

AVRIL 2007

Labellisation INRA
PROJET ORE LACS PERI-ALPINS



Labellisation INRA PROJET ORE LACS PERI-ALPINS

Présenté par l'**UMR CARRTEL**
(Centre Alpin de Recherches sur les Réseaux Trophiques des Ecosystèmes Limniques)

INTITULE

Evolution écologique à long terme de lacs profonds péri-alpins :

Quelles dynamiques écologiques sont induites par les variations récentes des forçages environnementaux locaux et globaux?

RESPONSABLE de l'ORE

DORIOZ Jean-Marcel
Directeur de recherche (DR2 INRA)
Directeur de l'unité UMR CARRTEL
INRA – Station d'Hydrobiologie Lacustre
75 avenue de Corzent
74203 Thonon les bains
Courriel : du@thonon.inra.fr

CV en annexe 1

PARTENAIRES ACTUELS

❖ EDYTEM CNRS - Université de Savoie

<http://edytem.univ-savoie.fr/>

❖ Laboratoire de Biologie des protistes CNRS –Université Clermont Ferrand

<http://www.protistes.univ-bpclermont.fr/>

❖ Ecologie Microbienne des Hydrosystèmes Anthropisés CEMAGREF Lyon

<http://www.lyon.cemagref.fr/qe/emha.shtml>

❖ CEREVE ENPC Marne la Vallée

<http://www.enpc.fr/cereve/>

❖ ENTPE LSE Lyon

<http://www.entpe.fr/Dr/Lse/page-recherche-lse.htm>

❖ Laboratoire de géochimie des eaux Université de Paris 7

<http://www.ipgp.jussieu.fr/rech/lge/>

❖ UMR M2C , Université de Rouen

<http://www.univ-rouen.fr/M2C/>

❖ Zone atelier bassin du Rhône (ZABR)

<http://www.graie.org/zabr/>

GROUPE DE TRAVAIL CARTEL

ANNEVILLE Orlane

CHAMPIGNEULE Alexis

GUILLARD Jean

JACQUET Stéphan

MONET Ghislaine

TADONLEKE Rémy

SOMMAIRE

RESUME DU PROJET	6
1. LES OBJETS OBSERVES PAR L'ORE : LE «SYSTEME LAC PROFOND»	11
1.1. Définitions	11
1.2. Les problématiques environnementales associées aux « Lacs profonds » se renouvellent	11
1.3. Trois terrains complémentaires au centre du dispositif ORE : ANNECY, BOURGET, LEMAN	12
1.4. Les limites du système observé	13
1.5. Les services de suivi et d'observation préexistants	14
2. CONTEXTE SCIENTIFIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES ET ENJEUX	16
2.1. Mécanismes de l'eutrophisation	16
2.2. Réoligotrophisation	17
2.3. Changement climatique : conséquences observées et/ou attendues	19
2.4. Conclusion	19
3. OBJECTIFS ET ORGANISATION SCIENTIFIQUE PROPOSEE	22
3.1. Objectif général de l'ORE: un groupe cohérent de questions nécessitant des suivis à moyen et long terme.	22
3.2. Une organisation scientifique en 3 volets complémentaires	24
3.3. volet 1 « limnologie »	25
3.4. Le volet « Processus écologiques »	27
3.5. Volet 3 : Projets associés	36
3.6. Perspectives et ouvertures pour l'ORE	45
4. DISPOSITIFS ET PROTOCOLES D'ACQUISITION DES CHRONIQUES LIMNOLOGIQUES	46
4.1. Grandeurs mesurées dans le volet 1 Limnologie	46
4.2. Grandeurs mesurées spécifiques au « volet 2 »	49
4.3. La Démarche Qualité et la maîtrise de la méthodologie du suivi	51

5. LES BANQUES DE DONNEES	52
5.1. <i>Durée minimum d'observations.....</i>	52
5.2. <i>Base de données et disponibilité de l'information</i>	52
5.3. <i>Autres Base de données « chimie », « algotek » et « baddoc »</i>	54
5.4. <i>Salles de collections.....</i>	55
6. FONCTIONNEMENT BUDGETAIRE ET HUMAIN (PREMIER CADRAGE)	56
6.1. <i>Fonctionnement et équipement.....</i>	56
6.2. <i>Les moyens humains</i>	58
7. FONCTIONNEMENT ET CHARTE DE L'ORE	59
7.1 <i>Préambule.....</i>	59
7.2. <i>Le dispositif opérationnel : comité technique</i>	59
7.5. <i>Droits et Devoirs des Equipes de Recherche Partenaire.....</i>	61
8. INSERTION DANS LES RESEAUX DE RECHERCHE	63
10. CONCLUSION.....	64
11. BIBLIOGRAPHIE	65
ANNEXES	79

RESUME du PROJET

Labellisation INRA de l'observatoire ORE « LACS PERI-ALPINS »,

Présenté par l'UMR CARRTEL (INRA Thonon - Université de Savoie)

INTITULE

Evolution écologique à long terme de grands lacs péri-alpins :

Quelles dynamiques écologiques sont induites par les variations récentes des forçages environnementaux locaux et globaux ?

RESPONSABLE DE L'ORE

DORIOZ Jean-Marcel
DR2 INRA
Directeur de l'UMR CARRTEL
UMR CARRTEL
INRA – Station d'Hydrobiologie Lacustre
75 avenue de Corzent Thonon les bains

Objectif scientifique

Notre objectif est de mettre en place une organisation scientifique de type ORE (*Observatoire de Recherche en Environnement*) dont l'ambition générale est de comprendre, et *in fine* modéliser, l'évolution de l'état et des fonctionnements écologiques de systèmes lacustres soumis simultanément et sur des pas de temps décennaux, à un changement des pressions d'anthropisation locales et au changement global en cours.

L'ORE, intitulé « LACS PERI-ALPINS », s'appuie sur et développe une base de données constituée par des séries chronologiques relatives aux variables limnologiques enregistrées sur les 3 grands lacs alpins français (Annecy, Léman, Bourget) depuis les années 70-80, dans le cadre de suivis opérationnels de la qualité des eaux et des populations piscicoles. Une première valorisation de cette base de données a abouti à des résultats scientifiques reconnus et à des questions de recherche qui structurent ce projet.

Les objets observés

Les 3 lacs profonds des Alpes du Nord constituent les principaux objets observés par l'ORE proposé. Ils fournissent des contextes exemplaires, caractérisés à la fois par un retour plus ou moins rapide et complet à l'état oligotrophe, résultant de progrès dans la gestion environnementale du phosphore et par l'intensification des perturbations directes et indirectes liées à l'anthropisation des milieux (typiquement l'urbanisation du bassin versant et le réchauffement climatique). Ils offrent néanmoins des situations trophiques actuelles contrastées, ce qui rend possible une analyse comparée des trajectoires.

L'organisation scientifique proposée

Nous proposons de transformer les suivis opérationnels existants sur ces 3 lacs en une infrastructure scientifique partenariale, organisant et valorisant des observations à long terme relatives aux dynamiques de changements d'état de ces écosystèmes et à certains des processus écologiques clés pilotant celles-ci.

L'organisation est prévue autour de trois volets complémentaires.

1) Volet 1 « recherches limnologiques » : l'objectif est de comparer et de relier l'évolution à long terme des diverses variables d'état caractérisant les systèmes limniques observés, afin de mettre en évidence les facteurs et processus de contrôle de ces évolutions, au niveau du lac comme de son bassin versant.

Ce questionnement scientifique est tributaire des observations à long terme (> 10 ans) qui constituent la base de données permanente de l'ORE. Cette base reprend et développe les résultats des suivis de qualité des eaux et ressources piscicoles réalisés sur chacun des 3 lacs dans le cadre de contrats de recherche avec les organismes gestionnaires. L'ORE et c'est original, bénéficie dès sa création de chroniques passées décrivant une décennie d'un lac resté à l'état oligotrophe depuis les années 80 (Annecy), le passage à l'état eutrophe dans les années 70-80 des 2 autres écosystèmes observés (Bourget et Léman), puis le début de leur restauration associée au processus de ré-oligotrophisation et interagissant avec le réchauffement des eaux.

Par rapport aux suivis opérationnels, l'ORE ajoute une interprétation de l'ampleur des changements, de leurs facteurs de contrôle au niveau du lac comme de son bassin versant et une analyse des trajectoires du système. Une première interprétation de la dynamique du compartiment planctonique est disponible. L'effort d'interprétation des séries chronologiques prévu sur les 5 années à venir portera sur l'évolution des peuplements de poissons (phénologie....) et sur les transferts bassin-lac (Léman). Nous disposerons ainsi des éléments de base pour une perspective de modélisation d'ensemble du système. Un renforcement des suivis météorologiques et thermiques est envisagé.

Le volet 1 est ouvert au partenariat scientifique et opérationnel (gestionnaires).

2) Volet 2 « processus écologiques » : la dynamique d'état du système (volet 1) met en évidence des fonctionnements et groupes de processus écologiques clés, traduisant la « réorganisation » des systèmes écologiques en réponse à des changements de pression. L'évaluation quantitative de ces processus suppose de s'attacher à des effets plus fins, relatifs à l'évolution de la structure et au fonctionnement de certains compartiments biologiques, ce qui impose des suivis spécifiques.

Toutes les questions ouvertes dans le cadre de la problématique lacs ne sont pas traitées immédiatement. L'interprétation des séries, l'expérience antérieure et les moyens mobilisables à court terme, nous permettent de mettre en priorité pour les 5 prochaines années, l'étude de 2 phénomènes structurants relatifs à des fonctionnements trophiques et biogéochimiques associés à la réoligotrophisation : i) la bio-utilisation du carbone organique dissous d'origine terrestre et ii) la répartition verticale du phosphore dans les eaux du lac.

Le questionnement scientifique du volet 2 est tributaire d'observations à moyen terme (de l'ordre de 5/10 ans) et d'un partenariat scientifique déjà en partie formalisé.

3) Volet 3 « recherches associées » : l'ORE accueillera et suscitera des projets de recherche associés, c'est à dire des recherches ne nécessitant pas forcément un suivi temporel au sens strict mais apportant un éclairage complémentaire sur la dynamique lacustre. Un « site associé » est également retenu: le lac Pavin (lac méromictique). Il s'agit de favoriser les échanges scientifiques et les mises en réseau de compétences.

Plusieurs projets participent actuellement à ce volet. Ils traitent :

- ♦ de **paléolimnologie du récent**, approche qui nous aide à définir des états initiaux et à retracer d'autres types d'évolutions ;
- ♦ des **relations lacs-sédiments** comprenant actuellement des recherches sur la charge polluante des sédiments en fonction du développement urbain et sur la charge interne en P du lac du Bourget.

Ce volet est ouvert et donc susceptible de se compléter rapidement. D'autres recherches associables à l'ORE sont d'ailleurs en cours de construction et seront à valider par le comité scientifique dès sa mise en place :

- ♦ biologie de la conservation de l'omble chevalier ;
- ♦ rôles des évolutions récentes du climat et de l'occupation humaine dans le contrôle de l'état des lacs et de leurs sédiments.

Liens entre les volets

Les trois volets présentés ci dessus sont étroitement liés : le volet 1 fournit le cadrage, les connaissances et les paramétrages des dynamiques macroscopiques dans lesquelles s'inscrivent les processus étudiés dans le volet 2. Réciproquement, les études de processus permettront d'éclairer plus précisément certaines cinétiques et dynamiques des variables d'état, de mieux comprendre le système complexe étudié. De ce point de vue, le recul et les références fournies par les études comparées ou la paléolimnologie du récent (volet 3), compléteront nos interprétations d'ensemble.

Partenaires

L'ORE contribue à la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR)

<http://www.graie.org/zabr/>

La plupart des partenaires actuels de l'ORE constituent d'ores et déjà un réseau informel comme en témoigne les co-encadrement de thèse, les articles et les réponses à des appels d'offre communs.

❖ CARTEL INRA - Univ. de Savoie, Ecologie lacustre et relation bassin versant – lac : porteur du projet global et du volet 1 (collaboration CEREVE), du projet « processus bio-utilisation du C-organique » (collaboration EDYTEM et Université de Rouen)

<http://www.thonon.inra.fr/>

❖ EDYTEM CNRS- Université de Savoie, paléo-environnement : porteur du projet associé paléolimnologie, collaboration volet 2 (bio-utilisation du C-organique).

<http://edytem.univ-savoie.fr/>

❖ Laboratoire de Biologie des protistes CNRS –Université Clermont Ferrand: rapprochement à construire sur la base des nombreuses collaborations existantes.

<http://www.protistes.univ-bpclermont.fr/>

❖ Ecologie Microbienne des Hydrosystèmes Anthropisés CEMAGREF Lyon : contribution au volet 2 processus, bio-utilisation du C-organique.

<http://www.lyon.cemagref.fr/qe/emha.shtml>

❖ CEREVE ENPC Marne la Vallée : hydrodynamique, limnologie physique, porteur d'un projet sur les processus de redistribution du P dans la colonne d'eau (volet 2) ; contribution au volet 1 et au projet associé contamination sédiment.

<http://www.enpc.fr/cereve/>

❖ ENTPE LSE Lyon : hydrologie urbaine et sédimentologie ; porteur d'un projet associé (Lacs et ville, contamination sédiment).

<http://www.entpe.fr/Dr/Lse/page-recherche-lse.htm>

❖ Laboratoire de géochimie des eaux Université de Paris 7 : porteur d'un projet associé sur la charge interne du lac du Bourget ; participe au volet 2.

<http://www.ipgp.jussieu.fr/rech/lge/>

❖ UMR M2C , Université de Rouen : sédimentologie, érosion ; participe au volet 2 projet processus, bio-utilisation du C-organique.

<http://www.univ-rouen.fr/M2C/>

PROJET ORE « LACS PERI-ALPINS »

Pourquoi un ORE « Lacs péri-alpins »?

Notre objectif est de mettre en place une infrastructure de type ORE pour traiter de questions scientifiques relatives à la dynamique, face aux changements récents des pressions anthropiques (locales) et climatiques (globales), des écosystèmes lacustres de type « lacs profonds péri-alpins ». Cet objectif général suppose des suivis de longue durée. Les objets observés sont les 3 plus grands lacs profonds des Alpes du Nord françaises.

Le choix d'engager une telle démarche se justifie par :

- ❖ la volonté de faire évoluer nos dispositifs actuels de suivis des lacs péri -alpins, vers un observatoire formel, structurant des recherches en partenariat sur les réactions à long terme des systèmes lacustres aux changements environnementaux ; des séries chronologiques déjà disponibles existent et décrivent l'évolution d'état de ces lacs et de leurs bassins versants depuis 10 à 40 ans selon les cas; une première interprétation de ses séries concernant les biocénoses planctoniques et leur sensibilité aux pressions anthropiques confirme la pertinence d'approches longue durée pour comprendre le fonctionnement des lacs;

- ❖ les enjeux scientifiques de l'écologie systémique ; les lacs représentent des modèles de terrain pertinents pour aborder certaines des grandes questions de l'écologie, notamment les questions relatives aux cycles biogéochimiques, à la biodiversité et à son rôle fonctionnel et aux relations écosystèmes terrestres (bassin versant) - écosystèmes aquatiques;

- ❖ un besoin de conceptualiser des connaissances opérationnelles sur les relations de cause à effet impliquées dans les dynamiques de changement d'état de ces systèmes, pour contribuer aux réflexions sur la durabilité des ressources naturelles associées aux lacs.

Il s'agit aussi de mettre en place un réseau de partenariats autour de ces enjeux scientifiques dont l'ambition sera, à terme, d'aborder un certain nombre de thématiques actuellement insuffisamment représentées et d'évoluer progressivement vers des approches plus intégrées.

Les enjeux de recherche et les questions finalisées et fondamentales associées aux objets lacs seront exposés dans un chapitre 2 intitulé « contexte scientifique de l'ORE ». Les « objets observés » auront été présentés au préalable (chapitre 1). Les objectifs détaillés et l'organisation scientifique proposée en 3 volets seront ensuite développés (chapitre 3). Enfin les protocoles, les bases de données et les aspects matériels et humains seront présentés, respectivement, aux chapitres 4, 5 et 6.

1. LES OBJETS OBSERVES : LE SYSTEME LAC PROFOND PERI-ALPIN

1.1. Définitions

L'écosystème « lac profond » : ces lacs sont caractérisés par une profondeur et une taille qui leur confèrent certaines propriétés physiques cruciales pour la dynamique générale du système dont la monomicticité (Pourriot et Meybeck, 1995). La zone pélagique est dominante, le volume disponible permet une grande hétérogénéité des habitats, des masses d'eau, une stratification thermique, un renouvellement total ou partiel des eaux de fond, des modalités spécifiques d'échanges avec les sédiments, etc. Un grand volume n'est pas synonyme pour autant d'allongement des chaînes trophiques, la grande dimension de l'habitat ne se traduisant pas forcément par une plus grande diversité (Dodson *et al.*, 2000). Le statut trophique intervient de manière prépondérante dans le fonctionnement écologique de ces lacs. La pollution par les xénobiotiques et le réchauffement des eaux viennent accroître la complexité de ce fonctionnement, en perturbant potentiellement les relations entre biodiversité et dynamique des flux.

Les relations lac-bassins versants sont multiples et réciproques. Premièrement, la qualité des eaux d'un lac dépend très étroitement du fonctionnement passé et actuel de son bassin. Les flux de nutriments/polluants apportés par les affluents ont des effets plus ou moins immédiats et constituent la « charge externe ». Le temps de séjour de l'eau se traduit parfois par une inertie importante qui peut ralentir autant les effets des apports de polluants, que les améliorations du système liées à la réduction de ceux-ci. Les flux des tributaires alimentent aussi les stocks benthiques et peuvent donc avoir des effets différés quand ces stocks sont réactivés par divers facteurs environnementaux (« charge interne »).

D'autres « pressions » anthropiques s'exercent directement sur les plans d'eau (aménagements physiques, exploitations du peuplement piscicole) et il existe aussi d'autres échanges lac - bassin (migrations de poissons). Par ailleurs, la présence d'un lac est un facteur supplémentaire d'anthropisation du bassin versant, ce qui entraîne un accroissement des risques de pollution. Les politiques de maîtrise des pollutions alors mises en place constituent des contraintes en retour sur le développement du territoire bassin versant.

L'unité géographique lac– bassin versant, nommée parfois « système lacustre », est donc une entité fonctionnelle. Elle constitue un cadre de référence pour la gestion et la compréhension des évolutions à long terme des milieux aquatiques. Les objectifs de l'ORE sont étroitement liés à ce cadre sans pour autant prétendre en couvrir tout les champs.

1.2. Les problématiques environnementales associées aux lacs péri-alpins se renouvellent

La plupart des lacs situés dans des zones à fort développement économique subissent à partir des années 60, des pollutions multiples. La pollution par le phosphore tient une place particulière: elle est en effet responsable de désordres connus sous le vocable d'**eutrophisation** (Vollenweider, 1968 et 1975). Les nuisances associées sont celles d'une pollution organique (proliférations phytoplanctoniques, doublées parfois de contaminations du milieu par des toxines algales, etc.). L'eutrophisation ne concerne pas uniquement les lacs, tous les hydrosystèmes anthropisés peuvent être affectés et le phénomène représente un type d'évolution, qualifié d'universel, dès les années 70, par Vollenweider (1968; 1975).

La lente prise de conscience des problèmes environnementaux, de la nécessaire protection des milieux et de la biodiversité, du caractère limité des ressources en eau et du rôle économique croissant des lacs, ont abouti dans les années 70/80, à l'adoption, dans les pays développés, de mesures de correction de l'eutrophisation (Barroin, 2001; Dorioz et Blanc, 2001).

Les premiers résultats de ces mesures se sont manifestés avec des réductions de concentrations de phosphore, assez spectaculaires dans le cas de nos lacs alpins (on parle de réoligotrophisation), beaucoup moins évidentes pour d'autres situations. Cependant, même dans les cas les plus favorables, l'évolution de l'état biologique n'est pas toujours en phase avec celle de l'état chimique (Feuillade, 1994). Cette divergence entre qualité chimique et biologique, est d'autant plus problématique que des efforts pour retourner à un état « originel » sont promus à l'échelle internationale (cf en particulier la Directive Cadre Européenne sur l'Eau) et sont discutés localement en terme de rentabilité des investissements faits et à faire. Parallèlement l'impact d'autres types de pollutions (polluants émergents, micropolluants organiques, pesticides,...) cesse d'être négligeable pour parfois remettre en cause la qualité des eaux et des ressources associées. Cette émergence suscite de nouvelles inquiétudes.

La **réoligotrophisation** des systèmes lacustres s'accompagne donc d'un renouveau de la problématique et des enjeux relatifs à ces milieux. Les débats sociétaux qui émergent interrogent nos connaissances et nos modèles sur la dynamique globale et la gestion de ces systèmes complexes. Les questions relatives à la qualité des eaux des lacs profonds alpins (usages récréatifs et/ou eau potable) et à la pêche, trouvent une résonance particulière auprès du public. Une interrogation nouvellement récurrente concerne l'impact potentiel des changements en cours et annoncés, en particulier des changements climatiques. **Ces nouvelles pressions s'exerçant sur des lacs en cours de réhabilitation, pourraient-elles, à terme, être susceptibles de modifier, voire de remettre en cause les acquis obtenus par la lutte contre l'eutrophisation en terme de qualité des eaux ?** Actuellement, faute de connaissances suffisantes sur les dynamiques et les processus clés, nos réponses à ces questions restent fragmentaires.

