimentation de la matière particulaire et des formes du phosphore associées ont été quantifiés à l'échelle saisonnière et annuelle, mettant en évidence que la sédimentation du phosphore particulaire constituait un important mécanisme de transfert vers le compartiment sédimentaire de fond, essentiel pour la restauration du lac. Les interactions entre le phosphore et, d'une part deux types de particules dominantes de la matière particulaire autochtone, phytoplancton et calcite, d'autre part les oxydes métalliques ont été étudiées. S'il n'a pas été possible d'élucider totalement l'origine du phosphore utilisé pour la production primaire estivale, les résultats obtenus ont conduit à envisager d'autres mécanismes explicatifs, de nature hydrodynamique et bidimensionnelle.

Mots-clés : eutrophisation, restauration, phosphore, sédimentation

Abstract. The diversion, in 1980, of the main sewers entering Lake Bourget reduced significantly the nutrient loading and the inlake bioavailable phosphorus concentration. Nevertheless, paradoxically, the lake trophic state has not been clearly improved and blooms of toxic cyanobacteria (*Planktothrix rubescens*), which threaten the use of water, have been frequently observed since 1996. The main processes occurring in the phosphorus cycle have been studied in successive research projects (1988-1998), based on a joined approach of field survey and mathematical modelling. The settling fluxes of particulate matter and associated phosphorus species have been measured at the year and season scales. These results have highlighted that the sedimentation of particulate phosphorus is a very significant transfer process towards the bottom sediment, essential for the lake water quality restoration. Interplays between phosphorus, two types of major autochthonous particles, phytoplankton and calcite, and metallic oxides have been investigated. Notwithstanding that, the obtained results were unsuccessful to make totally clear the origin of the phosphorus available for summer primary production, these results suggested that other two-dimension, hydrodynamical processes, have to be considered.

Keywords: eutrophication, water quality restoration, phosphorus, settling

1. Introduction

Afin d'enrayer l'eutrophisation qui a affecté le lac du Bourget dès la fin des années 50, des travaux d'assainissement ont été menés dans le bassin versant depuis 1980. Ils ont permis de diminuer les apports en nutriments et de réduire, dans le lac, les concentrations en phosphore directement assimilable par les algues. Bien que les concentrations mesurées durant la période hivernale soient les plus basses depuis 1950 ([PO_4] = 24 µgP/l en mars 2005), l'état trophique du lac ne s'est pas significativement amélioré (Cereve-Greti-Inra, 1998). Ainsi, des développements de cyanobactéries toxiques (Planktothrix rubescens) observés régulièrement depuis 1996 (Humbert et al., 2001; Vinçon-Leite et al., 2002; Oberhaus et al., 2003), constituent une menace pour les usages de l'eau, notamment l'approvisionnement en eau potable.

Le phosphore demeurant le principal élément limitant la production primaire dans le lac du Bourget, la connaissance précise de ce cycle s'avère primordiale. Les deux principaux processus influant sur le cycle du phosphore dans la colonne d'eau concernent l'absorption du phosphore dissous biodisponible par le phytoplancton et la sédimentation du phosphore particulaire. Les transferts de phosphore entre formes particulaires et dissoutes peuvent également survenir pendant les épisodes de crues des affluents (Vinçon-Leite et al., 1997) et de cristallisation de calcite.

En 1988, une série de programmes de recherche pluridisciplinaires a été initiée par le CEREVE afin de préciser le fonctionnement d'un lac en cours de restauration. Ces programmes ont porté sur 4 volets : (1) cycle du phosphore et sédimentation de la matière particulaire (Stroffek, 1990; Vinçon-Leite, 1991; Gayte, 1997 ; Groleau, 2000), (2) modélisation unidimensionnelle physique et biogéochimique (Vinçon-Leite, 1991), (3) modélisation des courants de densité et des ondes internes (Bournet, 1996), (4) rôle de la boucle microbienne et de la matière organique (Stroffek, 1990; Gayte, 1997). Les principaux résultats portant sur les processus biogéochimiques impliqués dans le cycle du phosphore, obtenus de 1988 à 2000, seront présentés dans cet article.

2. La restauration

2.1. Les apports par les affluents

Dans les années 70, au cours de l'eutrophisation du lac du Bourget, les apports en nutriments par les principaux tributaires ont été estimés : charges annuelles en phosphore total de l'ordre de 250 tonnes, en orthophosphates[4] (PO_4^{3-}) de l'ordre de 140 tonnes et en azote de 1800 tonnes (CTGREF, 1975, CEMAGREF, 1978).