1.3. Trois terrains complémentaires au centre du dispositif ORE : ANNECY, BOURGET, LEMAN

Notre dispositif ORE est axé sur des suivis à long terme des lacs Léman, d'Annecy et du Bourget. Ces 3 lacs subalpins français entrent parfaitement dans la problématique et le questionnement énoncés précédemment tout en présentant chacun des caractéristiques spécifiques (temps de séjour, anthropisation, géographie du bassin versant,...)

❖ Le **lac d'Annecy** a été préservé de l'eutrophisation. Il constitue l'exemple de ce que devrait être à nouveau l'état trophique de tous les lacs alpins quand les programmes de restauration auront porté leurs fruits. Actuellement, le lac satisfait tous les usages: ressource en eau potable, tourisme et paysage, production piscicole. Un dossier de classement UNESCO est en cours. Une étude pluridisciplinaire du fonctionnement trophique du lac a permis de montrer que les transferts trophiques sont optimaux dans ce lac avec une contribution importante de la boucle microbienne, une diversité spécifique et une qualité nutritionnelle planctonique excellente. Néanmoins à terme, si la baisse des teneurs en phosphore des eaux se maintient, les conditions trophiques de la production piscicole pourraient être réduites.

❖ **Le Léman et le Bourget** sont des lacs en cours de restauration et considérés à l'état actuel comme mésotrophes. Les gestionnaires s'inquiètent cependant de la lenteur de la baisse de la teneur en P de ces lacs, de la restauration des paramètres biologiques et de l'effet du réchauffement moyen des eaux sur ces processus (Anneville et Pelletier, 2000 ; Anneville, 2001). Les proliférations de cyanobactéries préoccupent particulièrement les gestionnaires du Bourget en raison des impacts négatifs sur l'image et les usages de ce lac (Humbert, 2001 ; Dorigo *et al.*, 2006 ; Jacquet *et al.*, 2005). Les interrogations portent aussi sur les effets de l'urbanisation croissante des bassins versants, sur le rôle de la charge interne (travaux du LSE-ENTPE, du LGE Paris 7 et du CEREVE-ENPC) et localement sur les teneurs en micropolluants (PCB, lac du Bourget) et pesticides (Léman).

Les 3 sites offrent donc des situations différentes en terme de qualité des eaux et d'état de l'écosystème, en dépit de leur proximité géographique et la parenté de leurs environnements physiques et humains (même éco-région et contexte de développement selon Cristofini *et al.*, 1994). Il s'agit en particulier de lacs dont les bassins sont de longue date anthropisés (travaux paléoenvironnement du CNRS-EDYTEM et projet « Climasilac ») et qui sont soumis actuellement à un double mouvement de pressions anthropiques :

- ♦ baisse progressive de la charge externe en nutriments (réoligotrophisation suivant une phase d'eutrophisation, pour le Léman et le Bourget);
- ♦ accentuation d'autres pressions locales (urbanisation des bassins versants) et globales (en particulier le réchauffement des eaux).

Ce contexte est à la fois représentatif de la problématique générale des grands lacs profonds et original par le fait que le **réchauffement s'applique notamment sur des systèmes en voie de réoligotrophisation**.

1.4. Les limites du système observé par l'ORE

Notre ambition n'est pas de proposer dans l'immédiat une étude systémique complète de l'entité lac-bassin versant, englobant les phénomènes biophysiques, les activités humaines et les logiques d'acteurs qui les sous-tendent. Ce type de recherche relève plus du concept de « zone atelier » et pourrait être envisagé ultérieurement dans le cadre de la ZABR (*Zone Atelier du Bassin du Rhône*) ainsi que de collaborations notamment avec des géographes. Notre objet de recherche actuel est plus limité : il comprend l'**écosystème lacustre et son bassin versant**, mais cette composante terrestre sera vue comme un simple système physique de transfert de polluants et de nutriments, produisant une charge externe. Les déterminismes socio-économiques associés seront considérés comme des variables externes, au même titre que la pêche ou le climat.

Un point de vue similaire est adopté en ce qui concerne les **zones benthique et littorale** : faute de moyens et de thématiques déjà disponibles sur les lacs de référence, la contribution de ces zones sera surtout pris en compte à travers les flux de nutriments qu'elles génèrent (la construction d'un partenariat sur ce thème sera une priorité dès le début de l'ORE).

En ce qui concerne les limites temporelles, le recul disponible en terme de suivis antérieurs fixe l'état de référence vers les années 60. Un recul complémentaire est possible grâce aux données paléolimnologiques du récent.

1.5. Les services de suivi et d'observation préexistants

Trois suivis limnologiques indépendants, impliquant fortement la Station d'Hydrobiologie Lacustre INRA de Thonon, puis plus largement l'UMR CARTEEL, sont déjà en place sur les 3 grands lacs observés (Fig. 1). Ils font tous les trois l'objet de **contrats de recherche** donnant lieu à des rapports validés par des comités scientifiques.

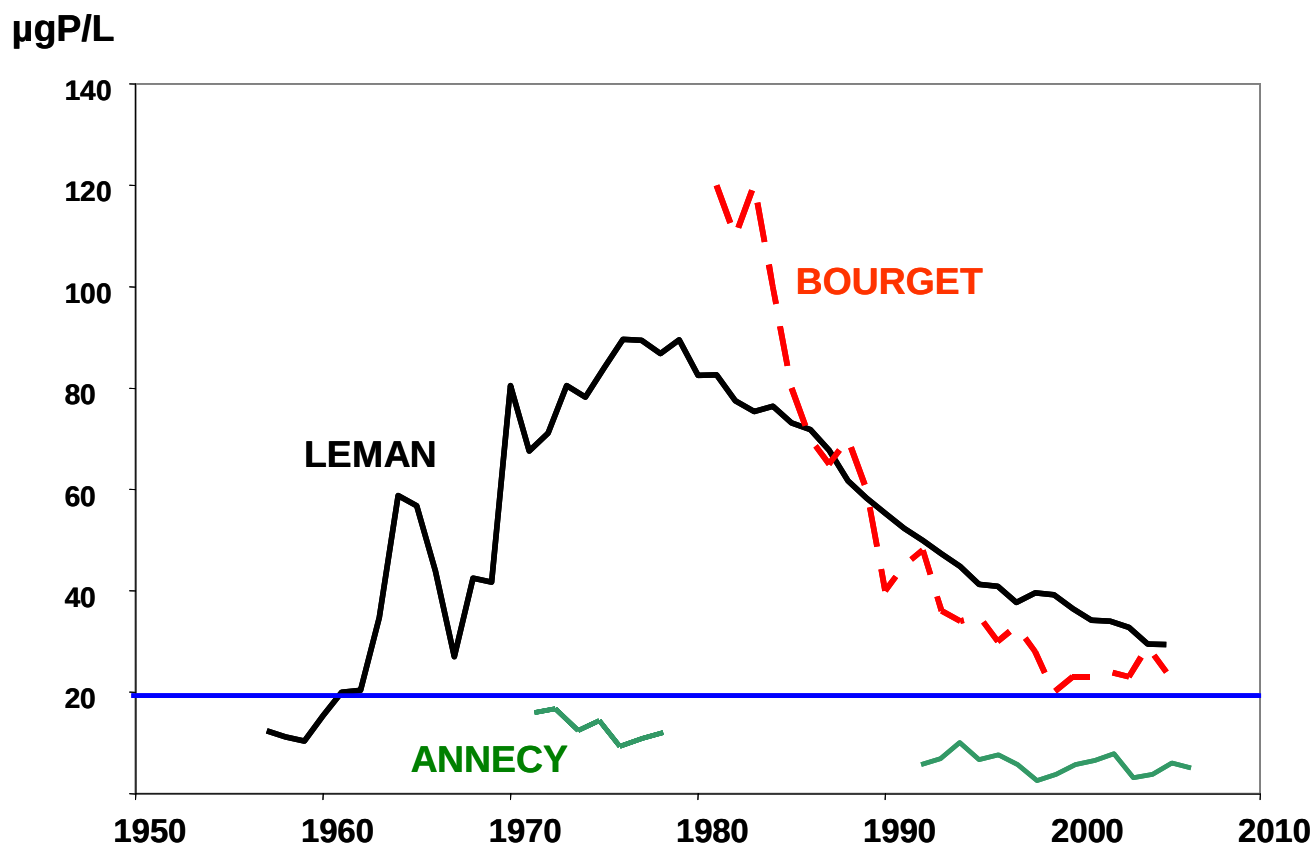


Figure 1 : Evolution des moyennes annuelles de concentration en phosphore des 3 grands lacs subalpins de l'ORE

1.5.1. Le Léman: un suivi ancien, ciblé sur la dynamique des nutriments, du plancton et de la charge externe (responsable scientifique : D. Gerdeaux, DR INRA)

Le Léman fait l'objet d'un suivi continu et international qui s'est structuré progressivement depuis 1957 (Lazzarotto, 2005), en réponse à la pollution grandissante des eaux due à l'anthropisation du bassin versant. Au fil des années et avec de nouvelles possibilités analytiques, le nombre de paramètres mesurés et analysés augmente. A la chimie classique et à l'étude du plancton (phyto et zoo) s'ajoutent les micropolluants, les compartiments microbiens, etc. La zone d'étude s'élargit, avec des mesures sur le bassin versant et une attention particulière au fond du lac, siège du phénomène de re-largage du phosphore. Ce suivi est réalisé pour une large part par l'INRA (suivi chimique et biologique de la principale station de mesure SHL2), au bénéfice et sous l'égide de la **CIPEL (Commission Internationale pour la de Protection des Eaux du Léman)**. Chaque année un rapport complet est publié.

Au niveau du lac les principales grandeurs mesurées sont :

- ❖ les caractéristiques limnologiques de base avec des prélèvements ponctuels de 0 à 309 m lors de 20 campagnes annuelles depuis 1957. Les données suivantes sont mesurées : physico-chimie, phyto - et zooplancton, production primaire, chlorophylle *a* et depuis une dizaine d'année des profils avec une sonde multiparamètres de la colonne d'eau ainsi que la production bactérienne) ;
- ❖ la contamination des eaux, de certains poissons et des moules zébrées (en 8 points du lac) par des micropolluants sur la base de mesures biannuelles (métaux dits lourds et micropolluants organiques depuis 1980) ;
- ❖ les statistiques de captures annuelles ou mensuelles de poissons, éléments de la dynamique des populations de corégones (*Coregonus lavaretus*), ombles (*Salvelinus alpinus*), truites (*Salmo trutta*) et perches (*Perca fluviatilis*) ainsi que le régime alimentaire du corégone est également suivi ; l'impact du pacage lacustre sur l'omble chevalier est suivi (repeuplement en juvéniles de salmonidés lacustres) ;
- ❖ les apports au lac par les 6 principaux affluents (charge externe en nutriments sur la base d'échantillons moyens proportionnels aux débits depuis 1980).

Les détails des protocoles sont présentés paragraphe 4 (Tableau 3). Un rapport annuel est publié par la CIPEL : <http://www.cipel.org/>.

1.5.2. Le lac d'Annecy : un suivi des paramètres physico-chimiques et du plancton (responsable scientifique : D. Gerdeaux, DR INRA)

Bien que le lac d'Annecy ait bénéficié dès les années 70 d'une protection contre l'eutrophisation, les collectivités locales restent attentives et assurent un suivi des principaux paramètres physico-chimiques et de la dynamique du compartiment planctonique (phyto et zooplancton) en collaboration avec la Station INRA de Thonon. Les données disponibles sur le lac d'Annecy débutent en 1967 par la détermination et le comptage du zooplancton. De 1977 à 1986 la série a été interrompue pour être reprise conformément à celles collectées sur le Léman depuis 1987. D'autres acquisitions de données sont venues au cours du temps, rendant comparables les données obtenues sur Annecy et sur le Léman (programme d'auscultation du lac). Depuis 18 ans, la dynamique des principales espèces de poissons est étudiée. Le pacage lacustre de l'omble chevalier est étudié par marquage de tous les alevins déversés en 1997, 2000, 2007. Un rapport annuel est publié par le SILA (Syndicat Mixte du Lac d'Annecy : <http://www.sila.fr/>)

1.5.3. Le lac du Bourget : un suivi actualisé (responsable scientifique : S. Jacquet, CR INRA)

A partir des années 1970, de grands travaux sont réalisés par les communes du bassin versant du lac du Bourget afin de maîtriser l'eutrophisation : construction et modernisation de stations d'épuration, rejet des eaux traitées dans le Rhône au moyen d'une galerie percée dans la montagne du Chat, déphosphatation des effluents. Ces mesures sont désormais associées à un projet de développement durable « Grand lac » dont le premier volet s'achèvera en 2009.

La Cellule Technique du Lac du Bourget est chargée entre 1980 et 2006 d'un suivi de base des principaux paramètres physico-chimiques et limnologiques (température, transparence, oxygène, azote, phosphore, chlorophylle *a*, avec un pas d'échantillonnage bi-mensuel, en période estivale). A l'instigation du CEREVE, pendant les années 1988-89, 1995-96 et 2004-05 le suivi est renforcé par la mesure des paramètres chimiques et biologiques et donne lieu à un rapport complet sur l'état de « santé » du lac. Depuis 1999, l'UMR CARRTEL participe à cette évaluation et porte une

attention particulière à la prolifération d'une cyanobactérie filamenteuse toxique *Planktothrix rubescens* et à la structure et au fonctionnement de la boucle microbienne lacustre. A partir de 2007 le suivi du lac du Bourget s'aligne sur les suivis des 2 autres lacs de l'ORE et fait l'objet d'un rapport annuel équivalent à ceux des autres lacs, publié par le **CISALB (Comité Intercommunal pour le suivi et l'assainissement du lac du Bourget : <http://www.agglo-lacdubourget.fr/france/DT1155302567/page/CISALB.html>)**

Les suivis du compartiment poissons sont principalement focalisés sur deux espèces cibles, l'omble chevalier et le corégone, soumises au pacage lacustre (repeuplement de soutien en juvéniles d'origine locale). Plusieurs campagnes de marquage ont été réalisées afin d'évaluer la contribution relative du recrutement naturel et du repeuplement en phase eutrophe (Champigneulle *et al.*, 2001). De nouvelles opérations se développent actuellement dans le contexte du Contrat Grand Lac en relation avec le CISALB. Ces opérations permettront de suivre la dynamique de contribution du recrutement naturel au cours de la phase de réoligotrophisation ainsi que les évolutions des structures d'âge et de la croissance. Ces données ont pour objectif d'optimiser la gestion piscicole des populations d'omble et de corégone dans le nouveau contexte trophique et thermique tout en intégrant les évolutions du peuplement piscicole dans son ensemble.

2. CONTEXTE SCIENTIFIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES ET ENJEUX

2.1. Mécanismes de l'eutrophisation

Les désordres écologiques induits par l'eutrophisation ont fait l'objet de nombreuses recherches (Vollenweider, 1968; Barroin, 1987; Sas, 1989) qui restent d'actualité dans tous les pays en cours de développement (en 2006, « Hydrobiologia » « Eutrophication in Lakes », consacré aux recherches en Chine). Les mécanismes des perturbations biogéochimiques associés à l'eutrophisation sont assez bien connus. Il en est de même pour les conséquences sur la qualité des eaux, la productivité et les réactions des diverses communautés biologiques. La relation phosphore - état trophique - qualité des eaux (transparence) est de ce fait traduite en modèles qui sont souvent transposées en outils opérationnels pour raisonner la restauration des lacs et plan d'eau (Barroin, 1987). Le plus utilisé est le modèle à base statistique de Vollenweider (1968 ; 1975).

En terme de dynamique du phytoplancton les systèmes en voie d'eutrophisation évoluent d'une communauté phytoplanctonique riche en espèces caractérisant l'état oligotrophe, vers à l'extrême, une communauté peu diversifiée, avec fréquemment des développements massifs d'une espèce ou d'un nombre limité d'espèces. On parle alors de « fleur d'eau » ou « bloom » (Smayda, 1997). Si l'apparition de ces phénomènes est avant tout liée à l'augmentation des concentrations en phosphore, d'autres facteurs interviennent pour influencer la composition spécifique de ces proliférations algales et les problèmes liés à leurs potentialités toxiques (Briand *et al.*, 2005).

Les modifications physico-chimiques du milieu résultant de l'accroissement de la biomasse algale, ne sont pas sans influencer les autres composantes de l'écosystème. L'enrichissement des sédiments benthiques en matière organique et les conditions anoxiques affecte la survie des œufs de salmonidés et de corégonidés, provoquant une forte baisse du recrutement naturel, voire la disparition de ces familles de poissons (Gillet, 2001).

L'enrichissement en phosphore d'un plan d'eau s'accompagne en fait d'une **évolution physico-chimique et biocénétique globale** conduisant à une modification de la productivité, de la biomasse et de sa vitesse de renouvellement. Les réajustements structurels survenant dans les différents échelons du réseau trophique (Jorgensen et De Bernardi, 1998) sont à l'origine de ces évolutions. Ils modifient la nature et l'intensité des mécanismes régulateurs et tendent à pousser le système vers un état caractérisé par une désorganisation des flux de matière/énergie.

Ces premiers éléments de réflexion soulignent l'intérêt des systèmes lacustres pour les recherches sur les mécanismes de propagation des perturbations dans les écosystèmes et pour appréhender le rôle de la biodiversité.

2.2. Réoligotrophisation

Si l'eutrophisation des lacs est largement décrite, le processus de réoligotrophisation reste débattu. De fait les situations sont très contrastées. Pour certains lacs, les mesures de sauvegarde drastiques ayant été prises pour maîtriser les pollutions ponctuelles bien avant que la situation ne soit critique, les résultats sont à la hauteur de l'attente. C'est le cas du lac d'Annecy, soustrait pour l'essentiel de sa charge externe en phosphore par un collecteur périphérique construit dans les années 60. Mais plus généralement les mesures de diète phosphorée ont été soit tardives mais relativement sévères (collecteur du Lac du Bourget qui exporte les flux hors du bassin du lac et donc réduit considérablement et brutalement la charge externe), soit progressives et limitées (cas du lac Léman dont les eaux traitées au niveau des stations d'épuration équipées de dispositifs de déphosphatation se déversent toujours dans le lac ou ses affluents).

Quelque soit la situation, il est déjà bien établi que le processus de réoligotrophisation est un phénomène lent et qu'il ne consiste pas en un simple retour à l'état initial (SAS, 1989 ; Vinçon-Leite, 1991 ; Feuillade *et al.*, 1994). Récemment, une étude comparée dans le cadre d'un workshop sur la réoligotrophisation a permis de dégager un schéma type (Jeppesen *et al.*, 2005). En ce qui concerne les concentrations en phosphore, un nouvel état d'équilibre est généralement atteint au bout de 10 à 15 ans. La restructuration des communautés phytoplanctoniques se caractérise alors par la disparition des cyanobactéries et la réapparition de taxons indicateurs de milieux oligo-mésotrophes. La baisse des concentrations en phosphore et l'augmentation du broutage par le zooplancton entrent en synergie pour contrôler la production phytoplanctonique et l'augmentation de la transparence permet l'extension des herbiers de macrophytes. Dans le Léman et le Bourget, le compartiment phytoplanctonique, source de désagréments vis-à-vis des utilisateurs, répond lentement aux baisses des concentrations en phosphore des eaux des lacs (Anneville et Pelletier, 2000, Jacquet *et al.*, 2005). Cette « résistance » de l'écosystème détermine un effet d'hystérésis Phosphore-phytoplancton qui s'explique en partie par des « réadaptations » structurelles du système et une inertie dans l'efficacité des transferts de la matière organique entre niveaux trophiques (Jorgensen et De Bernardi, 1998). Dans les lacs profonds stratifiés en été, la disponibilité du phosphore est en outre affectée par une variabilité spatiale importante qui influe sur la nature et l'intensité des mécanismes mis en jeu lors de sa remobilisation dans la couche euphotique et son incorporation dans le réseau trophique. Lors de la réoligotrophisation, l'élimination estivale du P dans l'épilimnion s'accroît et la couche de surface appauvrie en P augmente et finit par s'étendre au-delà la zone euphotique (Anneville *et al.*, 2002). Ces mécanismes sont encore peu compris.

En passant du stade eutrophe ou stade mésotrophe, le **peuplement piscicole** du Léman évolue d'un peuplement dominé par les cyprinidés, puis par les percidés, à un peuplement où l'espèce majoritaire est le corégone. Les modifications survenant dans la communauté piscicole se caractérisent par un accroissement des corégonidés et de certains poissons piscivores tel le brochet, alors favorisés par le redéveloppement des herbiers à characées. Dans les années à venir, il devrait normalement évoluer vers un peuplement dominé par les salmonidés si le processus de réoligotrophisation se poursuit (Gerdeaux *et al.*, 2006). Toutefois, gestionnaires comme scientifiques s'interrogent, sur les risques de baisse à long terme de la productivité piscicole, conséquence de la réduction de la teneur en phosphore. Par exemple, dans le cas de la perche au Léman, la réoligotrophisation s'accompagne d'une baisse de la croissance et d'un accroissement des mortalités aux stades juvéniles, comme cela est décrit pour le lac de Constance (Eckmann *et al.* 2006).

Dans ce contexte, le **carbone organique** dissous pourrait se substituer au P, devenant un facteur trophique opérant grâce à la boucle microbienne, avec des répercussions soupçonnées au niveau de la production piscicole au sens large. Cette contribution des apports de matière organique d'origine terrestre aux réseaux trophiques, soutenant une part significative de la production secondaire et piscicole de ces écosystèmes est mentionnée par Carpenter *et al.* (2005). Pour Jansson *et al.* (2000), c'est la structure des communautés qui peut être modifiée par ces apports. Les études relatives à l'impact fonctionnel des apports d'origine terrestre aux écosystèmes lacustres sont essentiellement centrées sur les lacs peu profonds des boucliers scandinaves et nord-américains. Les connaissances sont encore limitées en ce qui concerne les lacs profonds.

Quelque soit le type de lac, l'intégration dans les réseaux trophiques de ces apports terrestres est partiellement contrôlée par leur biodisponibilité potentielle. La Matière Organique d'origine autochtone, liée à l'excrétion phytoplanctonique ou à la lyse virale, est considérée comme rapidement assimilable. La matière organique terrestre est un ensemble complexe de molécules plus ou moins humifiées qui serait moins rentable pour la croissance bactérienne. Des études récentes montrent que la contribution des apports d'origine terrestre aux réseaux trophiques lacustres n'est dépendante ni de la quantité de ces apports du bassin versant aux lacs, ni du statut trophique du lac même, mais surtout des aspects composition-qualité. Dans d'autres cas c'est le P dissous présent dans les eaux qui limitent la bio-utilisation du COD terrestre, le rapport C/P étant trop élevé.

Tous ces schémas d'évolution doivent être considérés avec précaution. La trajectoire d'état du lac peut en effet diverger (Jeppessen *et al.*, 2005) selon les événements météorologiques et les particularités locales. Ainsi la persistance d'importants apports diffus de P provenant du bassin versant et/ou l'existence d'une charge interne (flux d'origine benthique) non négligeable tendraient à stabiliser l'écosystème lacustre dans un état eutrophe (Carpenter, 2005). La lenteur des processus de restauration peut aussi être imputée à d'autres facteurs. Le temps de retour d'un écosystème après une perturbation est parfois influencé par la longueur de la chaîne trophique (Carpenter et Cottingham, 1997). La tendance au réchauffement des eaux n'est pas non plus sans effet (Nöges *et al.*, 2000). Les travaux menés sur le Léman dans le cadre d'une thèse INRA, suggèrent que le réchauffement contribue au maintien des biomasses phytoplanctoniques anormalement élevées, malgré la baisse de P. L'existence de réajustements structurels spécifiques survenant dans la communauté phytoplanctonique explique le maintien de cette biomasse (Anneville *et al.*, 2002). Les réajustements structurels et phénologiques surviennent aussi dans d'autres échelons du réseau trophique (Gillet et Quétin, 2005).

2.3. Changement climatique: conséquences observées et/ou attendues

Les diverses recherches menées sur les séries chronologiques des lacs européens permettent de mesurer une augmentation des températures de l'eau dans les couches profondes (Dokulil *et al.*, 2006) et des fluctuations inter-annuelles des couches superficielles corrélées à des phénomènes météorologiques de grande échelle comme l'Oscillation Nord Atlantique (Straile *et al.*, 2003). Molinero *et al.*, (sous presse) montrent la saisonnalité des sources principales du forçage climatique sur les conditions thermiques du Léman et notamment le rôle du climat de l'Atlantique subtropical sur les fluctuations inter-annuelles estivales. Ces forçages macroscopiques ont de fortes conséquences sur la dynamique des écosystèmes et semblent favoriser le développement d'algues filamenteuses et retarder la réponse à la baisse du phosphore (Jacquet *et al.*, 2005 ; Jeppesen *et al.*, 2005).

Jusqu'à présent, les travaux sur le plancton dans les grands lacs sub-alpins étaient essentiellement centrés sur les organismes autotrophes « de grande taille » (du nanoplancton au microplancton) et « négligeaient » les autres communautés microbiennes présentes et notamment les organismes impliqués dans la « boucle microbienne » (communautés virales, bactériennes, picophytoplancton et protistes). Leur rôle est pourtant significatif dans la minéralisation et la production de la matière organique à la base des chaînes trophiques (Jardillier *et al.*, 2005). Face à la restauration des grands lacs et dans le contexte du réchauffement des eaux de surface, nous nous attendons à ce que les communautés picophytoplanctoniques contribuent de plus en plus significativement à la biomasse et à la production primaire phytoplanctonique. D'autres lacs profonds de l'arc alpin, le lac d'Annecy (France), le lac Majeur (Italie) sont de bons exemples de telles situations.

Les impacts des changements climatiques enregistrés sur le Léman (Anneville *et al.*, 2002) sont également constatés sur le lac du Bourget (Jacquet *et al.*, 2005) en particulier un démarrage précoce du phytoplancton (2 à 4 semaines d'avance). Sur le lac Léman, la phénologie des espèces piscicoles est modifiée, en particulier les dates de pontes de certaines espèces (Gillet et Quélin, 2006), avec notamment une reproduction retardée des corégonidés. Les larves et juvéniles de ces espèces profitent alors de conditions de nourrissage meilleures qu'auparavant. Cette dynamique favorable à la productivité piscicole pourrait être remise en cause avec le retour complet à l'oligotrophie. Mais, si le réchauffement se poursuit, les poissons tels que l'omble puis le corégone qui recherchent une eau de température inférieure à 7°C pour réaliser leurs pontes, seront pénalisés. Les cyprinidés pouvant s'adapter à des eaux plus chaudes que les percidés, le réchauffement climatique pourrait à long terme, induire une nouvelle évolution du peuplement piscicole vers un peuplement à cyprinidés dominant comparable à celui observé il y a 25 ans, en phase d'eutrophisation dans le Léman et le Bourget. En outre des espèces envahissantes pourraient profiter du réchauffement pour se développer en abondance comme ce fut le cas pour le poisson chat au Bourget en 2003.

2.4. Conclusion

Les objets observés par l'ORE sont les écosystèmes constitués par les trois grands lacs profonds des Alpes, dans le contexte de leurs environnements bio-physiques.

Le renouvellement de la problématique sociétale liée à ces lacs, l'ensemble des questions finalisées sur les réactions de ces systèmes types face aux nouvelles pressions humaines, le

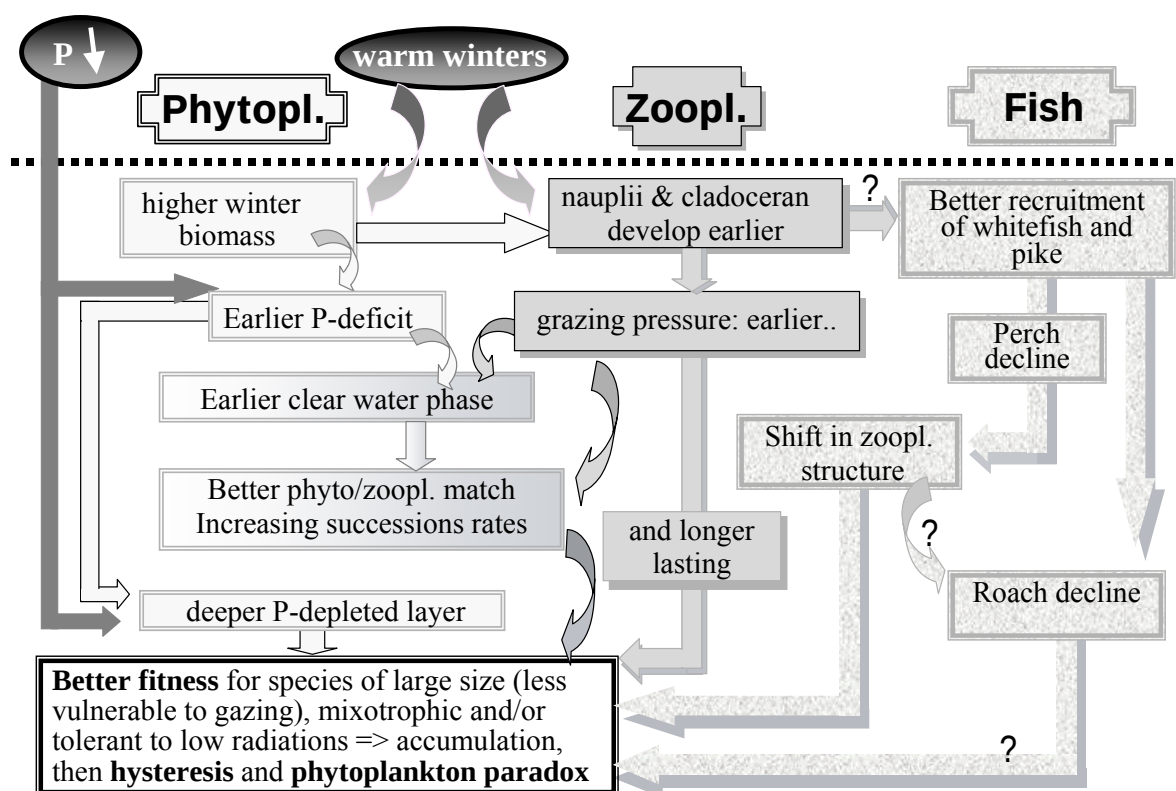
besoin de synthèses sur les trajectoires des changements d'état, se conjuguent aux enjeux scientifiques de l'écologie fonctionnelle, pour définir le grand cadre de recherche dans lequel nous définissons les objectifs généraux de l'ORE.

❖ Les dynamiques des changements d'état des écosystèmes lacustres sont à interpréter sur la durée, en tenant compte des interactions entre facteurs, de l'existence d'effets antagonistes ou synergiques ; il s'agit en particulier de comprendre et conceptualiser les trajectoires du système sous l'effet d'évolutions conjointes de l'état trophique (réoligotrophisation ou maintien de l'état oligotrophe), des relations bassins – lacs (contexte d'urbanisation) et de la tendance au réchauffement des eaux.

❖ Les évolutions en cours et la réorganisation du système écologique associée à celles-ci, sont susceptibles de révéler l'importance de certains fonctionnements écologiques et de certains processus biotiques ou traits d'espèces.

❖ Dans ce contexte, la connaissance de l'état initial récent de l'écosystème (pré eutrophisation), de certaines dynamiques physiques contraignantes pour les fonctionnements écologiques (brassages) et de l'effet de certains événements exceptionnels (introduction d'espèce, pression de pêche, baisse brutale de la charge externe, hydro-météorologie) constituent des références cruciales. L'existence de séries de longues durées issues de suivis antérieurs et complétables par des données provenant des archives sédimentaires, peut aider à les acquérir.

Modèle conceptuel expliquant l'évolution du phytoplancton au Léman depuis 1974 et modifications observées dans la communauté piscicole de ce lac sous les effets synergiques de la réoligotrophisation et du réchauffement (Anneville et Gerdeaux, Workshop LIMPACS « long-term lake response to reduced nutrient loading », 2003).



La synthèse des résultats obtenus pour les différents compartiments trophiques étudiés conduit au **modèle conceptuel suivant**: la diminution du phosphore induit un changement dans la répartition verticale du phytoplancton et modifie la composition spécifique de la communauté estivale en favorisant les espèces plus adaptées aux faibles intensités lumineuses, et donc aptes à se développer à plus grande profondeur. Mais, grâce à la résistance au broutage que leur confère leur grande taille, ces algues ont tendance à s'accumuler et provoquer des nuisances. Par ailleurs, ce changement induit par une cause anthropique (la diminution du phosphore) entre en synergie avec une cause météorologique. Les hivers et printemps plus doux de ces dernières années favorisent le développement du plancton. Cela conduit à un épuisement précoce du phosphore de la couche euphotique. Ces hivers doux induisent également un développement plus précoce du zooplancton, ce qui accélère le déclin phytoplanctonique printanier. La précocité de développement du zooplancton pourrait également favoriser celui des poissons et, par effet de cascade, limiter par prédation le zooplancton estival et donc sa pression de broutage sur le phytoplancton (Angeli et al., 2001). Par ailleurs, la précocité de développement du zooplancton pourrait favoriser le recrutement du corégone et du brochet en raison d'un meilleur match-mismatch entre larves et proies zooplanctoniques. Ce dernier point, ajouté au modèle initial par Angeli et Gerdeaux, expliquerait les changements observés dans la communauté piscicole du Léman. La synergie intervenant entre ces phénomènes explique l'effet paradoxal de la diminution du phosphore sur l'évolution des biomasses phytoplanctoniques.

3. OBJECTIFS ET ORGANISATION SCIENTIFIQUE PROPOSEE

Ce paragraphe précise, les objectifs généraux déduits de l'état des connaissances, l'organisation scientifique proposée en 3 volets pour regrouper les objectifs détaillés de façon ouverte et partenariale, et enfin les questions et stratégies scientifiques associées à ceux ci.

3.1. Objectif général de l'ORE: un groupe cohérent de questions nécessitant des suivis à moyen et long terme.

3.1.1. Objectif général

Notre ambition est de comprendre l'évolution du fonctionnement écologique de systèmes lacustres soumis à des modifications de forçages environnementaux dont le réchauffement climatique. Cet objectif, représentatif de la problématique générale des écosystèmes lacustres, est relativement original par le fait que le réchauffement s'applique notamment sur des systèmes en réoligotrophisation et dans un contexte d'anthropisation des bassins versants.

Nous nous intéresserons à la fois à la dynamique des changements d'état de ces systèmes lacustres, aux processus qui la pilotent et à leurs facteurs.

Dans le contexte des milieux observés et considérant les premières interprétations des séries chronologiques, une question s'avère centrale et pertinente vis à vis des dynamiques actuelles: **comment un écosystème lacustre, soumis à des variations de pression de l'ampleur de celle en cours, se réorganise t-il?** Ceci, dans notre cas, revient à s'interroger, sur les réajustements des structures biocénotiques et des productivités à différents échelons du réseau trophique lors d'une réoligotrophisation, sur la nature des changements d'état (comment les processus se traduisent ils en changements d'état ?), sur les interactions entre changements trophiques et réchauffement des eaux, enfin sur certains effets éco-toxicologiques liés à l'émergence récente de certains micropolluants. Par ailleurs, certains fonctionnements écologiques étant fortement contraints par des fonctionnements physiques du lac, la question de la complexité des influences des divers processus hydrodynamiques sur la dynamique de l'écosystème est également posée.

Nous ne pourrons pas dans l'immédiat aborder toutes ces questions simultanément et dans toute leur complexité. L'ORE est dans sa phase initiale: le travail de recherche s'organisera donc autour de diverses équipes, sur quelques thèmes aptes à valoriser les données disponibles, à compléter le cadrage général et à améliorer les modèles. Sa mission sera aussi de mettre en place les conditions pour faire émerger de nouvelles collaborations et les conceptualisations nécessaires à l'ambition générale définie ci-dessus.

Les recherches envisagées sont susceptibles d'apporter des éléments de réflexion et d'expertises originaux dans le domaine de **l'écologie de la restauration** : mise en évidence et modélisation de processus clés, de compartiments et d'organismes structurant pour la dynamique eutrophisation puis réoligotrophisation. D'autres résultats sont attendus dans le domaine de **l'écologie fonctionnelle** : couplage des cycles des nutriments au niveau lacustre ou dans le système bassin versant - lac, relation biodiversité - cycles biogéochimiques, structures et fonctionnement des communautés biologiques. La **biologie de la conservation**

est aussi concernée, ces lacs étant des sites tests pour la conservation de salmonidés particulièrement sensibles aux effets du réchauffement.

Les connaissances acquises contribueront aussi à répondre aux 2 principales interrogations que nous adressent gestionnaires et utilisateurs : impact à long terme de l’anthropisation les usages de ces écosystèmes; durabilité des améliorations de la qualité obtenues actuellement, dans un contexte et d’environnement climatique changeant.

3.1.2. Nécessité de suivis à moyen et longs termes.

Les mécanismes de l’écologie lacustre, les interactions lac – bassin – sédiment, sont souvent abordés sur des périodes courtes, par exemple dans le cadre d’une programmation scientifique mise en place pour étudier les effets d’une pollution déjà installée et se révélant vraiment gênante pour les activités humaines. Dans ces conditions, les états initiaux et les processus plus lents sont mal **évalués, alors qu’ils constituent les bornes du système étudié**. Il est ainsi courant de négliger certaines dynamiques de populations, les phénomènes de compétition, les sélections de phénotypes ou les modifications de stocks et de flux dans l’écosystème, autant de phénomènes dont le temps caractéristique se situe entre le pluriannuel et le siècle (Tableau 1). La période courte habituelle néglige aussi des épisodes à périodicité pluriannuelle, comme les hivers froids ou chauds, d’une importance cruciale pour nos lacs profonds ainsi que les phénomènes météorologiques exceptionnels tels que les crues centenaires ou décennales.

Tableau 1: quelques pas de temps caractéristiques du système lacustre.

Echelle temps	Processus	Facteurs de contrôle Lacs	Facteurs de contrôle bassin	Facteurs externes
jour	-comportement ajustements -métaboliques, déplacements	-prédation -courants locaux - Turbulence		-météorologie -cycle jour/ nuit - Hydrologie (crues)
Saison	-cycle des espèces -choix des habitats	-compétition pour les facteurs limitants -“turn over” du lac		-météorologie -pêche
années à décennies	-dynamique des populations -productivité	-état trophique -charge interne charge externe -renouvellement hydraulique	-état du bassin -crues exceptionnelles	-dérive climatique -développement - politiques de l’eau et industrielle

En raison de la taille, des fonctions d'accumulateur et de réacteur biologique qui caractérisent le type d'écosystème aquatique étudié, les changements d'état trophique et les dynamiques résultantes s'inscrivent dans des pas de temps moyens à longs, avec des ordres de grandeur décennaux, variables secondairement selon la taille du système, le temps de renouvellement des eaux et le mode de développement des activités sur le bassin versant. Pour construire des scénarios d'évolution des propriétés biologiques et des valeurs d'usage des lacs, **il est crucial que les recherches relatives au fonctionnement des lacs prennent en compte ces pas de temps moyens à longs**, s'ouvrant ainsi à une modélisation numérique utile pour la recherche et l'aide à la décision.

3.2. Une organisation scientifique en 3 volets complémentaires.

Nous proposons d'organiser les objectifs généraux de l'ORE énoncés précédemment en 3 « volets » complémentaires et interactifs différant par les niveaux d'étude et les pas de temps, eux-mêmes subdivisés en « projets ».

❖ **Un volet 1 « limnologie »**, consacré à l'analyse et l'interprétation des séries chronologiques dans la perspective d'une connaissance de la dynamique décennale des changements d'état du système lacustre et dont les finalités sont des modèles et des connaissances formalisées.

❖ **Un volet 2 « processus »**, consacré à des recherches sur les fonctionnements biocénotiques révélés par les dynamiques de changement d'état ou les sous-tendant, nécessitant des investigations plus ciblées à moyen terme, pluri annuelles et s'intéressant à des processus écologiques dans une perspective de modélisation numérique et d'écologie fonctionnelle. Les résultats obtenus dans ce volet servent à terme à alimenter, améliorer ou valider les modèles opérationnels du volet 1.

❖ **Un volet 3 intitulé «projets et sites associés»**. Il « accueillera » dans l'ORE un ensemble de projets ne nécessitant pas nécessairement des suivis limnologiques au sens strict mais apportant des informations cruciales sur certains fonctionnements ou état des lacs observés. Un site associé s'intègre à ce volet comme un terrain modèle, notamment pour des études de processus biogéochimiques: le **Lac Pavin** (Lac méromictique étudié par l'équipe CNRS-Université de Clermont-Ferrand, le LGE et le CEREVE).

Le volet 3, par la diversité des compétences mobilisées, apporte une contribution décisive à la problématique et à l'animation scientifique de l'ORE. La fonction de service rendu entre partenaires n'est que secondaire. Les projets portés par ce volet sont parfois en place, parfois en gestation. Ils devraient à terme aboutir à des propositions de suivis pris en charge dans le volet 2 ou à des variables nouvelles pour le volet 1. Les thèmes traités actuellement se rapportent à des **fonctionnements des compartiments pélagique et benthique et à la paléolimnologie**.

3.3. Volet 1 « limnologie »

L'objectif spécifique de ce volet est de comparer et relier **l'évolution à long terme des diverses variables d'état caractérisant les systèmes limniques observés**, telles que concentrations en nutriments, en oxygène, en chlorophylle, la production primaire, la composition de certaines communautés biologiques bactérienne, phytoplanctonique, zooplanctonique et piscicole, etc. (Tableau 3). Il s'agit de mettre en évidence les facteurs et processus de contrôle de ces évolutions au niveau du lac, tout en prenant en compte l'influence du bassin versant. Ce volet de recherche est **tributaire d'observations sur du long terme (> 10 ans)** qui constituent la base de données propre à l'ORE, base déjà grandement pourvue grâce aux observations préexistantes décrites précédemment.