En 1980, à la suite de la mise en service du ceinturage de la rive sud du lac, les apports en phosphore ont diminué radicalement, de 50% pour le phosphore total, de pratiquement 80% pour les orthophosphates et de 70% de l'azote (CEMAGREF, 1984). Les apports en phosphore ont ensuite continué à diminuer pour atteindre actuellement des valeurs de l'ordre de 20 T de Phosphore total, 3.5 T d'orthophosphates et 360 T d'azote (Girel, 2006). Au cours des 25 dernières années, la diminution plus accentuée des apports de phosphore a fortement modifié le rapport massique N/P qui est passé de valeurs de l'ordre de 10 à des valeurs de l'ordre de 100 actuellement (Figure 1.a).

[4] Les orthophosphates constituent la fraction directement assimilable par le phytoplancton

2.2. La colonne d'eau

L'évolution résultante des concentrations en phosphore et azote et du rapport massique N/P dans la colonne d'eau est reportée sur la figure 1.b. Les concentrations de phosphore ont diminué plus fortement que les concentrations d'azote, entraînant une augmentation du rapport massique N/P qui est passé de 12 à environ 60 actuellement.

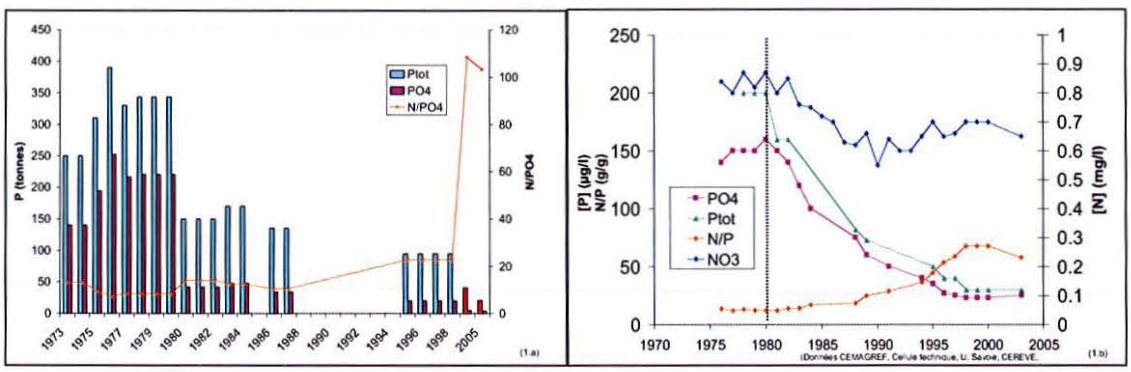


Figure 1. Evolution des apports en nutriments par le bassin versant (1.a) et des concentrations dans la colonne d'eau (1.b).

3. Flux de sédimentation

Le cycle annuel de la sédimentation de la matière particulaire dans le lac du Bourget a été étudié pour la première fois en 1988-89, au moyen de trappes à sédiment disposées en trois profondeurs, 10, 30 et 80 m, dans la partie orientale de la fosse sud du lac (Stroffek, 1990 ; Vinçon-Leite, 1991). A l'échelle annuelle, les flux de sédimentation de la matière particulaire totale dans laquelle la fraction minérale est prédominante, montrent en 1988-1989, une augmentation avec la profondeur (Fig. 2.a). L'augmentation des flux à 80m peut être attribuée essentiellement à l'entrée en profondeur de la Leysse, principal affluent du lac, lors des épisodes de crue. Les flux à 80m présentent donc une grande variabilité interannuelle en fonction du contexte hydrologique.

Les flux de sédimentation du phosphore particulaire, dans lesquels la fraction minérale est plus majoritaire, montrent également une augmentation avec la profondeur (Fig. 2.b).

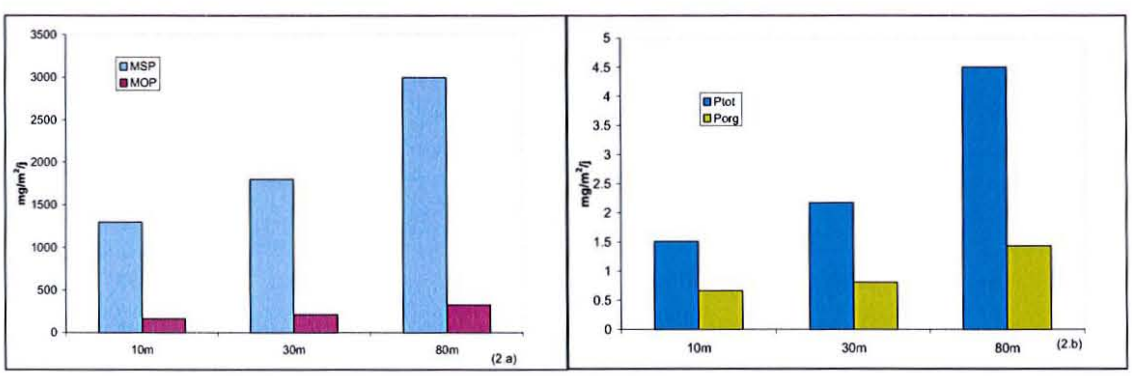


Figure 2. Flux de sédimentation de la matière particulaire totale (2.a) et du phosphore (2.b).