Par rapport aux suivis pré-existant, la valeur scientifique ajoutée par l'ORE, est d'organiser une interprétation d'ensemble des informations en reliant états du système lacustre, structures biologiques, grands flux de matière et trajectoires d'évolution du système (durées caractéristiques, processus clés, effets des perturbations exceptionnelles). Ces trajectoires seront conceptualisées et mises en relation avec l'évolution des forçages pour contribuer à révéler la nature des phénomènes évolutifs (continus ou intermittents, progressifs ou brutaux, existence d'état métastable) et de leurs facteurs de contrôle. Les travaux antérieurs réalisés dans le cadre du CARTEL ou du CEREVE, fournissent des bases conceptuelles pour cet axe de recherches apparenté à l'écologie de la restauration.

Une attention particulière sera portée aux couplages entre les différentes variables de façon à mettre en évidence les espèces et processus clés à étudier dans le volet 2. Parallèlement nous nous intéresserons à des variables biologiques quasi indépendantes de l'état trophique comme la phénologie des espèces de poisson, pour tenter de déterminer les effets propres liés aux changements thermiques.

Les recherches prévues s'appuieront sur les données acquises dans les trois lacs de l'ORE. Ils présentent des statuts trophiques différents et se trouvent à des étapes variables au sein du processus de réoligotrophisation. L'état d'un de ces lacs (Annecy) peut, au stade actuel, être considéré comme l'état que devrait atteindre à moyen terme les 2 autres lacs. Les chroniques sur les variables d'état des 3 lacs seront de ce fait complémentaires. En outre, sur 2 de ces lacs (Léman et Annecy) l'existence d'enregistrements antérieurs sur 10 à 40 ans pour plusieurs variables d'état et la possibilité de reconstituer les variables de forçage sur ces mêmes périodes, ouvrent la possibilité d'analyses comparées rétrospectives partielles. Celles-ci pourront être complétées par des données de paléolimnologie du récent qui fourniront des renseignements précieux sur les états initiaux (première approche en cours, voir volet 3, projet 2). La possibilité de comparer les dynamiques de dégradation (eutrophisation) avec celles de la restauration est donc ouverte et sera exploitée car c'est une originalité du dispositif proposé.

Concrètement, pour les 5 prochaines années, l'effort d'interprétation des changements d'état des systèmes observés portera en particulier sur les points suivants.

❖ **Relations bassins–Lac** : variabilité et évolution de la charge externe du Léman.

Grâce aux chroniques longues durées disponibles (>30 ans) il est possible de mettre en relation l'évolution des régimes d'exportations des nutriments par les affluents du Léman, avec celle du système de transfert constitué par leurs bassins versants. Le phosphore est au centre de cette analyse rétrospective du fait de son influence spécifique sur les lacs et de la

grande sensibilité de sa dynamique à l'anthropisation des bassins versants (Cassell *et al* 2002). L'objectif est de comprendre i) l'effet de la gestion des eaux usées et de l'évolution du mode d'occupation des sols, sur la dynamique et les bilans de P ii) le couplage entre divers nutriments (C, N, P) et u delà les relations BV-lac (stœchiométrie des apports dissous).

Le diagnostic proposé intègre une analyse de la contribution des sources diffuses de P. Sur ce thème, la possibilité de caractériser la variabilité du diffus dans un sous-bassin lémanique purement agricole de référence, constitue un point fort de la démarche (Le Mercube, suivi par le laboratoire INRA depuis 13 ans). Le COD sera testé comme marqueur des effets thermiques. Un tel travail repose sur des études comparées et une modélisation semi-empirique de la dynamique de P, combinant relation Q/C et bilans (Dorioz *et al.*, 1998; Dorioz *et al.*, 2002) ainsi que sur des approches de modélisation déterministe et bayésienne (collaboration avec B. Tassin ENPC, voir Kanso *et al.*, 2006). La possibilité de coupler cette analyse avec un travail de recherche sur les archives sédimentaires récentes correspondantes est envisagée en partenariat avec l'équipe EDYTEM.

Opération sous la responsabilité de D. Trevisan (IR INRA)

❖ **L'évolution des structures et la production des communautés planctoniques.**

Après avoir identifié les indicateurs climatiques à différentes échelles (locales et régionales), une analyse conjointe des séries chronologiques biologiques disponibles sera réalisée, pour mettre en évidence les patterns de la diversité planctonique, les tendances moyennes à long-terme et caractériser des extrêmes. Il s'agit de comprendre les changements de régime entre les différentes communautés biologiques étudiées, de tester leurs synchronismes à l'échelle de l'écosystème et des lacs. La compréhension des causes des changements de régime permettra d'élaborer des modèles conceptuels qui serviront de base pour tester et à terme quantifier, les conséquences de ces changements sur la dynamique des niveaux trophiques supérieurs. L'ambition générale est d'améliorer la représentation des modèles d'écosystème et la connaissance des mécanismes du recrutement de certaines espèces de poissons exploitées.

Ce travail contribue à un projet ANR Biodiversité soumis (coordinateur scientifique général S. Souissi, Université Lille 1 ; coordinateur volet « lacs » O. Anneville)

Opération sous la responsabilité d'O. Anneville (CR INRA)

❖ **La dynamique des peuplements piscicoles.**

En passant du stade eutrophe au stade mésotrophe, le peuplement piscicole du Léman est passé d'un peuplement dominé par les cyprinidés, puis par les percidés à un peuplement où l'espèce majoritaire est le corégone, comme ce fut le cas pour celui d'autres lacs subalpins ayant suivi la même évolution trophique. Dans les années à venir, il devrait normalement évoluer vers un peuplement dominé par les salmonidés, si le processus de réoligotrophisation se poursuit (Gerdeaux *et al*, 2006). La modélisation de la dynamique des peuplements de poissons sera l'objectif de ce travail et reposera sur les résultats acquis sur le lac d'Annecy.

Opération sous la responsabilité de D Gerdeaux (DR INRA)

Parallèlement l'équipe d'animation de l'ORE, en s'appuyant sur l'expérience du CEREVE, envisagera comment améliorer la prise en compte des forçages physiques en incluant certaines variables météorologiques ainsi que la structure thermique des lacs dans les suivis. Il pourrait envisagé de tester des stations automatisées de surveillance, constituées de bouée autonome équipée de capteurs météorologiques et d'une chaîne thermique, permettant la transmission à distance des données. Une collaboration avec des fabricants serait étudiée.

L'animation scientifique globale de ce volet sera assurée par J.M. Dorioz (DR INRA), S. Jacquet (CR, HDR, INRA) et O. Anneville (CR INRA).

3.4. Volet 2 « Processus écologiques »

Les investigations à entreprendre pour des recherches sur les fonctionnements biocénotiques reliés aux dynamiques d'état, nécessitent souvent, soit de prendre en compte des compartiments très réactifs (notamment les micro-organismes), soit d'étudier des processus biotiques (prédation par exemple) et donc imposent d'organiser des **suivis spécifiques**.

Le couplage entre les volets 1 et 2 de l'ORE sera étroit afin d'associer les recherches sur les processus élémentaires à celles portant sur les dynamiques à long terme qui constituent le cadrage des précédentes. La possibilité d'offrir à toute étude de processus écologique élémentaire un tel cadrage qui la replace dans une dynamique macroscopique est un atout de l'ORE. Cette organisation devrait aussi favoriser l'émergence de coopérations et de nouveaux projets émanant de partenaires.

Dans l'immédiat, nous proposons d'inclure dans ce volet deux questions de recherche dont l'importance a été relevée par les travaux antérieurs sur l'évolution des systèmes lacustres et notamment celle des grands lacs péri-alpins (cf en particulier les travaux d'Anneville *et al* et de Gerdeaux *et al.*, présentés antérieurement). Il s'agit de projets traitant de fonctionnements trophiques et biogéochimiques associés à la réoligotrophisation et concernant :

- ❖ 1 : la bio-utilisation, les rôles et le devenir des sources de COD en milieu pélagique ;
- ❖ 2 : la variabilité de la répartition verticale du phosphore, rôle des facteurs physiques et biologiques.

Le premier projet est déjà en phase de test et de mise en place ; l'autre est possible à court terme. Ils sont susceptibles d'apporter une compréhension de processus écologiques pilotant une partie des réponses globales des écosystèmes étudiés aux changements en cours. Ils se rattachent en outre aux grandes problématiques actuelles de l'écologie, notamment à celles traitant de l'impact de la biodiversité sur les fonctionnements trophiques et vice versa. Ils sont tributaires d'observations à moyen terme (de l'ordre de 5/10 ans) et d'un partenariat scientifique déjà largement formalisé. Les observations pourront ne concerner au moins initialement qu'un seul lac, celui qui se prête le mieux aux recherches.

3.4.1. *Projet processus 1*

Fonctionnement pélagique des lacs : contribution et rôles fonctionnels de diverses sources de COD, en particulier des apports d'origine terrestre, au réseau trophique pélagique.

Problématique et objectifs spécifiques

Les écosystèmes aquatiques reçoivent des apports conséquents de carbone organique d'origine terrestre, sous forme dissoute (COD) ou particulaire. Les études relatives à l'impact fonctionnel de ces apports dans les lacs clairs et profonds sont cependant, encore peu nombreuses.

La place des apports allochtones dans le fonctionnement du système semble reconnue pour certains milieux oligotrophes ou en voie de réoligotrophisation, milieux dont ils pourraient soutenir la productivité ou modifier la structure biocénotique (Jansson *et al.*, 2000, Carpenter *et al.*, 2005). Les études isotopiques menées sur le lac d'Annecy (Perga et Gerdeaux, 2006) ainsi que les études des profils en acides gras du zooplancton (Bec, 2003) ont conclu à une contribution potentiellement significative du carbone d'origine terrestre dans la nutrition du zooplancton, qui serait transféré jusqu'à ce compartiment via la boucle microbienne. Cependant, aucune évaluation chiffrée n'a encore été fournie, ni associée à des études plus fines de processus biotiques. Des études récentes menées sur d'autres systèmes aquatiques, confirment qu'en milieu oligotrophe, à la fois les communautés microbiennes autotrophes et les hétérotrophes sont affectées par la biodisponibilité des matières organiques (MO) dissoutes.

Le projet 1 a pour **objectif d'évaluer le rôle fonctionnel des matières organiques dissoutes d'origine terrestre dans les écosystèmes pélagiques et leurs contributions au réseau trophique**. Ce travail s'inscrit dans une perspective plus large, dont l'ambition à terme, est de comprendre le devenir des matières organiques d'origine terrestre et leurs influences sur le fonctionnement de lacs oligotrophes ou en cours de réoligotrophisation, rôles trophiques et biocénotiques, mais aussi interactions avec certains micropolluants. Une telle ambition nécessite de caractériser la matière organique, pour tracer ses origines et, au-delà, ses rôles et propriétés au sein de l'écosystème aquatique (biodisponibilité, transferts).

Hypothèses de travail.

Les processus inhérents ou dominants dans un milieu donnent à la matière organique de celui-ci des caractéristiques particulières marquant son origine et déterminant sa réactivité. Ces processus, impliquant des réactions aéro/anaérobies biologiques, physiques ou chimiques, induisent en effet des transformations, des dégradations ou des agrégations différentes suivant les milieux, les concentrations et la saisonnalité. Au niveau d'un lac, le fonctionnement des communautés microbiennes (phytoplancton, bactérioplancton) induit une production « autochtone », alors que les matières d'origine terrestre représentent un apport « allochtone ». Cet apport externe a-t-il un effet trophique significatif? Est-il bio-utilisable? Modifie-t-il la structure des communautés et le fonctionnement de l'écosystème lacustre?

Nos hypothèses relatives à ces interrogations sont :

- ♦ la contribution de ces divers apports de MO terrestre est variable dans le temps et l'espace, en terme de quantité et de qualité ;
- ♦ ces variabilités qualitatives et quantitatives de la MO sont susceptibles de structurer l'écosystème et d'induire des modifications dans le fonctionnement des réseaux trophiques pélagiques, en particulier via des effets initiaux sur les communautés bactériennes; des

impacts indirects sur la régulation des micro-organismes phytoplanctoniques (composition, persistance de blooms, ...) sont aussi envisageables ;

♦ l'ensemble des ces phénomènes conjugué à des processus physiques et chimiques, règle le devenir des diverses sources de matière organique dans la zone pélagique.

Relation avec le volet « limnologie »

Les travaux antérieurs montrent que le carbone organique est un facteur de régulation à ne pas négliger. La question du rôle et de la bio-utilisation du COD selon son origine est d'autant plus pertinente que, dans le cadre de l'OREs, deux des trois systèmes étudiés sont aujourd'hui en cours de ré-oligotrophisation ; dans ces conditions, le rôle potentiel des ressources en matières organiques allochtones est susceptible de s'accroître.

Toutes les informations acquises dans le cadre de ce projet, aussi bien en termes de processus que de marqueurs d'origine ou de fonctionnement, permettront de mieux comprendre la hiérarchie des facteurs pilotant l'organisation écologique du système pélagique. Enfin, les connaissances sur la disponibilité et la qualité des ressources en matières organiques seront éventuellement à prendre en compte dans les modèles décrivant les relations bassin versant et lac, en particulier si le flux de COD est affecté par le réchauffement climatique attendu (volet 1 et projet 1 du volet 3).

Portée générale

Cette problématique de recherche se situe dans le champ de l'Ecologie fonctionnelle et s'inscrit dans une démarche visant à progresser i) dans la compréhension des rôles géochimiques, environnementaux et écologiques de la matière organique en milieu lacustre, ii) dans l'étude des couplages entre cycles biogéochimiques et fonctionnement des réseaux trophiques, notamment les réseaux trophiques microbiens regroupant des micro-organismes acteurs essentiels dans la productivité des systèmes lacustres. Ce sujet est en plein essor, comme le prouve le nombre de travaux récents concernant ce domaine (Stedmon et Markager, 2005). Les travaux projetés apportent également un éclairage sur des mécanismes de réponse des écosystèmes aquatiques et sur le rôle de certains processus clés affectant l'organisation des communautés planctoniques, dans la propagation de ces réponses jusqu'aux maillons supérieurs

Partenariat :

Ce projet regroupe des chercheurs de chacune des trois équipes de l'UMR CARRETEL et s'inscrit dans le cadre du projet structurant du CARRETEL en construction depuis plusieurs mois. Il exprime donc un premier choix collectif sur les questions à aborder, les hypothèses de travail, les méthodes de traçage, les objets d'étude et les méthodes d'analyse.

Ce projet débute en étroite partenariat avec le laboratoire EDYTEM (CNRS - Université de Savoie, Y. Perrette et B. Fanget). Il bénéficie d'une dynamique régionale forte sur la thématique matière organique, matérialisée par le projet ANR « RPE-DYNAMONTS » (partenariat CNRS-CEA Grenoble, EDYTEM, CARRETEL, CEMAGREF Lyon, dont l'objectif est de caractériser les matières organiques issues des sols et des sédiments lacustres) et par la participation au cluster régional « environnement » sur le thème biodiversité et matières organiques (CEMAGREF LYON). Tout ceci se traduit par un important potentiel analytique et une perspective de structurer une thématique de recherche traitant de la matière organique sous l'angle de sa dynamique dans l'environnement : transfert et bilans des sols aux lacs, « métabolisation » et devenir dans les lacs, archivage dans les sédiments.

Le rapprochement avec d'autres partenaires sera construit à partir des orientations et choix devant s'opérer à l'issue des premiers suivis débutés en 2007 (les partenaires prévus sont par ailleurs inscrits dans le volet 3 de ce projet ORE)

Approches développées et état d'avancement

L'étude du devenir et de l'influence de la matière organique apportée aux zones pélagiques suppose de caractériser un système de processus et de transferts, affectant divers compartiments de l'écosystème. Un des effets globaux de ce système est une contribution à la productivité biologique via la bio-utilisation de cette matière organique terrestre, l'autre étant un rôle potentiel de structuration des communautés. Des suivis pluriannuels s'imposent pour appréhender la variabilité saisonnière de ce système et ses facteurs de pilotage.

Dans ce contexte, nous choisissons de mener une approche à la fois analytique et globale, en combinant divers méthodes de caractérisation de la MO (isotopique et physico-chimiques). Une première étape consiste à quantifier au mieux la contribution de la MO terrestre à la production secondaire du système. L'analyse des processus et des transferts relève de démarches nécessitant de reconnaître certains aspects de la diversité des matières organiques ce qui suppose de disposer d'outils pertinents, c'est-à-dire en adéquation avec les attentes en matière de diversité. Sur ces bases, nous scindons ce projet en deux phases, la première concerne la validation des outils et de suivis globaux, la seconde représente le suivi proprement dit, dont la stratégie sera modulée en fonction des résultats de la première. La seconde phase est donc présentée ici plus succinctement dans ses grandes lignes.

Le projet prend en compte deux écosystèmes lacustres de niveaux trophiques différents (ILac d'Annecy, oligotrophe et lac Léman, mésotrophe)

Phase 1 : mise en place et validation du suivi (2 ans)

Cette phase comprend deux opérations initiées au cours de l'année 2007 avec comme site principal Annecy.

• Evaluation de la contribution du carbone allochthone à la production secondaire pélagique.

La contribution de la MO terrestre à la production secondaire du système est appréhendée à partir de l'étude du compartiment zooplanctonique considéré ici comme un intégrateur des transferts trophiques. Le carbone organique d'origine terrestre peut être incorporé dans le réseau trophique par divers voies et mécanismes. Les apports organiques terrestres sont susceptibles d'être dégradés par les bactéries qui sont elles même consommées par les prédateurs flagellés puis metazooplanctoniques. Par ailleurs, le carbone organique particulaire est susceptible d'être non seulement pris en charge par les décomposeurs bactériens, mais également utilisé directement par le metazooplancton. Cependant, selon l'efficacité que l'on accorde à ces transferts de carbone du compartiment microbien au compartiment zooplanctonique, on privilégie l'un des deux modèles présentés dans la figure 2. L'utilisation des isotopes stables permet de visualiser directement et globalement au niveau des producteurs secondaires la présence de carbone d'origine terrestre.

Un échantillonnage mensuel ou bimensuel du COD, de la matière organique particulaire et du zooplancton a été mis en place depuis janvier 2007. L'analyse de la **composition isotopique** (^{13}C) et en acides gras de ces différents compartiments pourra permettre de mettre en évidence la contribution relative du carbone d'origine terrestre et de faire des hypothèses sur les voies

trophiques de transfert de ce carbone, vers le compartiment zooplanctonique (approche selon Perga *et al.*, 2006)

Les questions abordées sont les suivantes :

- ♦ Quelle est la contribution du carbone d'origine terrestre à la production secondaire metazooplanctonique ?
- ♦ Quels liens apparaissent entre les signatures dans la fraction dissoute, la fraction particulaire, et le metazooplancton ?
- ♦ Quelles sont les variations saisonnières de ces signatures et de l'efficacité du transfert de carbone d'origine terrestre vers le niveau des producteurs secondaires ?

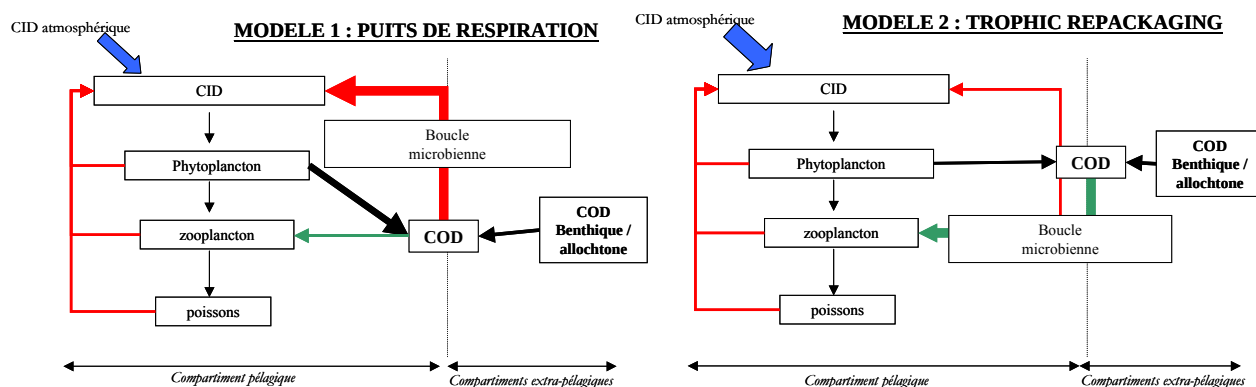


Figure.2 Deux modèles théoriques d'intégration du carbone extra-pélagique dans les réseaux trophiques pélagiques. L'épaisseur des flèches traduit l'importance relative des flux. Le premier modèle, conforme aux résultats de Cole *et al.* (2002) est caractérisé par une boucle microbienne à forte efficacité de minéralisation de la matière organique. Le carbone recyclé est essentiellement intégré sous forme inorganique au réseau pélagique, mais ne contribue pas à la production secondaire des invertébrés et des poissons. Dans le modèle 2, conforme aux résultats de Jones *et al.* (1999), la boucle microbienne a une forte efficacité de transferts du carbone organique aux organismes supérieurs. Le carbone non-phytoplanctonique contribue à la production secondaire des niveaux trophiques supérieurs. Modifié de Wetzel (2001).