La spéciation du phosphore en phosphore organique et phosphore minéral[5], apatitique (PIA) et non-apatitique (PINA), a été réalisée dans les particules en sédimentation recueillies en plusieurs périodes (Cf Figure 7en annexe).

Parallèlement aux mesures de terrain, le développement d'un modèle thermique et biogéochimique unidimensionnel vertical du lac a été réalisé (Vinçon-Leite *et al.*, 1989 ; 1995). Ce modèle dont le schéma conceptuel du cycle du phosphore est représenté sur la Figure 8 (en annexe) a permis de calculer plusieurs termes du bilan de phosphore et de les valider par rapport aux mêmes termes estimés à partir des données de terrain de 1988-89. Sur la base des résultats du modèle, l'évolution du stock de phosphore hivernal, a été calculée sur une période de 10 ans (1980-1989). La comparaison avec les valeurs de terrain (Figure 3) montre une bonne adéquation entre modèle et données jusqu'en 1985 puis, alors que le modèle tend vers un stock d'équilibre d'environ 270T de phosphore, les données montrent une diminution régulière du stock jusqu'à une valeur de 200T en 1989, correspondant à un écart de l'ordre de 25%.

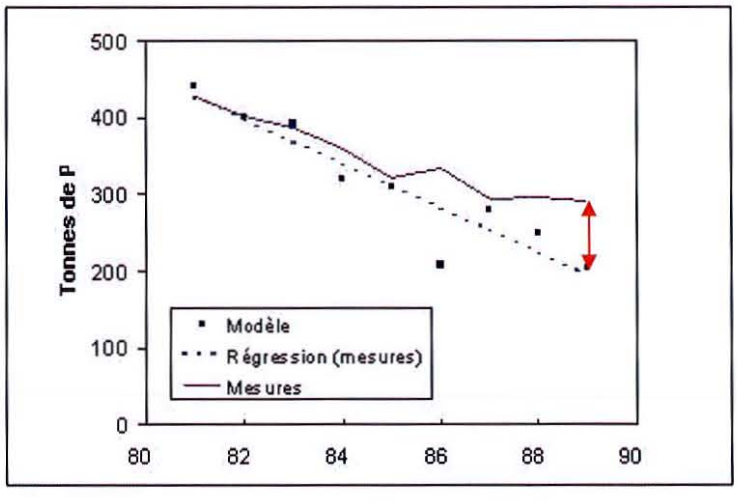


Figure 3. Evolution du stock hivernal de P de 1980 à 1989 (d'après Vinçon-Leite et al., 1995).

4. Interactions entre phosphore et particules

L'écart sur le stock de phosphore hivernal entre mesures et modèle suggère que des puits de phosphore présents dans le lac ne sont pas décrits par le modèle. Ces termes font probablement intervenir la fraction minérale du P particulaire, non prise en compte dans le modèle, dans des processus d'adsorption du P minéral dissous sur des particules allochtones apportées par les affluents et sur des particules autochtones telles que la calcite. Une coprécipitation des orthophosphates avec la calcite peut également se produire. Parmi les processus impliquant les particules autochtones, ceux concernant la calcite ont été étudiés en premier lieu, la calcite constituant une particule dominante dans le lac du Bourget.

4.1. La calcite

La précipitation de calcite dans le lac du Bourget, bien que connue de longue date, n'était pas été quantifiée précisément. Une première estimation basée sur des données

[5] Le phosphore minéral comprend le Phosphore Apatitique (PA) qui correspond au P inclus dans l'apatite ainsi qu'au P associé à la calcite et à tous les minéraux calciques et le Phosphore Inorganique Non Apatitique (PINA) qui regroupe le P lié aux oxydes métalliques (Fe, Mn, Al) et aux argiles.