• Caractérisation et variabilité des signatures physico-chimiques des matières organiques en divers points du système étudié.

Une étape de validation des outils de caractérisation et de traçage de l'origine des Matières Organiques, en particulier la méthode de **Spectrofluométrie 3D**, est indispensable pour tracer l'origine des matières organiques lacustres et leur influence trophique. Ce travail préliminaire s'accompagne de la connaissance de la variabilité des signatures MO en divers points de l'écosystème lacustre et des affluents. L'échantillonnage est défini selon une périodicité mensuelle (Affluents- Point pélagique - Sortie du lac.)

Les questions abordées sont les suivantes :

- ♦ Quelles sont les signatures typiques, repérables à l'aide des outils choisis, permettant de tracer les origines et de caractériser les MO naturelles dans la fraction dissoute?
- ♦ Quelles sont les variations observables dans les apports en carbone organique venant du BV, et dans le lac, en terme de qualité et quantité ?

Phase 2 période de suivi (3ans). Etude de l'influence et du devenir des matières organiques terrestres

Le contenu détaillé de ces opérations est fortement lié à l'analyse des résultats de la phase 1.

Dans les grandes lignes il est envisagé de réaliser à la fois des suivis *in situ* et des approches expérimentales (*in situ* et *ex situ*) pour aborder de manière ciblée la question du lien entre changements de qualité des matières organiques d'une part et fonctionnement et intensité des transferts trophiques d'autre part (depuis les communautés microbiennes jusqu'aux niveaux trophiques supérieurs). L'objectif est de mettre en relation les changements observés dans la qualité de la MO et l'efficacité de transferts vers les niveaux trophiques supérieurs, en s'appuyant sur des méthodes de mesures de production et de taux de croissance. Il sera ainsi possible de révéler la biodisponibilité des ressources pour différents groupes fonctionnels, et d'identifier plus finement les voies de transferts empruntées.

Les autres questions seront abordées à travers l'étude des flux, celles du devenir des apports de matière organique d'origine terrestre (sorties du système pélagique) et celle d'autres rôles biogéochimiques.

Stratégie d'échantillonnage

Le suivi nécessaire à ce projet implique de renforcer quelque peu la routine effectuée sur le lac d'Annecy et le Léman, en ce qui concerne le nombre de stations d'échantillonnage lacustre et les paramètres chimiques analysés. La durée totale prévue est de 5 ans pour englober notamment la phase de validation et un suivi intégrant diverses situations météorologiques influençant les apports issus du bassin et des sédiments. La stratégie globale est un échantillonnage en entrées, sortie ainsi qu'en différents points du lac (transects depuis certains affluents) avec caractérisation de la matière organique, des biomasses et des productivités. A l'heure actuelle, cette stratégie d'échantillonnage lourde ne sera mise en place dans son ensemble qu'à l'issue de la phase 1 (*détails, voir tableau 5 chapitre 4.2*).

La **première phase** met en oeuvre des outils d'analyses spécifiques à la caractérisation du COD. La Spectrofluométrie 3D est l'un des outils utilisable pour tracer l'origine des matières organiques lacustres et réaliser le suivi de la variabilité des signatures COD en divers points du système lacustre. Cette méthode, de plus en plus utilisée dans le contexte marin (Sierra *et al.*, 2005 ; Parlanti *et al.*, 2002), n'a été jusqu'à présent que peu utilisée dans les écosystèmes lacustres. Or les spectres 3D peuvent constituer de véritable signature du COD, appuyée sur des analyses adaptées à un jeu de données 3D (PARAFAC). Cette méthode semble particulièrement adaptée pour tracer l'origine terrestre des matières organiques (Stedmon *et al.*, 2003) et la production / dégradation des matières organiques autochtones (Parlanti *et al.*, 2000 ; Stedmon et Markager, 2005) dans les écosystèmes aquatiques. Une expérience est déjà disponible dans le cadre de la collaboration réalisée pour un projet ANR.

Parallèlement nous utilisons la chromatographie d'exclusion stérique comme méthode de caractérisation des MO. Cette technique, fréquemment utilisée dans l'étude des MO (Peuravuori, 2005) permet de fractionner les Matières Organiques en fonction de leurs poids moléculaire. Le couplage des deux techniques (analyse spectrale sur les fractions séparées par chromatographie) sera également effectué sur un nombre d'échantillons caractéristiques.

Les analyses isotopiques (^{13}C) et de composition en acides gras visant à déterminer l'importance du transfert de CO d'origine terrestre vers le compartiment zooplanctonique seront effectuées à un rythme mensuel sur le site du lac d'Annecy. L'analyse concernera la fraction organique dissoute et particulaire ainsi que les organismes du metazooplancton. Le point central pélagique sera principalement concerné par ces analyses. Toutefois, les mesures réalisées sur le COD et COP seront également effectuées en zone d'entrée des affluents afin de visualiser les différences de signatures repérables entre les entrées du lac et la zone pélagique centrale.

Projet porté par CARRTEL

Coordination

Ce projet sera coordonné par **I. Domaizon** (MC, CARRTEL Université de Savoie).

Chercheurs du CARRTEL impliqués

M.E. Perga, R. Tadonlécé, J. Poulenard, J. Guillard, J. Lazzarotto, J.M. Dorioz

Partenaires :

EDYTEM CNRS-Université de Savoie (Y. Perrette, B. Fanget)

UMR M2C Université de Rouen (Y. Copard et X. Sebag)

La phase 2 du projet permettra d'élargir le partenariat.

Seront consultés et pressentis

- CEMAGREF microbiologie des eaux Lyon
- Biologie des protistes CNRS –Université Clermont Ferrand
- Laboratoire de géochimie des eaux Université de Paris 7

3.4.2. *Projet processus 2 :*

Variabilité de la répartition verticale du phosphore : rôle des communautés planctoniques et des processus physiques dans la dynamique du phosphore du métalimnion.

Problématique

L'OCDE recommande la teneur moyenne annuelle en P comme un indicateur d'état trophique. Lors de la réoligotrophisation des lacs profonds, la baisse des concentrations en phosphore n'est régulière, ni au cours de l'année, ni sur toute la colonne d'eau. Différentes études ont montré que la répartition verticale du phosphore, et donc sa disponibilité pour le phytoplancton, présente une dynamique qui se caractérise par un appauvrissement se développant en profondeur dans la colonne d'eau (Anneville *et al.*, 2005). L'étude des séries chronologiques montre que l'épaisseur de cette couche appauvrie en phosphates en été, augmente au cours de la réoligotrophisation (Anneville, 2001). Dans le Léman, cette couche s'étend actuellement au-delà de la zone euphotique et au-delà de la thermocline, dans le métalimnion. Le phosphate est donc en faible concentration (parfois entre 0 et 2 $\mu\text{gP/L}$) bien au delà de la zone euphotique en été, c'est-à-dire au-delà de la zone principale de consommation du phosphate pour la production primaire. La dynamique et l'origine de ce phénomène restent encore inexpliquées.

Au Léman, les changements observés dans la composition des espèces phytoplanctoniques laissent supposer que cette nouvelle répartition des concentrations en phosphate dans la colonne d'eau a un fort impact sur les relations inter-spécifiques et serait à l'origine de l'hystérésis observé dans la relation phytoplancton - phosphore, entre les années 50 (eutrophisation) et les années 90 (réoligotrophisation) (Anneville *et al.*, 2002). Les espèces d'algues trouvant un avantage sélectif dans cette situation, se caractérisent par leur adaptation aux faibles intensités lumineuses, leur résistance au broutage et la possibilité d'ajuster leur position verticale.

Trois types de facteurs peuvent entrer en jeu dans la dynamique du phosphore du métalimnion: i) les échanges intermittents entre couches d'eau, ii) l'utilisation du phosphore par des unicellulaires hétérotrophes ou des bactéries (régulation du rapport C/P notamment) et enfin iii) l'adsorption du phosphore sur les particules organiques en sédimentation.

Les processus hydrodynamiques peuvent influencer significativement sur la dynamique du phosphate dans le métalimnion d'un lac. Les ondes internes et la turbulence qu'elles sont susceptibles d'engendrer, constituent les principaux processus hydrodynamiques impliqués. Dans le lac du Bourget, la caractérisation des ondes internes (Cuypers *et al.*, 2006) a montré que le déferlement des ondes haute fréquence sur les rives du lac peut générer une forte dispersion turbulente.

Ces mécanismes de mélange par les ondes internes, peuvent jouer un rôle critique sur les flux biogéochimiques verticaux dans le métalimnion où les autres mécanismes, turbulence de surface et turbulence dans la couche limite près du fond, deviennent inopérants (Cuypers *et al.*, 2006). Cependant les flux générés par ces mécanismes sont par nature intermittents et difficiles à quantifier. Des premières mesures de la turbulence dans la colonne d'eau ont été effectuées en quelques dates (programme Dylachem, LGE-Paris 7 et CEREV-ENPC)

Objectifs

Notre **objectif** est **d'identifier et quantifier les mécanismes physiques et biologiques en cause dans l'épuisement en phosphate dans le métalimnion de ces lacs en cours de réoligotrophisation**. Un suivi spécifique pluriannuel est nécessaire pour traiter cette question.

Portée générale et relations avec le volet limnologie

Ces travaux contribuent à comprendre un fonctionnement typique des lacs profonds en cours de réoligotrophisation. Ils devraient aussi améliorer notre compréhension i) des mécanismes liant le phosphore et le phytoplancton; ii) des interactions éventuelles entre processus écologiques et mouvements des masses d'eau. Enfin, il est possible d'envisager des indicateurs fonctionnels d'évolution de la qualité trophique d'un plan d'eau en cours de réoligotrophisation.

Etat d'avancement et partenaires

Ce projet s'inscrit dans les thématiques de recherche de plusieurs chercheurs de la station s'intéressant au phosphore dans l'environnement. La partie hydrodynamique est traitée grâce à une collaboration avec des physiciens et des partenaires travaillant actuellement sur des problématiques similaires (ENPC-CEREVE, Station marine de Wimereux).

Stratégie d'échantillonnage

Il s'agit d'un renforcement temporel et spatial de l'échantillonnage en été: compléter les mesures physico-chimiques actuelles par des mesures d'activité phytoplanctonique et bactériologique, pièges à sédiments et caractérisation du phosphore colloïdal (nature des colloïdes, spéciation, pouvoir fixateur des colloïdes, biodisponibilité, tests enzymatiques....)

Les grandeurs mesurées spécifiques à ce projet figurent tableau 5 chapitre 4.2.

Projet porté par CEREVE et CARRTEL

Coordination

Ce projet sera coordonné par B. Tassin (DR, CEREVE ENPC) et J.M. Dorioz (DR INRA CARRTEL)

Chercheurs du CARRTEL impliqués

O. Anneville, S. Jacquet, I Domaizon,

Partenariat

B. Vicon-Leite et B. Tassin (CEREVE ENPC)

F. Schmitt (Station marine de Wimereux Université de Lille 1)

Collaboration pressentie (en cours)

Institut Forel (Univ de Genève)

3.5. Volet 3 : Projets associés

3.5.1 .projet associé 1 :

Impacts des perturbations sur les réseaux trophiques en lacs : approches paléolimnologiques et isotopiques (IPER-RETRO)

Problématique et Objectifs

Les écosystèmes lacustres ont subi, au cours des deux derniers siècles, plusieurs perturbations majeures : des introductions de poissons à des fins de gestion piscicole (au début du XX^{ème} siècle), la dégradation des habitats littoraux, des pollutions par des métaux lourds, pesticides ou dérivés chimiques, l'augmentation parfois suivie de la réduction successive des apports en nutriments (XX^{ème} siècle) et un réchauffement des eaux (deuxième moitié du XX^{ème} siècle). Ces perturbations ont engendré des réponses de l'écosystème, à moyen et long termes, à la fois sur la structure et le fonctionnement des réseaux trophiques.

Les quatre grands lacs alpins français (Léman, lac d'Annecy, lac du Bourget et lac d'Aiguebelette, également un lac profond périalpin), tous situés en région Rhône-Alpes, n'ont pas fait exception. Le corégone (*Coregonus lavaretus*), espèce de poisson qui constitue à présent l'essentiel de la pêche dans ces quatre lacs, n'est, à l'origine, autochtone que dans le lac du Bourget et le Léman. Il s'agit d'une espèce essentiellement zooplanctonophage. L'introduction de cette espèce dans les lacs d'Annecy et d'Aiguebelette au début du XX^{ème} siècle, alors qu'aucune espèce zooplanctonophage n'y était pré-établie, est par conséquent susceptible d'avoir fortement altéré, par le jeu de la prédation sélective sur le compartiment zooplanctonique, la structure et le fonctionnement des réseaux trophiques pélagiques de ces lacs. Cette première perturbation est rapidement suivie d'une eutrophisation, plus ou moins intense, puis de mesures de contrôle des entrées en nutriments et d'une ré-oligotrophisation alors que la colonne d'eau tend à se réchauffer sous l'effet du forçage climatique.

Dans ces lacs, les premiers prélèvements et suivis sont postérieurs aux années 1950. Les données et échantillons disponibles ne permettent donc pas d'étudier, par les méthodes traditionnelles de l'écologie fonctionnelle, l'impact de ces perturbations, ainsi que leur temps de développement, sur les réseaux trophiques. Dans ce projet, nous proposons d'utiliser une **démarche originale, combinant les outils de paléolimnologie et d'écologie isotopique**, dans le but d'identifier les changements de structure et de flux trophiques dans les compartiments planctoniques de ces quatre lacs, au cours des 200 dernières années.

Portée générale

Les potentialités des approches paléolimnologiques quant à l'identification des états de référence des lacs préconisés par la Directive Cadre sur l'Eau ont été déjà partiellement explorées, à l'échelle du bassin RMC ou internationale. Ces études préalables ont permis de déterminer les causes et ampleurs des changements de qualité de l'eau des systèmes impactés mais ont aussi permis de souligner la difficulté d'identifier un état de référence pour les lacs. Les apports excédentaires en nutriments ont été ciblés en tant que perturbations majeures affectant la qualité des eaux. Pourtant, les mesures visant à diminuer les concentrations en nutriments jusqu'au retour à des concentrations proches de celles avant l'eutrophisation ne sauraient garantir un retour de l'écosystème vers son état et son fonctionnement avant perturbation. Pour les grands lacs alpins, l'enrichissement en nutriments des eaux est susceptible de s'être produit alors que les conséquences à long terme de l'introduction du

corégone étaient encore en développement tandis que la diminution des concentrations en phosphore a coïncidé avec un réchauffement progressif de la masse d'eau. Ainsi, l'état de référence ne saurait se réduire à l'état avant eutrophisation car les lacs ont subi, dans un passé proche ou simultanément, d'autres perturbations telles que les introductions de poissons ou le réchauffement, qui ne sont pas réversibles.

Jusqu'à présent, les descripteurs et indices écologiques retenus pour définir les états de référence s'appuient sur les changements de biodiversité. Le compartiment zooplanctonique crustacéen n'a pas été retenu dans cette démarche, potentiellement à cause de sa biodiversité relativement faible. Cependant, le compartiment zooplanctonique occupe une position clé dans les réseaux trophiques et il est susceptible de répondre aux perturbations tant à la base qu'à celles qui affectent le sommet du réseau trophique. Si les réponses en terme de changement de composition spécifique ou de structure, sont relativement modérées, celles en terme de fonctionnement trophique, et notamment sur les voies de transferts de carbone, sont très marquées à l'échelle du compartiment zooplanctonique. Ces modifications de fonctionnement trophique sont détectables par les méthodes isotopiques. Ce projet vise par conséquent à explorer les potentialités des méthodes isotopiques à définir un « fonctionnement trophique de référence » des lacs, outil qui pourrait faciliter l'identification des états de référence des écosystèmes.

Apports à l'ORE

Il reste difficile d'appréhender, de façon rétrospective, toutes les conséquences des perturbations sur la structure et le fonctionnement des réseaux trophiques pélagiques des lacs ORE puisque les méthodes traditionnelles de l'écologie fonctionnelle sont tributaires de l'existence de longues séries de données ou d'échantillons archivés. Or, les campagnes de suivi en routine et les collections ont débuté alors que les systèmes étaient déjà perturbés ou en cours de perturbation. En associant les outils isotopiques à une démarche paléolimnologique, ce projet s'inscrit dans la cadre de cet ORE en développant une démarche complémentaire à celle de l'analyse des séries de données à long terme.

Stratégie et échantillonnage

Les analyses seront menées sur des carottes sédimentaires courtes provenant de chacun des quatre lacs. Les séries sédimentaires récupérées seront datées par des techniques de radiochimie croisées avec les chroniques historiques. Une fois conduites les études préliminaires sédimentologiques et les conditions environnementales et thermiques reconstituées, les modifications de la structure du réseau trophique planctonique seront estimées grâce à des indicateurs d'abondance, de composition en tailles et en espèces des compartiments phyto- et zooplanctoniques. La teneur en matière organique des sédiments et la composition en isotopes stables du carbone organique et inorganique ont été retenus comme des indicateurs des niveaux passés de production et productivité primaires tandis que les pigments caroténoïdes fourniront des informations sur la structure des populations phytoplanctoniques. L'étude des macro-restes fossiles de zooplancton permettra d'estimer l'évolution des structures taxonomique et en taille de la communauté zooplanctonique. Enfin, les changements dans le fonctionnement du réseau trophique seront identifiés par analyse isotopique sur les macro-restes fossiles du zooplancton. Ce point innovant de l'approche méthodologique nécessitera une calibration préalable, qui comprendra l'analyse isotopique des collections de zooplancton des lacs Léman et d'Annecy.

Equipes porteuses du projet : CARRTEL et EDYTEM**Coordination**

Ce projet sera coordonné par M.E. Perga (CR UMR CARRTEL) et M. Desmet (MC ENTPE/EDYTEM Université de Savoie).

Chercheurs impliqués

J. Lazzarotto, UMR CARRTEL

T. Bastide, ENTPE/LES Vaulx en Velin

Partenariat

Ce projet a reçu le soutien du CISALB, du SILA, ainsi que du Syndicat du lac d'Aiguebelette. Une demande de soutien pour une thèse a été déposée à la Région Rhône-Alpes (Projet IPER-RETRO). *Un soutien a été accordé par le département INRA EFPA (projet innovant)*

3.5.2 Projet associé 2 :

Lacs et villes : Impact des eaux pluviales urbaines sur les grands lacs alpins du bassin versant du Rhône.

Ce projet est validé dans le cadre de la ZABR.

Objectifs et problématique

L'urbanisation est un phénomène primordial dans la dynamique des bassins versants des grands lacs alpins (exemple : bassin versant du Lac du Bourget + 50 % entre 1968 et 1998). Une zone urbaine se caractérise par une forte imperméabilisation des surfaces. L'eau de pluie déjà contaminée par la pollution atmosphérique, ruisselle sur ces surfaces imperméables et se charge en polluants accumulés, provenant du trafic automobile, des toitures (Winiarski et al, 2003). Les eaux pluviales se transforment donc en une source majeure pour les milieux récepteurs de nutriments et de micropolluants minéraux (métaux lourds) et organiques (HAP, PCB, PBDE...), qui sont aujourd'hui inscrits sur différentes listes de substances prioritaires, par exemple la liste de la DCE. Une part importante de ces flux polluants est transférée du bassin au lac, fixée sur des particules en suspensions qui rejoignent, après décantation, les sédiments benthiques et s'y trouvent en quelque sorte archivés, mais pas forcément inactifs en terme de pollution.

L'objectif de ce projet est de caractériser la contamination de sédiments de lac soumis à la pollution liée au ruissellement urbain et d'étudier l'évolution temporelle récente de celle-ci sous l'effet du développement urbain, en s'appuyant sur l'archivage sédimentaire qui s'opère dans les lacs. Les contaminants retenus pour une première phase d'étude sont les métaux dits lourds et certaines catégories de molécules organiques (HAP, PCB, NP)

Stratégie d'étude

i) définir les paramètres clés caractérisant l'évolution du système « ville » dans le contexte de l'étude et de ses interactions avec le système lacustre ; (surfaces imperméabilisées, taux de ruissellement sur ces surfaces, rejets, activités de transport...)

ii) les contaminants choisis en particulier HAP et métaux lourds, sont des marqueurs du fonctionnement urbain ; il s'agit de substances stables dans le milieu (sédiments), facilement mesurables et caractéristiques de nos sources d'émissions urbaines. Toutefois d'autres substances prioritaires mentionnées par la directive cadre seront aussi étudiées. La composition des flux actuels sera caractérisée grâce à des trappes à sédiments mise en place en amont des zones de prélèvement.

iii) analyser les évolutions des concentrations en micropolluants mesurés dans les carottes sédimentaires prélevées dans le lac au vu de l'évolution de l'urbanisation dans le bassin versant et des usages. Cela implique de bien connaître le devenir et le comportement possible des substances mesurées dans le sédiment, ainsi que de la sédimentation. En effet, cette méthode basée sur le modèle âge-profondeur ne peut être efficace que si les éléments sont stables dans le sédiment.

Etat d'avancement

Le travail est prévu sur le Léman, le Bourget et le lac d'Annecy (développements urbains notables sur les rives). Une première opération de recherche est en cours depuis 2006 sur le

lac du Bourget dans le cadre d'une thèse ENTPE-ENPC (S. Jung). Une première série de carottage et d'analyses est d'ores et déjà réalisée (Jung *et al* , 2006).