ponctuelles de calcium dissous a calculé une production annuelle de calcite, en 1998-89, de l'ordre de 15 000 tonnes (Vinçon-Leite, 1991) mais la dynamique de la précipitation de calcite a été spécifiquement étudiée en 1997-1998 (Groleau, 2000). Une nouvelle méthode de suivi de la précipitation basée sur l'exploitation des profils de conductivité spécifique (C_{25}), facilement mesurables *in situ* a été développée (Groleau *et al.*, 2000). Dans l'épilimnion, les charges électriques associées aux ions calcium et carbonates dominent fortement les espèces dissoutes, permettant de relier la concentration en calcium à la C_{25} (Figure). Les profils de concentration en calcium dissous dans la colonne d'eau peuvent ainsi être calculés avec une résolution verticale centimétrique, permettant de tracer très précisément l'évolution spatio-temporelle de la précipitation de calcite (figure en annexe). L'extrapolation à la surface totale du lac de la production de calcite, estimée à 480 $g.m^{-2}.an^{-1}$, donne une production de 16 000 $tonnes.an^{-1}$ de $CaCO_3$.

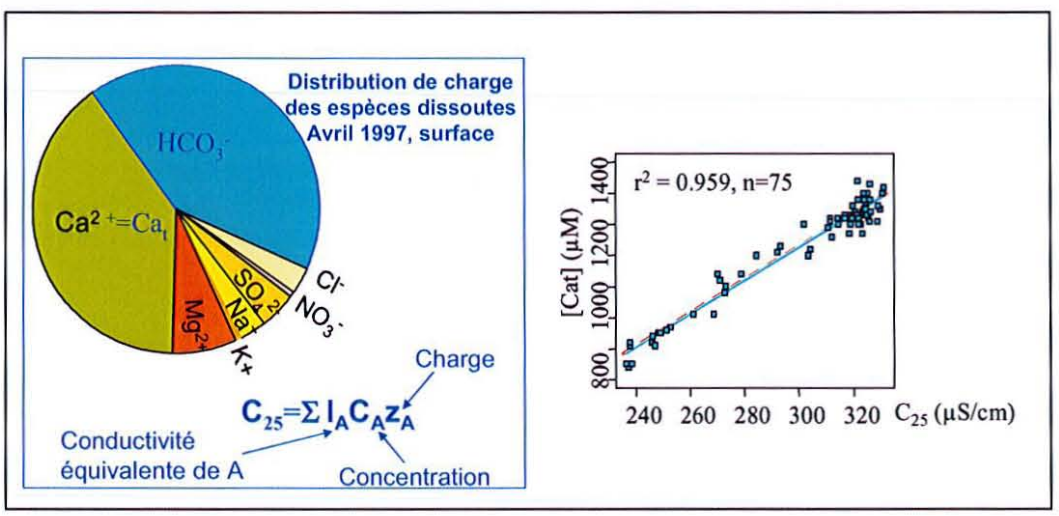


Figure 4. Relation entre Calcium dissous et Conductivité spécifique dans l'épilimnion du lac du Bourget (d'après Groleau et al., 2000).

4.2. Phosphore et particules en sédimentation

Les caractéristiques de la fraction particulaire au cours de la sédimentation ont été étudiées afin de mettre en évidence les interactions entre le phosphore, la calcite et les autres particules. L'augmentation des flux de phosphore avec la profondeur, déjà observée en 1988-89, a été à nouveau mise en évidence. De plus, l'enrichissement en phosphore des particules au cours de leur sédimentation a été clairement établi (Groleau, 2000). Les analyses de spéciation du phosphore (Porg, PIA et PINA) ont montré que la composition en phosphore minéral des particules augmente avec la profondeur tandis qu'elle diminue pour le phosphore organique.

Les flux de sédimentation, calculés pour les différentes formes de phosphore, indiquent que l'enrichissement en phosphore minéral de la matière particulaire entre 10 et 80m est compris entre 160 et 500 $mgP.m^{-2}.j^{-1}$, dû à la contribution du PA pour 20 à 35% et à celle du PINA pour 65 à 78%.

Les interactions entre le phosphore et les particules minérales sont quantifiées sur la

Figure 5. Elles montrent sur ces deux années une assez grande variabilité. En 1998, les interactions entre phosphore et particules minérales d'origine autochtone pèsent pour 20% de la sédimentation du phosphore total alors qu'en 1997, le poids total de ces interactions ne représente plus que 8% de la sédimentation du Ptot. En 1998, l'entraînement

du phosphore par la calcite authigène représente 4% de la sédimentation du phosphore total annuel, quatre fois moins que le P associé aux oxydes de fer et de manganèse qui compte pour 16% de la sédimentation du phosphore total annuel. Néanmoins, l'ordre de grandeur de ces interactions, 8-20%, à l'échelle annuelle, ne permet pas de les négliger dans le schéma conceptuel du cycle du phosphore.

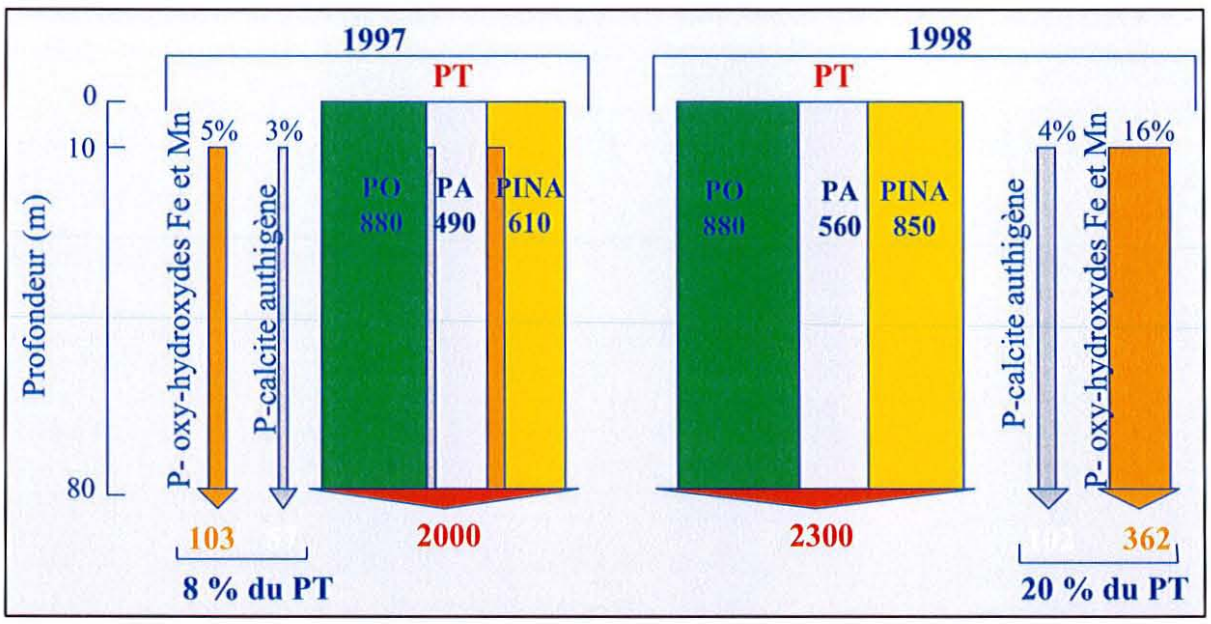


Figure 5. Synthèse des interactions Phosphore – particules (d'après Groleau, 2000).

5. Phosphore et production primaire

L'étude détaillée du cycle du phosphore dans le lac du Bourget a initialement été entreprise afin de préciser l'origine du phosphore biodisponible consommé par le phytoplancton. Si l'on s'intéresse à la comparaison de l'évolution saisonnière des concentrations en orthophosphates et en chlorophylle dans l'épilimnion du lac du Bourget (

Figure 6), il apparaît que des augmentations significatives de la concentration en chlorophylle sont mesurées en des périodes où les concentrations en orthophosphates sont très faibles. Des estimations du rapport stochiométrique C/P dans les cellules algales produites pendant ces mêmes périodes aboutissent à des valeurs très élevées, indiquant une carence extrême en P des cellules, durant la période estivale. Par ailleurs, l'épuisement de l'épilimnion en orthophosphates, qui survient généralement dès le mois de mai, s'amplifie durant l'été et s'étend sur une profondeur d'au moins 30 m, allant jusqu'à 45m certaines années, limitant probablement une réalimentation à partir de l'eau hypolimnique plus riche en phosphore. L'explication d'une production primaire assez soutenue dans un épilimnion épuisé en phosphore conduit donc à envisager des échanges non pas seulement verticaux mais horizontaux. L'hypothèse émise, à l'origine du programme de recherche DYLACHEM[6] mené en 2004-2005, est que les ondes internes, lorsqu'elles rencontrent les zones littorales du lac, peuvent déferler et générer localement des épisodes de forte turbulence (Cuypers *et al.*, 2006 (a) ; 2006 (b)) induisant un transfert rapide des nutriments présents à l'interface eau-sédiment ou dans l'hypolimnion, vers l'épilimnion où l'essentiel de la biomasse algale est produit.

[6] DYLACHEM (Dynamique Lacustre et Hétérogénéités Biogéochimiques) est un projet de recherche pluridisciplinaire financé par le programme ECCO (PNRH) du CNRS.