Résultats scientifiques attendus et apports à l' ORE

❖ Un état des lieux des connaissances actuelles en matière d'eaux pluviales urbaines et de marqueurs de pollutions urbaines dans des sédiments lacustres. Cette approche sera l'occasion pour le LSE d'approfondir la connaissance du système ville (avec Chambéry et/ou Aix les Bains) et lac (du Bourget) et de ses caractéristiques clés. Ce travail s'appuiera sur un SIG retraçant l'évolution de l'urbanisation.

❖ L'analyse des carottes sédimentaires et des trappes à sédiments constitue une mesure du degré actuel et passé de contamination des sédiments au voisinage des villes et de la nature des contaminants.

❖ L'élaboration d'un modèle conceptuel sur la relation entre la ville et les sédiments lacustres et son évolution, sur la base des correspondances entre les données provenant des carottes sédimentaires et retraçant l'historique de la pollution, des trappes à sédiments indicateurs de la dynamique actuelle du bassin versant urbain et des connaissances sur l'évolution des caractéristiques clés du système urbain concerné.

Ce projet est porté par le LSE-ENTPE

Coordination

T. **Winiarski** (CR HDR, ENTPE) et B. **Tassin** (DR, ENPC Cereve)

Equipes impliquées

- LSE (Laboratoire des Sciences de l'Environnement : ENTPE)
- CEREVE de l'ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées)
- UMR CARTEL
- EDYTEM

Chercheurs impliqués

B. Tassin (CEREVE), S. Jung (doctorante, ENPC), T. Winiarski (ENTPE), M. Desmet (EDYTEM), J.M. Dorioz (INRA) J. Poulenard (Univ de Savoie).

Partenariat

ZABR
CISALB

3.5.3. Projet associé 3 :

Relargage de phosphore par les sédiments du lac du Bourget, stock et flux (Relax).

Objectifs spécifiques:

La charge interne est un poste clé du bilan de phosphore de certains écosystèmes lacustres. Sa mesure est toujours délicate car l'intensité du phénomène dépend des conditions d'oxygénation, du brassage, de l'activité biologique et microbiologique et de la nature des sédiments contenant le stock de P ainsi remobilisé (Viollier *et al.*, 2003). Il existe de ce fait une assez grande variabilité spatiale. Les bilans entrées-sorties du lac du Bourget supportent l'hypothèse d'un flux de P important provenant des zones benthiques, au moins équivalent au flux des affluents, d'où l'objectif du projet :

- ♦ d'évaluer le stock et de l'état du phosphore remobilisable présent dans les sédiments
- ♦ de mesurer les flux de relargage de phosphore en période oxygène/hypoxique/anoxique

Cadre général et relation avec le volet Limnologie

- Apporte un élément de compréhension du bilan de P du lac du Bourget à l'échelle saisonnière et pluriannuelle.
- Quantification des principales sources.
- Facteurs de variabilité du cycle du phosphore
- Evolution de la teneur en P des eaux et état trophique du lac
- Développement de méthodes utilisables sur d'autres lacs de l'ORE.

Stratégie de l'étude (Figure3)

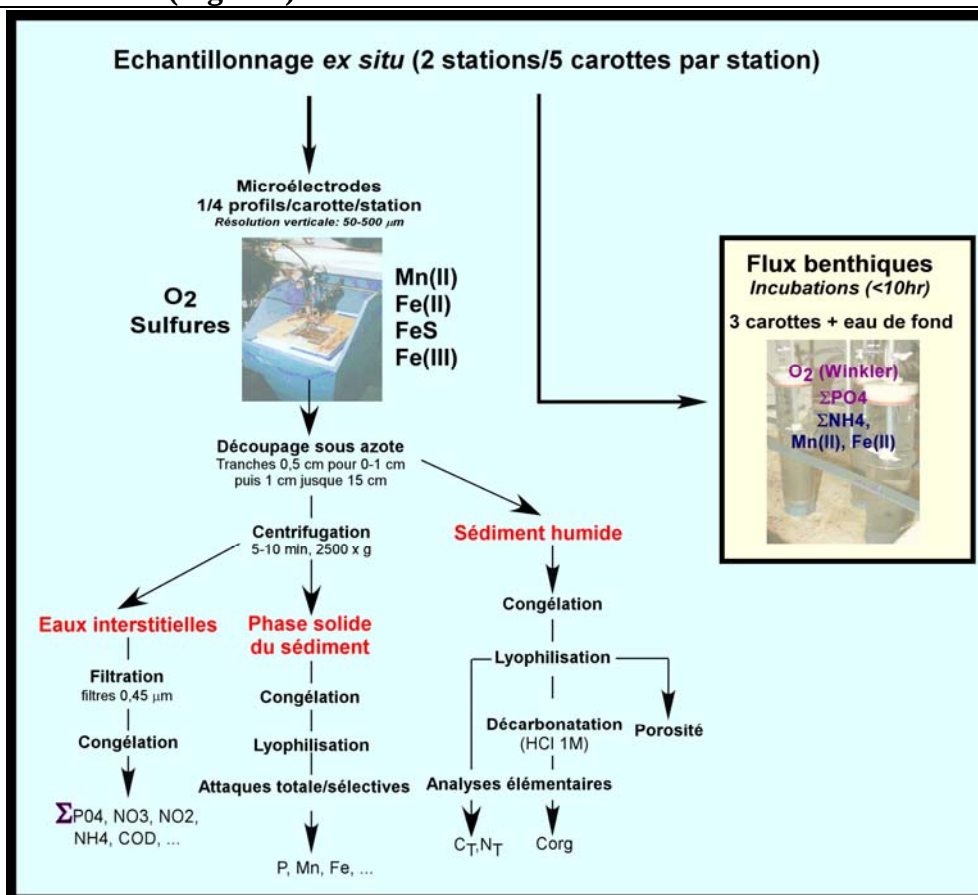


Figure 3 Plan d'échantillonnage du projet RELAX

Position des stations de mesures

Si pour des raisons d'ordre logistiques et financières, le nombre de station de mesure sur l'ensemble du lac doit être limité à deux, il faut au préalable s'assurer de la pertinence du choix de la seconde station (la station point B étant une référence). Pour cela, une approche géostatistique basée sur les données existantes permettra de placer au mieux la position de la seconde station de mesure. Un critère de représentativité des deux stations par rapport à l'hétérogénéité du lac du Bourget sera ainsi établi.

Flux benthique de phosphore et d'oxygène dissous à l'interface eau- sédiment

Pour mesurer directement les flux de re-largage de P, nous utiliserons une méthode d'incubation ex-situ de carottes de sédiment, utilisée récemment avec succès au cours du projet Dylachem. Pour chaque campagne (2 stations), 5 carottes de sédiment de 60 cm de longueur et 90 mm de diamètre sont prélevées. Trois carottes sont fermées et incubées à l'obscurité, à température in situ, en conditions d'oxygénation contrôlées pendant 6 à 12h, avec un suivi continu des concentrations dans l'eau surnageante (1 éch. /hr). La mesure de la consommation benthique en oxygène (en période oxique et suboxique) sera complétée par des mesures ex situ de micro-profils de O₂. Cette approche fournit une estimation du taux de minéralisation de la matière organique, processus concomitant au relargage de P (relation P / oxygène).

Stock de phosphore dans le sédiment

Pour chaque station de mesure, 1 carotte sera découpée sous azote par tranche de 1 cm sur les 15 premiers centimètres. La spéciation du phosphore et la composition élémentaire CHN du sédiment seront déterminées à partir des sédiments lyophilisés.

Suivi en continu de la désoxygénation des couches profondes

Pour pouvoir relier les données ponctuelles de flux de P et d'O₂ au fonctionnement saisonnier, nous mesurerons en continu la concentration en oxygène dissous au fond du lac (point B). Une station automatique équipée d'une optode à oxygène sera immergée pendant un an. La fréquence horaire des mesures permettra de caractériser les vitesses de désoxygénation, de visualiser très précisément les périodes de suboxie et d'anoxie ainsi que le brassage vertical (réoxygénation). *(Le coût de cette station est de 12 000 €, elle est mise à disposition par le LGE, seul les frais de fonctionnements sont à financer)*

Bilan du phosphore à l'échelle annuelle

L'interprétation des données de flux de relargage s'appuiera sur le suivi allégé, et sur le bilan des apports externes. Une étape de modélisation unidimensionnelle verticale à l'aide du modèle *Aquasim*, permettra d'estimer la redistribution du phosphore relargué par le sédiment vers l'ensemble de la colonne d'eau. La description fine du mélange de la colonne d'eau au voisinage du fond est un pré requis, une association du CEREVE au projet est indispensable.

Equipe porteuse du projet : LGE Paris 7

Coordination

Ce projet est coordonné par **A. Groleau** (MC, LGE Paris 7)

Chercheurs LGE impliqués

A Groleau, E Viollier B Deflandre, D Jézéquel

Partenaires

CEREVE : B. Tassin, B. Vinçon-Leite

CARRTEL : J. Poulenard, J.M. Dorioz

EDYTEM CNRS : F. Arnaud

CISALB : G. Paolini, C. Girel

3.5.4. Un site associé:

le lac Pavin, terrain modèle pour l'étude de la structure et du fonctionnement des communautés microbiennes des écosystèmes lacustres

Le lac Pavin est un terrain exceptionnel participant au dispositif de recherche mis en place par le Laboratoire de Biologie des Protistes - UMR CNRS 6023 - Université Clermont II. Ce site représente un terrain modèle dont la connaissance participe à la cohérence scientifique et à l'animation de l'ORE .

L'équipe du laboratoire de biologie des protistes traitant de la relation entre la structure des communautés microbiennes et leurs fonctions dans l'écosystème lacustre, elle constitue de fait un partenaire potentiel privilégié pour les études de processus menés dans le cadre de l'ORE. Le partenariat sur des objectifs précis relatif à ce projet d'ORE, reste à bâtir mais des collaborations étroites existent depuis plusieurs années entre les différentes équipes requérantes de l'ORE sur des projets qui concernent à la fois le lac Pavin et les lacs alpins (ANR Metapro, projet ECCO Virulac, etc). Ce projet de « site associé » permettra donc une véritable **mise en réseau** et renforcera les collaborations existantes.

Le site

En raison de son origine volcanique, le lac Pavin présente une valeur de creux élevée et les brassages saisonniers n'affectent que la partie supérieure de la colonne d'eau, le mixolimnion, qui s'étend de 0 à 60m. La partie profonde du lac (60 à 92m) n'est donc jamais mélangée et constitue une zone anoxique permanente. La chémocline s'étend entre 60 et 70 m et la zone inférieure (70-92m) constitue le monimolimnion. Cette originalité fait du Pavin l'unique représentant des lacs méromictiques en France.

Les travaux de l'équipe (voir bibliographie)

Ils concernent la caractérisation, les facteurs de régulation et la signification fonctionnelle de la diversité microbienne des écosystèmes aquatiques et notamment, des systèmes lacustres. La diversité est étudiée à différents niveaux infraspécifique, spécifique et fonctionnel dans le cadre conceptuel du fonctionnement des réseaux trophiques. Les travaux ont trait aux zones oxiques et anoxiques, permanentes ou temporaires, de lacs auvergnats ou sub-alpins.

Les efforts de recherche portent sur :

- l'étude, à l'aide de biomarqueurs, des flux de matière et d'énergie dans les écosystèmes aquatiques dans le cadre de l'étude de la diversité fonctionnelle des réseaux trophiques,
- la caractérisation, *in situ* et dans des conditions contrôlées, des activités virales et de leur impact sur le fonctionnement des communautés microbiennes,
- l'étude du rôle des particules détritiques dans la structuration spatiale et fonctionnelle des communautés microbiennes,
- l'étude quantitative, qualitative et fonctionnelle du picoplancton procaryote et eucaryote des zones oxiques et anoxiques des milieux lacustres,
- l'étude *in vitro* des métabolismes et de la physiologie de microorganismes exerçant des fonctions majeures dans la zone anoxique permanente d'un lac méromictique

Des recherches relatives au mixolimnion et à la biogéochimie des milieux profonds et anoxiques

Dans le mixolimnion, les travaux concernent la nature, l'abondance et les fonctions des différentes communautés de microorganismes (archaea, bactéries, protistes, champignons, micrométazoaires) et des virus.

Dans le monimolimnion, les études géochimiques ont permis de mettre en évidence l'accumulation de métabolites finaux de la dégradation anaérobie de la matière organique (CH_4 , CO_2 , H_2S). Contrairement aux autres écosystèmes lacustres, les paramètres physico-chimiques ne présentent pas de variations saisonnières, annuelles ou pluriannuelles. D'une façon générale, les résultats antérieurs font apparaître la réelle complexité du fonctionnement de la zone anoxique du Pavin où la plupart des métabolismes terminaux de la fermentation de la matière organique s'y retrouvent et y sont vraisemblablement en forte interaction. Les différents mécanismes microbiens résultent de la diversité des accepteurs d'électrons et de l'extrême diversité des niches écologiques présentes. A la complexité des métabolismes finaux des fermentations s'ajoute l'oxydation anaérobie du méthane par un mécanisme qu'il nous reste à préciser mais dont les retombées, alliées à celles de l'étude de la réduction dissimilatrice du fer, sont prometteuses aussi bien au plan cognitif qu'au plan des applications dans le domaine de la gestion de l'environnement.

Perspectives et relations envisagées avec les travaux conduits sur les lacs alpins

Les perspectives de recherche à moyen terme de l'équipe, **sur lesquelles pourront s'établir des collaborations étroites avec les travaux conduits sur les lacs alpins**, sont situées dans le domaine de la microbiologie environnementale et concernent l'étude :

- i) du picoplancton de la zone euphotique des milieux lacustres, à la fois sur un plan génomique, métagénomique et fonctionnelle ;
- ii) de la diversité et de l'importance fonctionnelle des virus et des microorganismes encore largement méconnus dans les milieux lacustres oxiques et anoxiques (Archaea, Chytrides, ...);
- iii) de la diversité des flux de matière et d'énergie dans les réseaux trophiques aquatiques.

Plusieurs publications impliquant divers partenaires de l'ORE et cette équipe sont citées dans l'annexe bibliographique par équipe.

Chercheurs et enseignants-chercheurs de l'équipe

Amblard C. DR CNRS, Bec A. MC, Bourdier G. PR, Carrias J.F. MC, Charpin M. MC, Debroas D. Pr, Desvillettes C. MC, Dévaux J. Pr, Fonty G. DR CNRS, Latour-Duris D. MC, Sean K. MC, Simé-Ngando T. DR CNRS.

3.6. Perspectives et ouvertures pour l'ORE

Le projet d'ORE déposé organise un ensemble de recherches complémentaires relatives aux lacs profonds péri-alpins. La structure scientifique proposée est bien entendu perfectible et s'affinera. Des développements et des intégrations entre projets sont prévisibles. On peut en particulier citer le développement, à organiser, de projets de paléo-limnologie pour retracer certains fonctionnements des écosystèmes et des évolutions dans les relations bassin –lacs. A terme l'ambition sera de réaliser un volet 1 limnologie prenant en compte des changements d'état sur un pas de temps bien plus large qu'actuellement. Un renforcement des suivis physiques est aussi d'actualité, avec possibilité de tester de nouveaux dispositifs permanent. Le comité scientifique (voir p. 61) pilotera et hiérarchisera les maturations qui s'avèreront indispensables.

Certaines déclarations d'intérêt ou propositions émises lors de l'animation scientifique associée à l'élaboration du présent document ORE, n'ont pas pu être intégrées faute de temps pour suffisamment les élaborer et les mettre en cohérence avec le réseau existant. Trois d'entre elles sont brièvement présentées par le tableau 2. Quelques compléments sont disponibles dans l'annexe 2 du document. Elles expriment une potentialité pour de nouveaux développements et partenariats susceptibles de compléter l'ORE dans un futur proche. Le comité scientifique se prononcera sur ces orientations.

Tableau 2 : projets potentiels

Titre	Thème	Porteur	Partenariat envisagé
<i>Ecologie de la conservation : une espèce emblématique face aux conséquences du changement global.</i>	valider une ingénierie de la conservation / réhabilitation d'une ressource naturelle exploitée et ce dans un contexte d'écosystèmes non stabilisés	INRA CARTEL Champigneulle (IR INRA)	Chercheurs CARTEL Gillet, Guillard Réseau européen Charr net (http://www.charrnet.org/).
<i>Erosion et transferts hydro-sédimentaires de matières organiques</i>	Caractérisation des différents types de matières organiques totales et de la variabilité de s flux apportés à un système lacustre, par un bassin versant	UMR CNRS M2C, Université de Rouen, (<u>Y. Copard</u> , MC)	UMR CNRS M2C, Université de Rouen, (<u>Y. Copard</u> , et D. Sebag), CARTEL (Poulenard , Dorioz, Trevisan)
<i>Etude des peuplements de mollusques des trois lacs Annecy, Bourget et Léman</i>	Biodiversité	CEMAGREF Lyon Jacques Mouthon (CR CEMAGREF)	biologie des écosystèmes aquatiques Cemagref Lyon

4. DISPOSITIFS ET PROTOCOLES D'ACQUISITION des CHRONIQUES LIMNOLOGIQUES

4.1. Grandeurs mesurées dans le volet 1 Limnologie

Les principales mesures et analyses nécessaires à un suivi limnologique complet sont déjà effectuées dans le contexte du suivi de la qualité des eaux du lac Léman (travaux de la CIPEL). L'enjeu est donc aujourd'hui d'étendre et adapter les protocoles de suivis limnologiques de ce lac à ceux d'Annecy et du Bourget, afin d'aboutir à un dispositif d'ensemble (prélèvements, analyses, etc) normalisé et harmonisé donc comparable et répétable (Tableau 3). L'organisation en ORE se traduira par une généralisation de la démarche d'assurance qualité (cf 4.3), déjà en place au laboratoire de Chimie de l'INRA, et en cours d'extension pour les autres laboratoires de recherche et services de l'unité (responsable : J. Lazzarotto).

Tableau 3 : Variables d'état et caractéristiques générales des suivis limnologiques

Variables d'état	Mode d'acquisition caractéristiques		Périodicité	Etat actuel des suivis
Température Oxygène dissous Conductivité	Sonde multiparamétrique	Continue sur la colonne d'eau	Mensuelle (en hiver) à bimensuelle (du printemps à l'automne)	LEMAN <i>Tous protocoles déjà en œuvre</i>
Transparence	Disque de Secchi	Zone euphotique		
Lumière	Système LICOR	zone euphotique		
Chimie de base	Prélèvement d'eau	Ponctuels à diverses profondeurs		ANNECY <i>(A développer pour ORE)</i>
Production primaire	Prélèvement d'eau (C14)	Ponctuels à diverses profondeurs		BOURGET <i>à développer pour ORE</i> <i>-zooplancton</i> <i>-production primaire</i>
Pigments Chlorophylle Chlorophylle <i>a</i>	Sondes multiparamétrique et spectro-fluorimétrique	Continue colonne d'eau		pas de sonde spectro-fluo pour le lac d'Annecy

Phyto- et Zooplancton	Prélèvement d'eau Prélèvements filet	Ponctuels à diverses profondeurs Echantillons intégrées		
POISSONS Abondances (corégone, omble, truite et perche) Contamination (Micropolluants et métaux)	Statistique de pêche Périodes de frai	Echantillons	Mensuelles et annuelles Bi-annuelle	Suivi actuellement sur Léman et Annecy et à un degré moindre au Bourget
SEDIMENTS -Communauté biologique -Teneurs en phosphore micropolluants organiques et métaux lourds (charge interne)	Prélèvements Carottage et benne à sédiments	Surface	Annuels Tous les 5 ans	<i>Léman uniquement</i> Léman, Bourget
BASSIN VERSANT -Charge externe en nutriments -Relations concentrations – débits	Mesures des débits et flux aux exutoires des affluents	Prélèvements d'eau continus	Analyses hebdomadaires Flux annuels	<i>Dispositif uniquement Léman et Bourget (sous réserve)</i>

4.1.1. Variables d'état du compartiment « Lac »

Les caractéristiques limnologiques de base, c'est-à-dire les grandeurs physico-chimiques, sont mesurées lors de 20 campagnes annuelles, sur toute la colonne d'eau, au centre du lac. Les analyses chimiques prévues sont énumérées dans le tableau 4 ci-dessous.

Les caractéristiques biologiques, c'est-à-dire la composition et l'abondance du phytoplancton et du zooplancton, la production primaire, la production bactérienne, le sont également lors de

20 campagnes annuelles, sur les 20 et 50 premiers mètres (pour la production bactérienne) respectivement, au centre du lac.

Les caractéristiques halieutiques seront décrites par les statistiques de captures à l'échelle annuelle.

La contamination des eaux et de certains poissons par des micropolluants (métaux dits lourds et micropolluants organiques), est mesurée deux fois dans l'année à des périodes clefs.

4.1.2. Variables d'état du compartiment « sédiment »

La qualité des sédiments (biologie, phosphore, micropolluants organiques et métaux lourds) est mesurée tous les 5 ans pour la biologie et moins fréquemment pour la chimie. Ces prélèvements sont réalisés à des endroits stratégiques sur le Léman (point central du lac, berges, embouchures, etc.) et plus globalement pour le Bourget .