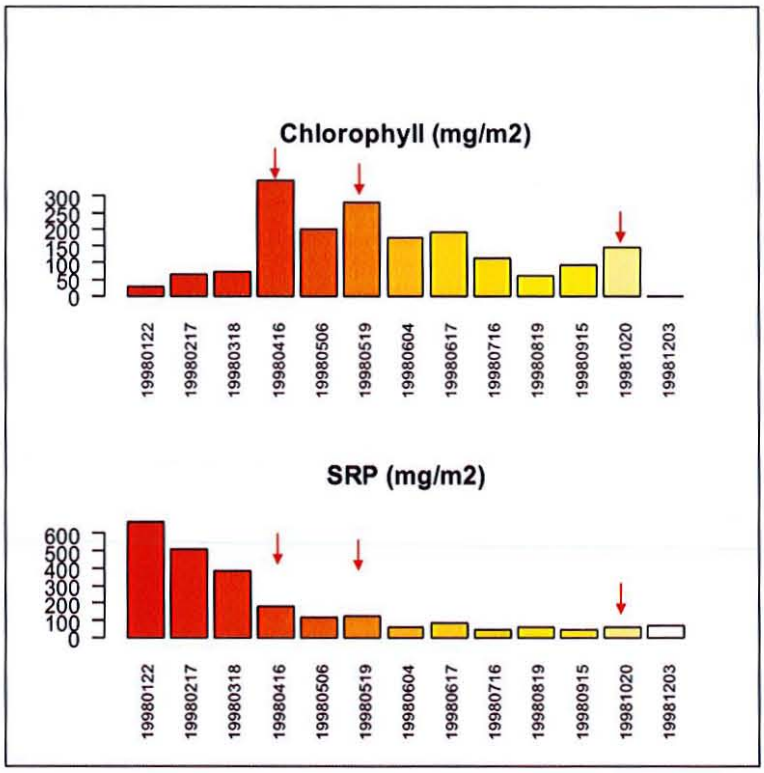


Figure 6. Chlorophylle et orthophosphates dans la colonne d'eau (1998).

6. Conclusions

Dans le lac du Bourget, la sédimentation du phosphore particulaire constitue un mécanisme particulièrement important de transfert du phosphore vers le compartiment sédimentaire et contribue donc de façon essentielle à la restauration du lac. Aucune interaction impliquant le phosphore n'a été détectée lors de la cristallisation de la calcite dans l'épilimnion. En effet, à cette période la concentration en orthophosphates dans l'eau du lac est très faible (< 5µgP/l) et la coprécipitation de phosphore avec la calcite, si elle survient, met en jeu des quantités faibles, indétectables par les techniques analytiques utilisées. En revanche, l'enrichissement des particules en phosphore minéral au cours de leur sédimentation vers le fond pendant les périodes de précipitation de calcite s'explique par deux processus de nature et d'intensité différentes : (1) l'adsorption de phosphates sur la calcite contribue à la sédimentation d'environ 4 % du phosphore et (2) l'association de phosphates sur des oxydes de fer et de manganèse entraîne environ 15 % du phosphore total sédimenté annuellement. La participation au cycle du phosphore de ces deux mécanismes n'est donc pas négligeable, surtout si l'on s'intéresse à l'évolution des concentrations en phosphore dans le lac à moyen ou long terme. Enfin, un mécanisme important par lequel la calcite contribue au transport du phosphore vers le fond du lac, lors des blooms algaux, est dû au processus d'agrégation entre les cristaux de calcite et les cellules algales riches en phosphore organique.

Les recherches menées, si elles ont fait progresser la connaissance du fonctionnement biogéochimique du lac du Bourget, n'ont toutefois pas permis de conclure sur l'origine du phosphore biodisponible pour la production primaire, en période estivale, alors que l'épilimnion est épuisé en phosphore. En revanche, elles ont conduit à en rechercher l'explication dans l'étude de transferts bidimensionnels, entre la zone littorale et la zone pélagique du lac, sous l'action de mécanismes hydrodynamiques liés à l'activité des ondes internes.

Remerciements

Les résultats présentés dans cet article ont été obtenus dans le cadre de projets de recherche financés notamment par le CISALB, la CCLB, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, le Ministère de l'Agriculture, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable ainsi que le Ministère de la Recherche.

Références bibliographiques

Bournet P.-E., 1996, Contribution à l'étude hydrodynamique et thermique du lac du Bourget – Courants de densité et ondes internes, *Th. Doct.* Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, CEREVE, 335p.

CEMAGREF, 1978, Le lac du Bourget – Bilan des observations menées en 1975-76-77 ; essai d'établissement d'un bilan de matière, *Rapport de recherche n°136*, 2 fascicules, Grenoble.

CEMAGREF, 1984, Le lac du Bourget et ses apports – Etude 1982, *Rapport de recherche*, 6 fascicules, DQEPP, Lyon

CEREVE, GRETI, INRA, 1998, Analyse de l'évolution de la qualité des eaux du lac du Bourget, *Rapport de recherche*, France

CTGREF, 1975, Charges en fertilisants des principaux tributaires du lac du Bourget, *Rapport de recherche*, 7 fascicules, Aix-les-Bains

Cuypers Y., Vinçon-Leite B., Poulin M., Tassin B., 2006 (a), Linear and nonlinear internal waves in a sub-alpine lake, *EGU Geophysical Research Proceedings*, Vol. 8, 07608, Wien

Cuypers Y., Vinçon-Leite B., Bournet P.-E., Poulin M., Tassin B., 2006 (b), Mécanismes de mélange turbulent engendrés par les ondes internes dans le lac du Bourget, *Actes du Colloque Autour du lac du Bourget*, Le Bourget du Lac

Gayte X., 1997, Rôle de l'interface rivière-lac dans la modification des apports de nutriments à l'écosystème lacustre. Dynamique du bactérioplancton et transformation de la matière organique dans l'écotone Leysse-Bourget, *Th. Doct.* Univ. Savoie.

Girel C., 2006, Suivi en continu des apports des tributaires du lac du Bourget, *Résumé des communications Colloque Autour du lac du Bourget*, Le Bourget du Lac

Groleau, A., Sarazin, G., Vinçon-Leite, B., Quiblier-Lloberas C. and Tassin B., 2000, Tracing calcite precipitation with specific conductance in a hard water alpine lake (Lake Bourget). *Water Research*, 34(17): 4151–4160.

Groleau A., 2000, Dynamique des particules et interactions avec le cycle du phosphore dans le lac du Bourget, *Th. Doct.* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CEREVE, 275p.

Humbert J.F., Paolini G., Le Berre B., 2001, Monitoring a toxic cyanobacteria bloom in Lake Bourget (France) and its consequences for water quality, in "*Harmful Algal Bloom 2000*", Hallegraeff G. *et al.* [Eds.], pp 496-499

Oberhaus L., Vinçon-Leite B., Tassin B., Quiblier-Lloberas C., Groleau A., 2003, Influence of physical factors on cyanobacteria development in a deep sub-alpine lake (Lake Bourget), *Journal de Recherche Océanographique*, 28 : 1 – 2

Stroffek S., 1990, Les transferts verticaux de matière et leur modification par les bactéries hétérotrophes fixées sur les particules en sédimentation dans les eaux de surface de deux grands lacs alpins (lac Léman, lac du Bourget), *Th. Doct.* Univ. de Savoie, 235 p.

Vinçon-Leite B., Mouchel J.M., Tassin B., 1989, Modélisation de l'évolution thermique saisonnière du lac du Bourget (Savoie, France). *Rev. Sci. Eau*, 2:483-510

Vinçon-Leite B., 1991, Contribution de la modélisation mathématique à l'étude de la qualité de l'eau dans les lacs sub-alpins : le lac du Bourget (Savoie), *Th. Doct.* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CEREVE, 247 p.

Vinçon-Leite B., Tassin B., Jaquet J.-M., 1995, Contribution of mathematical modeling to lake ecosystem understanding : Lake Bourget (Savoy France), *Hydrobiologia,* 300/301, 433-442

Vinçon-Leite, B., Tassin, B., Bournet,P.E, Groleau A., 1997, First assesment of flood events on the phosphorus cycle in a deep alpine lake : lake Bourget (France), *Verh. Internat. Limnol.*, 26 :403-407.

Vinçon-Leite B., Tassin B., Druart J.-C., 2002, Phytoplankton variability in Lake Bourget : Phytoplankton dynamics and meteorology, *Lakes and Reservoirs Research and Management*, (7) 93-102