Tableau 4: Principales analyses physico-chimiques sur l'eau (L=lac; affluent=BV)

	Paramètres	
NH_4^+	Azote Ammoniacal	L, BV
NO_2^-	Azote Nitreux	L BV
NO_3^-	Azote Nitrique	L BV
Npart, Cpart	Azote particulaire, carbone particulaire	L
Ca	Calcium	L BV
COD	Carbone Org dissous	BV
COT	Carbone organique total	L
Cl^-	Chlorures	L BV
	Conductivité Brute	L BV
Mg	Magnésium	L BV
MesT	Matières en suspension (MeST)	L BV
pH	pH	L BV
PO_4^{3-}	Phosphore Orthophosphate	L BV
Ppart	Phosphore Particulaire	L
K	Potassium	L BV
SiO_2	Silice Réactive	L BV
Na	Sodium	L BV
SO_4^{2-}	Sulfates	L BV
TAC	TAC (Titre alcalimétrique complet)	L
Ptot EF	Phosphore total filtré	L BV

4.1.3. Variables d'état du compartiment « Bassin versant »

Il s'agit de mesurer les flux de nutriments et de métaux lourds, c'est-à-dire des relations entre concentrations et débits. Il est bien sûr impossible de mesurer de façon continue et exhaustive sur le long terme (10-15 ans) les flux transférés sur tous les affluents des 3 lacs. Le bassin versant du lac Léman étant équipé dans cette optique, l'effort d'obtention d'une bonne approximation de la charge externe existe d'ores et déjà et sera maintenu pour ce lac. Les 6 principaux affluents sont suivis en continu sur la base d'échantillons moyens proportionnels aux débits (suivi CIPEL). Dans ce contexte, les bilans de masse sont faisables et interprétables en terme d'évolution de l'environnement. Pour le Bourget une réflexion est en cours avec le CISALB.

4.1.4. Variables de forçages (pour tous les lacs)

- Climat (Météo France)
- Dépôts atmosphériques (Gestionnaires de Lacs) – Bourget, Léman, Annecy.
- Mode d'occupation des sols et assainissement (SIG) – Léman, Bourget, Annecy.

L'accès à l'ensemble de ces données n'est pas encore acquis pour les trois lacs.

4.2. Grandeurs mesurées spécifiques au « volet 2 »

Le volet 2 comprend 2 projets qui nécessitent un renforcement des suivis et des analyses spécifiques. Ces besoins sont récapitulés dans le tableau 5.

Tableau 5: Principales caractéristiques des prélèvements des projets 1 et 2.

Intitulé	Renforcements nécessaires	Variables spécifiques	Remarques
Projet 1 Contribution et rôle fonctionnel des diverses sources de COD au réseau trophique pélagique	- o Echantillonnages <i>in situ</i> : Stations supplémentaires - en zone littorale (lors des transect entrée-centre du lac) - au niveau des affluents et exutoire - o Analyses chimiques supplémentaires liées notamment à la caractérisation des MO - o Dans la phase 2 du projet - Réalisation d'approches expérimentales <i>in situ</i> - Réalisation de Mesures de production, taux de croissance	- Caractérisation des matières organiques : - o Spectrofluométrie 3D (analyses des données par PARAFAC) - o chromatographie d'exclusion stérique (CES) - Dosages du Carbone Organique Dissout (fraction <0.22µm) - Supplément d'Analyses concernant les paramètres chimiques 'standards' : N, P, différentes formes ioniques	CES : analyse effectuée au laboratoire EDYTEM (U. de Savoie)
Projet 2 Rôle des communautés planctoniques et des processus physiques dans la dynamique du phosphate du métalimnion	- o Echantillonnages <i>in situ</i> : - Renforcer la fréquence temporelle de l'échantillonnage au printemps et en été - Affiner le profil vertical en rajoutant des points d'échantillonnage aux profondeurs clé (métalimnion et haut de l'hypolimnion)	- Dosage des nutriments, de l'oxygène, (protocole CIPEL) - Températures - Turbulence - Mesure des productions primaires et bactériologiques aux différentes profondeurs échantillonnées	La partie biologique sera effectuée au laboratoire de Thonon et la partie courantologie/ processus physiques sera prise en charge par les

	- o Mesure en continu sur une journée par mois, des paramètres physico-chimiques et des mouvements des masses d'eau ? - o Analyses biologiques supplémentaires liées à l'abondance et la production bactérienne Pièges à sédiments et caractérisation du phosphore colloïdal	Nature des colloïdes, spéciation, pouvoir fixateur des colloïdes, biodisponibilité, tests enzymatiques	collaborateurs
--	--	---	-----------------------

4.3. La Démarche Qualité et la maîtrise de la méthodologie du suivi

La direction de l'Unité a nommé un animateur qualité et un groupe de travail Qualité avec un membre de chaque équipe, ce groupe de travail fait progresser la Démarche Qualité à l'UMR. La politique qualité de l'UMR a été définie avec la Direction et l'animateur qualité afin que l'ensemble de l'UMR satisfasse le Référentiel INRA. L'UMR va d'ailleurs être audité par la Mission Qualité de l'INRA en fin 2007.

Le laboratoire d'analyses physico-chimique, qui effectue le suivi de la chimie minérale de lacs et rivières (environs 3000 échantillons et 30000 analyses par an), a été le précurseur de la démarche qualité à l'UMR, l'ensemble des équipes a ensuite suivi la démarche qualité entreprise.

L'état d'avancement selon le Référentiel INRA niveau 1 est pour:

- ♦ Ensemble de la Station : de l'ordre de 50 % ;
- ♦ Laboratoire de chimie : de l'ordre de 90 % .

Le renforcement de l'engagement de la Station dans une démarche « Assurance Qualité » est devenu nécessaire afin d'assurer la traçabilité et la reproductibilité des méthodes de mesures et d'analyses dans le cadre des suivis de longue durée de l'ORE et de valider la fiabilité des résultats des analyses et des mesures. Ainsi, dans un but de coordination et d'amélioration des mesures et interprétations dans le cadre de l'ORE, deux axes de la Démarche Qualité ont été priorités :

- ♦ L'uniformisation et la validation de la documentation qualité (les modes opératoires et les procédures) de chaque processus : échantillonnage, transport, analyse à l'enregistrement ;
- ♦ La détermination ou l'estimation des incertitudes et variabilités de chacun des processus (analyses chimiques, comptages...) entrant dans l'ORE.

Ainsi la traçabilité, la répétitivité, la reproductibilité et la justesse des analyses seront assurées et connues et les techniques et stratégies d'échantillonnage seront détaillées et répétables pour chaque lac. La bonne connaissance des incertitudes de chaque processus permettra une meilleure compréhension et interprétation des chroniques obtenues. Une réflexion est engagée afin d'estimer ces incertitudes dans les études des différents compartiments biologiques (comptages du plancton, virus,...). La traçabilité est assurée à chaque niveau d'acquisition et au final par la base de données ORE avec une incrémentation des résultats et une actualisation des méthodes utilisées.

La Démarche Qualité de l'UMR CARRTEL permettra à terme de garantir la reproductibilité des méthodologies d'échantillonnage ainsi que l'exactitude avec une incertitude connue des résultats obtenus. Les données seront donc comparables entre elles pour les 3 lacs et aussi avec d'autres lacs suivant les mêmes méthodologies.

Enfin, par deux fois déjà (sept 2003 et sept 2005), le **site de l'ORE a réuni 11 laboratoires internationaux à une session d'inter calibration** des sondes multi paramètres physico-chimiques et fluviométriques ce qui montre l'attraction et la capacité logistique du site ainsi que l'engagement du laboratoire pour l'assurance qualité.

(<http://www.thonon.inra.fr/symposium/colloquechimie/pagepresentation.htm>)

Coordination

L'Assurance qualité est coordonnée par J. Lazzarotto (AI INRA).

5. LES BANQUES DE DONNEES

Le cahier des charges de l'ORE implique les moyens techniques et analytiques pour l'obtention des chroniques de longue durée, la constitution et la gestion de banques de données, le stockage et l'archivage d'échantillons de référence (algorithme, salle de collection des échantillons de zooplancton et de phytoplancton, écailles de poissons). L'accès à la base de données et aux infrastructures est ouvert aux partenaires de l'ORE selon la charte d'accès établie.

5.1. Durée minimum d'observations

Compte tenu des processus et de la taille des systèmes, il est nécessaire d'envisager un suivi limnologique (volet 1) sur 10 ans. Il est normal de signaler ici que l'intérêt des gestionnaires pour connaître et prévoir les évolutions de leurs lacs, laisse présager une participation financière de leur part pour cette durée affichée (les suivis sont actuellement tous sous la forme de contrats de recherche).

5.2. Base de données et disponibilité de l'information

5.2.1. Archives

Les données anciennes sur le suivi des lacs étaient disponibles soit sous forme papier, soit sous forme de fichiers dans des formats informatiques divers et parfois obsolètes. Un premier travail en 2003 et 2004 a permis de référencer l'existant auprès des scientifiques, de distinguer les thèmes de données, de séparer les métadonnées des données de suivis et de construire une première maquette de base de données.

En 2005, le rapprochement avec le GIP Médias-France permet de redéfinir la base de données en conformité avec les bases ORE existantes. En effet la modélisation et la réalisation de la base ORE Lacs prend comme point de départ le schéma générique des bases de données ORE gérées par Médias-France. La réalisation d'un dossier d'expression des besoins puis du dossier de spécification, conduit à la réalisation du Modèle Conceptuel de Données (MCD) et du Modèle Physique de Données (MPD).

Parallèlement, la base de données de l'algorithme (collection de micro-algues vivantes du laboratoire) voit le jour. Elle est conçue pour permettre aux usagers de connaître les caractéristiques de l'espèce qu'ils vont utiliser. Enfin, une base de données documentaires nommée « baddoc », accessible en interne mais aussi à nos partenaires sur le site internet du laboratoire, facilite l'accès à toutes les publications et ouvrages détenus à la station.

5.2.2. Structure et support

La base de données (Fig. 4) des suivis est développée sous *postgresql* et se trouve sur un serveur dédié de notre laboratoire sous linux *debian sarge* (choix préconisés par l'INRA). Elle est composée de données brutes validées par les scientifiques responsables du champ de données. L'application développée est composée :

- Des bases de données production et consultation (actuellement identiques),
- D'un site FTP où sont déposées et stockées les données,
- D'outils de validation, insertion, suppression, modification, extraction et consultation,
- D'une interface Web pour gérer l'insertion ou pour consulter les données.

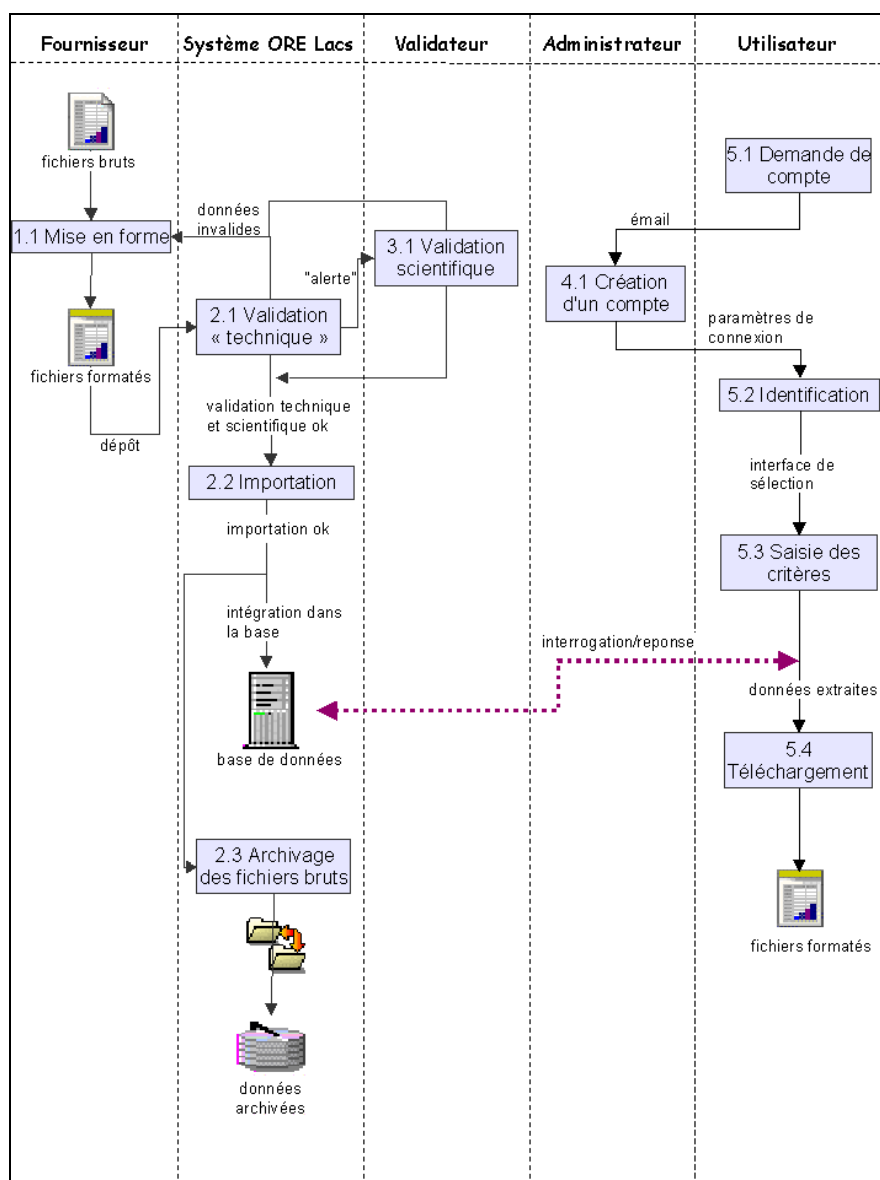


Figure 4 : Principe de fonctionnement de la base de données ORE Lacs

5.2.3. Les données en présence, leur qualité et accessibilité

La plupart des données anciennes (< 2005) ont été financées par des organismes publics et dans le cadre de contrats de prestation de service, avec validation d'une commission scientifique. Tous les contrats (Léman, Annecy, Bourget) ont été renégociés en 2006 pour devenir des contrats de recherche. Nous sommes copropriétaires des données des suivis limnologiques.

Les thèmes qui composent la base de données sont ceux relatifs aux suivis des lacs (phytoplancton, zooplancton, poisson, physico-chimie, etc.). Des métadonnées (données permanentes associées à la mesure) doivent être au préalable renseignées telle que : les plateformes de prélèvement (géo référencées), le type de site, les outils de mesures, la liste des paramètres, les unités, les taxons en présence, leurs propriétés, etc. Les données en présence sont d'une part des données obtenues *in situ* comme la météo, les données sondes donnant des profils sur toute la profondeur du lac (pH, T°, turbidité, transparence, fluorescence, etc.) et d'autre part des données issus de comptages ou d'analyses, obtenues en

laboratoire à partir des prélèvements. On retrouve dans ce groupe toutes les données physico-chimiques, la production primaire, les données sur le phytoplancton, le zooplancton, sur le bactério et viro-plancton, le suivi annuel des poissons pêchés. Les données de la base sont **des données brutes, scientifiquement et techniquement validées**. Un effort important a été fait pour reprendre les anciens fichiers des chercheurs, les valider et les mettre dans un format compatible avec ce que la base attend. A ce jour, on dénombre environ 3 millions de données, toutes données confondues.

❖ **Qualité des données**

Chaque scientifique doit valider ses données avant de poser un nouveau fichier sur le site de transfert. Les données étant pratiquement toutes incluses dans des contrats de recherche et obtenues en copropriétés, une commission scientifique rattachée à chacun des contrats valide aussi annuellement ces données. Enfin, la station est fortement engagée dans les procédures d'Assurance Qualité.

❖ **Accessibilité et charte d'accès**

La base de données et son menu d'extraction sont en cours de test en interne par l'administrateur dans un premier temps et doivent très prochainement pouvoir être testés par les utilisateurs. Dans un avenir proche nous souhaitons pouvoir donner accès à des données élaborées (moyenne, représentation graphique) sur un portail internet dédié à l'ORE. Une charte d'accès (en annexe x) aux données a été écrite, mais non entièrement validées à ce jour. Dans l'immédiat la personne souhaitant accéder aux données doit remplir un formulaire de demande (Nom personne - laboratoire/entreprise demandeur - quelles données - quelles dates) avant accord et transmission des données. Tout en permettant ainsi une traçabilité de la demande, ce document nous permet une correspondance avec nos partenaires copropriétaires des données.

5.3. Autres Bases de données « chimie », « algotek » et « baddoc »

5.3.1. BDD «Chimie»

Une base de données spécifique au laboratoire de chimie a été créée et alimente la base ORE. Cette base permet tout à la fois de rentrer les valeurs de mesures, mais aussi de gérer les demandes d'analyses des utilisateurs et au besoin leur facturation. Un autre intérêt de cette base pour l'ORE est qu'elle comprend la gestion informatisée des produits du laboratoire et de leurs stocks, ce qui rentre tout à fait dans la démarche qualité.

5.3.2. BDD « Algotek »

La station de Thonon dispose d'une algorithèque de référence, autrement dit d'une collection de plus de 300 micro-algues vivantes. La base de données informatisée développée pour cette algorithèque est un véritable outil de saisie, de consultation et de recherche. Accessible aux usagers de l'algorithèque, elle renseigne pour chaque algue la taxonomie, la taille, la date et lieu de prélèvement, le maintien en culture, la photo de l'algue, etc.

5.3.2. BDD « Baddoc »

Le fond documentaire (ouvrages et publications) de la station est lui-même référencé et accessible dans une base de données « baddoc », avec plus de 12400 références. Cette base est accessible sur internet (<http://www.thonon.inra.fr/station/publication/publications-frame.htm>)

et a pour mission actuelle de se centrer sur les références liés aux 3 lacs de l'ORE (responsable V. Mottin).

5.4. Salles de collections

Outre l'algothèque décrite ci-dessus, d'autres collections seraient à envisager ou à réorganiser. Il s'agit en particulier des échantillons d'écailles et des échantillons biologiques prélevés lors de suivis. C'est le cas par exemple des échantillons de zooplancton et de phytoplancton, qui représentent un total de plus de 4000 échantillons. Cette collection présente actuellement une croissance importante avec plus de 210 échantillons nouveaux par an. Le but de la salle de collection est de sauvegarder, organiser, maintenir en bon état et valoriser ces échantillons. Les échantillons de la collection et les comptages effectués permettent d'obtenir une idée de l'état biologique du lac, de son statut trophique à un moment donné et d'avoir une vision globale de son évolution. L'application récente des méthodes isotopiques aux écailles archivées à l'UMR CARRTEL a montré **la valeur scientifique des collections** à long terme pour mener les études rétrospectives sur les modifications fonctionnelles des lacs en réponse aux perturbations (Perga et Gerdeaux 2003 ; Gerdeaux et Perga 2006). Pour les échantillons formolés, les développements de la biologie moléculaire ainsi que d'autres techniques modernes (isotopes, Maguire et Grey, 2006) ouvrent des potentialités de valorisation de ces échantillons qui constituent une collection d'une importance patrimoniale remarquable. A ce jour, cette collection est unique en France.

La gestion de la collection sera sous la responsabilité du directeur d'Unité, gérée directement par L. Lainé (TR). Travaillant sur le zooplancton et disposant de solides connaissances en phytoplancton, L. Lainé suivi en septembre 2006 un stage CNRS sur « la Gestion des Collections ». L'organisation de la collection sera également liée directement à la base de données ORE, chaque prélèvement étant identifié dans cette base, d'où un accès aux données disponibles, sous la responsabilité du gestionnaire de la collection. La collection contribue à la démarche qualité et permet la traçabilité.

La collection devrait jouer un rôle primordial dans l'ORE puisqu'elle fournit :

- un accès facile aux échantillons de base depuis le début des suivis ;
- la possibilité de revenir sur d'anciens échantillons dans le but de réaliser des vérifications, ou de les utiliser dans le cadre de nouvelles problématiques ou de nouvelles techniques d'analyse ;
- une valorisation du patrimoine de l'Institut auprès des étudiants et des chercheurs, dans le cadre de l'ORE ou de partenariats internationaux.

Coordination

La responsabilité et la coordination des bases de données du projet ORE sont confiées à G. Monet (IR INRA).

6. FONCTIONNEMENT BUDGETAIRE ET HUMAIN (PREMIER CADRAGE)

6.1. Fonctionnement et équipement

6.1.1. Coût actuel du suivi relatif au volet 1 : moyens à disposition de l'ORE

Fonctionnement:

Actuellement, l'unité réalise une part des travaux du suivi limnologique dans le cadre de contrats passés avec les collectivités impliquées.

Le montant annuel de ces contrats est de :

- 105 k€ HT pour le lac Léman,
- 49 k€ HT pour le lac d'Annecy,
- 23 k€ HT pour le lac du Bourget.

Les coûts apparaissant dans ces contrats correspondent aux coûts de fonctionnement (Tous prélèvements, mesures et comptages confondus) majorés d'environ 25 %. S'ajoutent à ces contrats des ressources moins pérennes sur des programmes spécifiques.