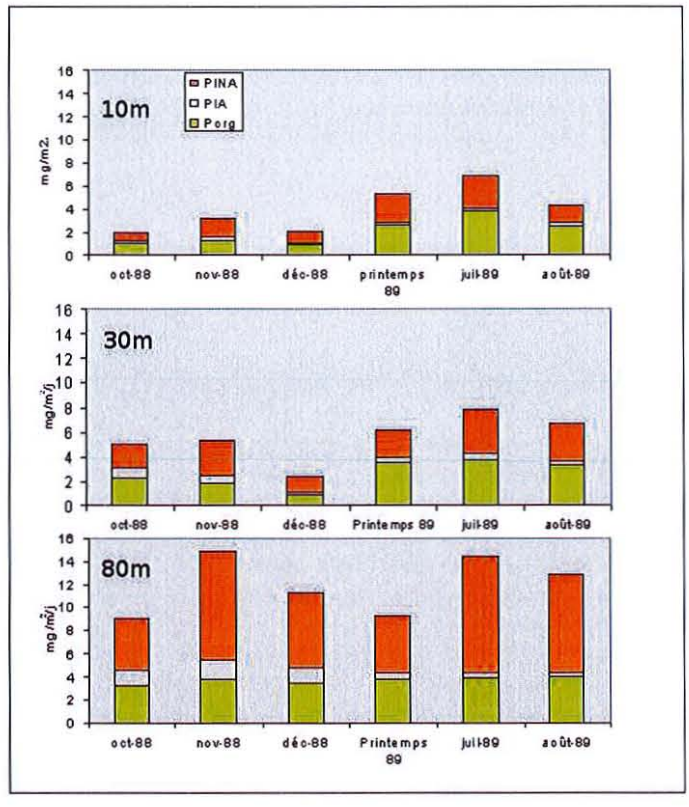


Figure 7. Spéciation du phosphore particulaire dans les trappes à sédiment (1988-1989).

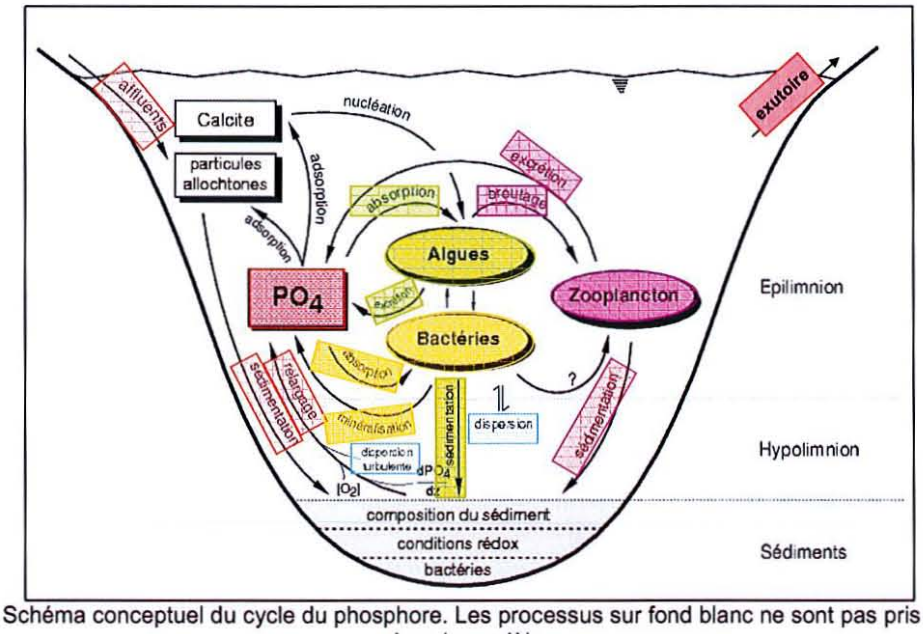


Figure 8. Schéma conceptuel du cycle du phosphore. Les processus sur fond blanc ne sont pas pris en compte dans le modèle

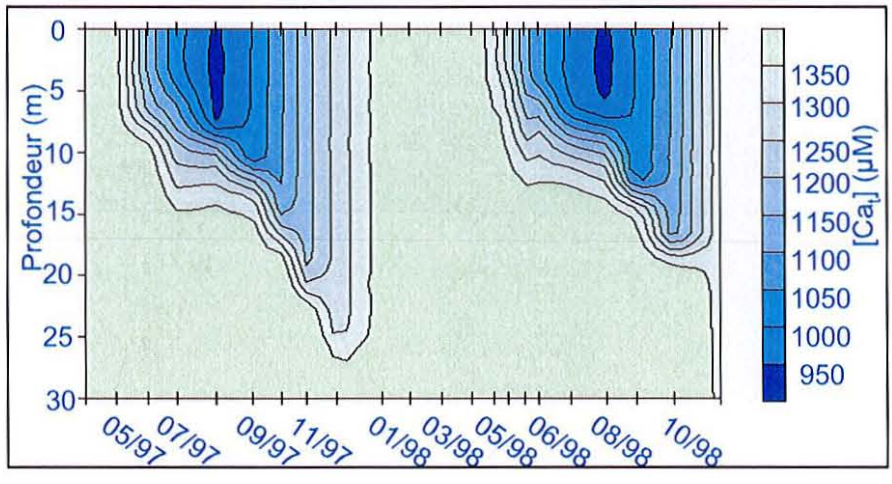


Figure 9. Précipitation de calcite dans le lac du Bourget en 1997-1998 (d'après Groleau et al., 2000).