Équipement et maintenance

Afin d'en simplifier la présentation et sans être exhaustif, nous allons présenter (Tableau 6) les coûts d'équipement en regroupant le matériel en 4 grandes parties ; l'équipement de prélèvement, l'équipement de comptage (production primaire, phytoplancton, bactério-viro plancton, zooplancton), l'équipement du laboratoire de physico-chimie et l'équipement informatique serveur base de données. Le coût de maintenance est calculé sur 1 an.

Tableau 6: coût et maintenance des équipements de l'ORE.

Type d'équipement	Coût d'équipement	Durée de vie	Coût de maintenance/an
PRELEVEMENTS : Bateau + remorque Radars- gps - accastillage-treuils bouteilles – filets- pompe- etc. Véhicule pour tracteur Sondes	270 k€ ht	15 à 25 ans	4 k€ ht
COMPTAGES Compteur à scintillation cytomètre en flux microscope caméras numériques moniteur autoclave étuve centrifugeuse Ordinateurs dédiés, etc.	237 k€ ht	10 à 25 ans	4 k€ ht
PHYSICO-CHIMIE	235 k€ ht	5 à 10 ans	8 k€ ht

Analyseur Ntotal - chromato ionique - titration, ph conductivité - spectrométrie absorption atomique – analyseur de carbone- spectrophotomètre UV – colorimétrie en flux continu - Machine à laver			
INFORMATIQUE Serveur + sauvegarde	4 k€	5 ans	5 k€
Total :	746 k€ HT		21 k€

6.1.2. Moyens supplémentaires nécessaires pour le volet 2

Les fréquences des campagnes des suivis limnologiques (volet 1) sont trop faibles à certaines périodes de l'année (printemps, été) pour assurer les prélèvements indispensables aux projets du volet 2, qui nécessitent aussi des analyses spécifiques.

Le projet 1 (Matière organique) impose des prélèvements supplémentaires sur Annecy et le Léman (10 k€/ an sur 5 ans) ainsi que des analyses complémentaires (cf Tableau 5). Le projet 2 suppose de renforcer les campagnes estivales sur le Léman (6 campagnes prévues soit 15 k€). La part d'autofinancement sur ces deux projets est de 50 %.

6.1.3. Projet associé : financé par ailleurs en partie et compléments demandés

Les projets du volet 3 sont en grande partie financés sur des crédits extérieurs (ANR, Région, ...). Ils bénéficieront d'un soutien logistique et analytique de la part de l'ORE correspondant à 10 k€ /an.

6.1.4. Contribution totale demandée

L'ensemble est évalué à 32 k€ / an.

6.2. Les moyens humains

6.2.1. Le personnel CARRTEL participant à l'ORE (Tableau 7)

Tableau 7: personnel de l'UMR impliqué dans l'ORE.

Organisme d'appartenance	Fonction	Nbre et grade	Temps travail
UMR CARRTEL INRA	Prélèvements et entretien bateau	3 TR	1.4
UMR CARRTEL INRA	Chimie (analyses, entrée des données en base)	2TR	1.35
	Vaisselle	1 AJT	0.80
	Encadrement gestion labo rapports etc	1AI	0.80
UMR CARRTEL INRA	Comptage et détermination autres (prod primaire, phytoplancton, bactério, zooplancton, poisson)	2 TR	1.15
		2 IE	0.75
UMR CARRTEL INRA	Algothèque, chambre de culture, salle de collection	2 TR	0.8
UMR CARRTEL INRA-Université Savoie	Contrôle données, réunion, rapport + recherche	8 (DR/CR/IR/MC)	1.6 Volet 1 1.5 Volet 2
UMR CARRTEL INRA	Base de données système, mise en forme données etc	1 IR	0.5

6.2.2. Prévision de besoins éventuels

La mise en place de l'ORE suppose le maintien de l'équipe de prélèvements INRA à son niveau actuel ainsi que du personnel technique des laboratoires d'analyses chimiques et biologiques. Ceci suppose concrètement de prendre en compte les départs en retraite prévus : techniciens de laboratoire (algothèque, départ 2008), de prélèvements (2007 et 2010), de chimie (décès 2007).

A terme la coordination des infrastructures pourrait nécessiter un poste d'Ingénieur d'Etude en appui au responsable scientifique.

7. FONCTIONNEMENT et charte de l'ORE

La charte a été élaborée à partir de chartes existantes dans d'autres ORE

7.1 Préambule

L'Observatoire de Recherche en Environnement «Grands Lacs Subalpins » a *de facto* comme missions :

- (i) de mettre en place et de gérer un dispositif expérimental en partie mobile (bateau) visant à étudier l'impact des pressions anthropiques locales (pollution, urbanisation, mise en place des politiques d'assainissement) et globales (pollutions atmosphériques, climat, invasions biologiques) sur les écosystèmes lacustres dans l'objectif de suivre, comprendre et *in fine* modéliser, les dynamiques d'écosystèmes lacustres ;
- (ii) de recueillir et d'enregistrer l'ensemble des données pertinentes permettant de suivre et d'interpréter la dynamique d'évolution de l'écosystème en fonction des contraintes de gestion anthropique appliquées ;
- (iii) d'accueillir sur ces sites expérimentaux les équipes de recherche compétentes pour l'étude des processus qui sont à la base de l'évolution de l'écosystème ;
- (iv) de constituer des bases de données, accessibles à la communauté scientifique nationale et internationale, permettant d'établir les chroniques d'évolution des différentes variables d'état de l'écosystème et de caractériser la biodiversité interne du système ;
- (v) de constituer des collections d'échantillon d'algues et d'eau en vue d'analyses complémentaires futures.

Ces missions sont constitutives d'un ORE. De celles-ci doivent donc découler (i) la structure opérationnelle de l'ORE, et (ii) les droits et devoirs des équipes de recherche partenaires.

7.2. Le dispositif opérationnel : comité technique

Ce dispositif est constitué par l'ensemble des personnels mis à disposition de l'ORE soit à plein temps, soit à temps partiel par les différents organismes de recherche gestionnaires de l'ORE (ici l'INRA). Ces personnels, nommément identifiés, sont affectés dans une unité INRA (CARTEL) qui gère leur carrière administrative, mais sont placés scientifiquement sous la direction du responsable de l'ORE. Chacune de ces personnes est responsable d'une tâche bien spécifique. L'ORE est doté d'un Comité Technique, placé sous l'autorité d'un responsable, qui est chargé de coordonner l'ensemble des activités de gestion, de mesures, de maintenance du dispositif expérimental. Ce Comité Technique rassemble l'ensemble des personnels affectés à l'ORE ainsi que le responsable de l'unité qui les encadre. Ce Comité Technique se réunit de 1 à 2 fois par an. Au-delà de ces personnels affectés à l'ORE, d'autres personnes du CARTEL peuvent être amenés à intervenir occasionnellement. Ces interventions auront lieu sous l'autorité du Comité Technique.

Le Comité Technique est supervisé et coordonné par le responsable scientifique de l'ORE. Le responsable scientifique répartit les budgets de fonctionnement et d'équipement du dispositif expérimental et est responsable de la mise en place d'une démarche « qualité » concernant l'acquisition et la gestion des données.

Le dispositif expérimental consiste en différents appareillages et protocoles permettant (i) l'acquisition de données sur les 3 grands lacs subalpins (Léman, lac d'Annecy, lac du Bourget) pour des mesures in situ, (ii) la prise d'échantillons, (iii) des mesures de laboratoire. Ces données en résultant sont implémentées dans la base de données par les différents personnels responsables, après vérification de leur cohérence, selon une procédure spécifiée par le responsable de la base de données ORE.

Proposition

Responsable du comité technique J. Guillard (IR INRA et DU Adjoint) avec l'appui de J. Lazzarotto (AI INRA) chargé de l'assurance qualité .

7.3. Comité Scientifique

Un Comité Scientifique de l'ORE est constitué afin d'aider le responsable scientifique à assurer le pilotage scientifique de l'ORE.

Ce Comité est constitué:

- (i) de représentants de la communauté de chercheurs partenaires de l'ORE désignés par les directeurs d'unités partenaires
- (ii) de chercheurs du CARRTEL désignés par le directeur de l'unité CARRTEL
- (iii) Chef de département EFPA INRA
- (iv) de personnalités extérieures.

Ce comité se réunit au moins une fois par an, ou plus si besoin.

Le Comité Scientifique décide et oriente la politique scientifique de l'ORE et assure une animation scientifique transversale. Il valide les projets scientifiques proposés par les différentes équipes partenaires impliquant directement l'utilisation des dispositifs expérimentaux de l'ORE. Il suscite des thématiques .

Le Comité Scientifique arbitre les conflits pouvant avoir lieu entre équipes de recherche partenaires de l'ORE ou entre celles-ci et la structure opérationnelle de l'ORE conformément à la présente charte.

Sa composition serait :

❖ Chercheurs CARRTEL (équipe animation)

❖ Chercheurs des équipes partenaires : JOP. Bravard Professeur (président de la ZABR), J.J. Delanoy (DR CNRS Edytem), C. Amblard (DR CNRS Un. Clermont-Ferrand), J. Perrodin (DR, ENTPE), B. Tassin (DR ENPC)

❖ Personnalités extérieures (à contacter) G. Lacroix (DR, CNRS), P. Curry (DR, IRD)

❖ Chef de département EFPA

❖ Invités permanents : délégués CIPEL, CISALB et SILA

7.5. Droits et Devoirs des Equipes de Recherche Partenaire.

Est considérée comme Equipe de Recherche Partenaire de l'ORE toute équipe qui en aura fait la demande auprès du Comité Scientifique en proposant un projet de recherche impliquant l'utilisation du dispositif expérimental ORE et qui verra son projet accepté.

L'acceptation d'un projet de recherche obéira à deux critères : (i) un critère de pertinence scientifique selon les objectifs scientifiques de l'ORE ; et (ii) un critère de faisabilité qui tiendra compte de la compatibilité technique du projet avec les autres investigations en cours et la maintenance du dispositif sur le long terme.

L'acceptation d'un projet de recherche implique *de facto* de la part de la structure opérationnelle de l'ORE une mise à disposition garantie d'espace expérimental ou d'échantillons correspondants pour les chercheurs de l'équipe partenaire. L'accès à toute l'information accumulée sur le dispositif ORE étant bien entendu acquise (voir « base de données »).

Les moyens d'investigation spécifique au programme de recherche sont à la charge des Equipes Partenaires, y compris la main d'œuvre nécessaire à l'acquisition de ces données, la structure opérationnelle de l'ORE ne fournissant qu'un appui logistique minimum.

L'intervention des Equipes Partenaires sur les dispositifs ORE, une fois les projets validés, devra faire l'objet d'une programmation concertée avec le responsable ORE. Aucune utilisation des dispositifs ne sera tolérée en dehors de ces programmations. Le Comité Scientifique arbitrera les conflits éventuels.

Lorsque les projets de recherche concernés sont soumis à un appel d'offre national ou international, l'ORE doit être partie prenante de ce projet et identifié comme partenaire de ce projet. A ce titre, dans la mesure du possible, un financement sera identifié pour contribuer au fonctionnement du dispositif. Le montant de ce financement devra être évalué au cas par cas en discussion avec le responsable scientifique de l'ORE. Le Comité Scientifique arbitrera les conflits éventuels.

7.6 Base de données et diffusion de l'information

❖ *Constitution de la base*

Cette base dite « de routine » est alimentée par les scientifiques qui ont obtenu ces données, après validation de leur part, ou par le responsable de la base sous couvert du scientifique responsable du champ thématique¹ des données.

Les données seront implémentées aussi régulièrement que possible au fur et à mesure de leur acquisition et vérification, et en accord avec les règles de propriété intellectuelle des projets qui ont financé leur acquisition (pour la plupart contrats avec la CIPEL, le SILA ou le CISALB. Les métadonnées associées permettront d'avoir accès aux conditions d'acquisition des données.

¹ Données de différents champs thématiques : Chimie – Phytoplancton – Bactério-viroplancton - Zooplancton – Poisson – mesures de terrain

❖ *Chargement et extraction des données*

Le chargement des données et l'interface d'extraction ne seront accessibles qu'après enregistrement du demandeur. Il recevra un login et un mot de passe et s'engagera à respecter la charte en signant le formulaire joint en fin de document.

Le demandeur s'engagera à ne pas utiliser ces données pour des publications sans en avertir le comité scientifique ou le membre du comité responsable du champ de données. Ce dernier déterminera quels auteurs des données devront être associés à la publication. En tout état de cause l'utilisation de ces données dans une publication devra impérativement être référencée : « Base de données SHL » plus le cas échéant, « Données CIPEL », « Données SILA », Données « CISALB ».

Différentes catégories de demandeurs sont recensées : les scientifiques du CARTEL, les chercheurs extérieurs (partenaires ou autres scientifiques), le grand public.

Les scientifiques du laboratoire rentreront et accéderont librement à leurs données propres. Pour obtenir d'autres données de la base, ils devront signer la présente charte.

Tout chercheur français ou étranger pourra accéder librement aux données de routine de plus de cinq ans sous réserve de signature de la charte. Le comité scientifique se réserve cependant le droit de ne pas communiquer les données s'il le juge nécessaire.

Les données plus récentes pourront être communiquées sous réserve d'acceptation par le comité scientifique.

Les équipes partenaires ayant acquis par collaboration des données spécifiques sur les dispositifs du laboratoire (ORE Lacs) auront un délai de cinq ans pour valoriser leurs données. Au-delà de ce délai, ces données devront être annexées à la base de données dite « de routine » et devront par conséquent être disponibles pour tout chercheur français ou étranger.

❖ *Site web et diffusion de l'information*

Dans le cadre de la constitution d'un ORE (Observatoire de Recherche en Environnement), un portail d'accès internet sera réalisé. Le site web sera sous la responsabilité du responsable scientifique de l'ORE. Il servira de plateforme d'information autour de l'ORE LACS.

La liste des données disponibles sera présente ainsi que les coordonnées des scientifiques référents.

Le formulaire de demande d'accès aux données y sera disponible ainsi que la charte à signer.

Le grand public aura accès à l'information par le biais de données moyennées et graphiques.

Le comité scientifique pourra modifier la présente charte, les décisions modificatives devant être prises à l'unanimité des présents

8. INSERTION DANS LES RESEAUX DE RECHERCHE

8.1. Partenariat avec la ZABR (www.zabr.org)

La zone atelier du bassin du Rhône (label « Zone Atelier » du Programme Environnement Vie et Société du CNRS obtenu en Octobre 2001) représente la mise en réseau de nombreuses unités de recherche appartenant à 13 établissements de recherche (Université de Lyon, CNRS, CEMAGREF, ENTPE, INRA.....) et impliqués dans des travaux relatifs au Rhône et à son corridor fluvial. Elle rassemble une douzaine de disciplines: climatologie, écologie des hydrosystèmes fluviaux, économie, ethnologie, épidémiologie, géomorphologie fluviale, histoire des hydrosystèmes et des peuplements humains, hydraulique, hydrobiologie, hydrologie, physico-chimie des eaux, sociologie, etc. Les actions de la ZABR s'inscrivent dans le cadre d'une démarche d'aide à la décision publique en matière de **gestion durable des cours d'eau et de leurs bassins versants**. Elles consistent à mettre à la disposition des décideurs une méthodologie d'évaluation a priori des effets des opérations de réhabilitation des bassins versants sur le fonctionnement des hydrosystèmes fluviaux, en terme de biodiversité, de durabilité et d'usages potentiels.

Trois thématiques centrales de la ZABR sont particulièrement en adéquation avec le projet d'ORE: i) modification anthropiques des flux sédimentaires, ii) réponses des écosystèmes aquatiques et actions de restauration ii) évaluation de gains biologiques et écologiques associés à une réduction d'intrants polluants en milieux aquatiques.

La ZABR est un lieu reconnu d'animation scientifique inter-organismes et pluridisciplinaire. Elle constitue aussi une interface avec les utilisateurs de la recherche, gestionnaires, agence de Bassin RMC, élus. Le projet d'ORE participe à cette zone atelier. Il propose d'accueillir, susciter et soumettre des projets labellisés ZABR.

En terme scientifique l'ORE participera à la dynamique de la ZABR en apportant des compétences scientifiques peu représentées et en rendant possible une approche globale à l'échelle continentale, d'un **système fleuve** dont l'une des caractéristiques est précisément d'être fortement piloté par des relations avec des grands lacs profonds (le Léman modifie totalement la dynamique fluviale avec ses temps de séjour décennaux et son inertie ; le Bourget interfère avec le Rhône lors de crues exceptionnelles qu'il étête et s'en trouve en retour profondément modifié). Ces relations **lacs –fleuves** soulèvent un regain d'intérêt du fait du réchauffement climatique attendu.

La zone atelier apporte à l'ORE une **perspective européenne** et son réseau régional (pôle Lyon-Grenoble) de compétences scientifiques et d'opérations interdisciplinaires, notamment écologie-sciences physiques (hydrodynamique, sédimentologie) et écologie-sciences humaines, qui sont autant d'ouvertures et de collaborations potentielles.

En terme institutionnel la ZABR est un GIS. Le responsable du CARTEL (JM Dorioz) participe au bureau de la zone atelier et le président de la Zone atelier (JP Bravard) au conseil scientifique de l'ORE.

8.2. Contribution à « Envirhonalps » et aux cluster régionaux ([www http://envirhonalp.obs.ujf-grenoble.fr/.](http://envirhonalp.obs.ujf-grenoble.fr/))

L'Observatoire Lacs dans sa version actuelle (volet1 limnologie) est reconnue par « Envirhonalps » comme une plateforme observatoire.

Envirhonalps structure depuis 2004 le dispositif de recherche en environnement des Grandes Ecoles et des Universités du Pôle Lyon Grenoble. Il est constitué de plateformes mutualisant les équipements analytiques et les dispositifs expérimentaux et de terrain. Le groupement, présidé par C Schmidt Lainé (CEMAGREF), intervient dans la préparation des contrats Etat Région et organise le cluster « Environnement » créé par le Conseil Régional.

9. REMARQUE FINALE

Pour l'INRA les fonctions attendues de l'Observatoire pour l'UMR sont multiples :

- ❖ Conforter une approche intégrée relative aux systèmes lacustres en relation avec leurs bassins versants et leurs environnements globaux;
- ❖ Permettre un cadrage général sur nombre de projets sectoriels (et à pas de temps plus courts) ;
- ❖ Contribuer à la culture limnologique du laboratoire de Thonon, l'Observatoire constituant une «école chercheur permanente», utile en particulier aux jeunes recrues;
- ❖ Accélérer les décloisonnements nécessaires à l'originalité de cette station, et de l'UMR associé.

L'Observatoire est un investissement pour les prochaines années, structurant pour l'UMR et assurant son insertion dans le réseau régional, voire sur ces bases, au niveau européen.

Perspectives

L'ORE est un dispositif ouvert et évolutif. Les évolutions de nature thématique et méthodologiques sont prévisibles..

La version initiale de l'ORE est construite, en tenant compte des moyens réalistement disponibles et en se basant sur des projets à faisabilité éprouvé ou déjà en cours, ce qui garantit une mise en oeuvre concrète rapide de l'infrastructure. De telles conditions de constructions supposent des simplifications avec des approches incomplètes de certains compartiments des systèmes. Les responsables de l'ORE et son comité scientifique auront pour mission non seulement d'évaluer les inflexions et les nouvelles demandes de partenariat, mais aussi et surtout, de susciter de nouveaux projets qui augmenteront la cohérence de l'ORE.

10. BIBLIOGRAPHIE

ANGELI N., CRETENOT L., GERDEAUX D., 2001 – Importance du peuplement piscicole dans la qualité des eaux : les biomanipulations, p. 35-74. In : Gestion piscicole des grands plans d'eau. D. Gerdeaux (ed.) Hydrobiologie et Aquaculture. 2001. Paris : INRA. 457 p.

ANNEVILLE O., 2001 - Diagnostic sur l'évolution de l'état de santé écologique du Léman par l'analyse des séries chronologiques du phytoplancton. Thèse – Université Claude Bernard Lyon 1, 307 p.

ANNEVILLE O., PELLETIER J., 2000 – Recovery of lake Geneva from eutrophication : quantitative response of phytoplankton *Archiv für Hydrobiologie*, 148, 4, p. 604-624.

ANNEVILLE O., GAMMETER S., STRAILE D., 2005 - Phosphorus decrease and climate variability: mediator of synchrony in phytoplankton changes among European peri-alpine lakes. *Freshwater Biology*, 50, p. 1731-1746.

ANNEVILLE O., SOUISSI S., GINOT V., IBANEZ F., DRUART J.-C. ANGELI N., 2002 - Temporal mapping of phytoplankton assemblages in Lake Geneva : annual and interannual changes in their patterns of succession. *Limnology and Oceanography*, 47, p. 1355-1366.

BARROIN G., 1987 - Estimation du métabolisme du phosphore dans le lac Léman à partir de la relation phosphore-oxygène en zone profonde. p. 63-78. In : Eutrophisation et restauration des écosystèmes lacustres. Qualité des eaux et incidences biologiques./ Eutrophication and lake restoration. Water quality and biological impacts. Balvay G.(Ed.), 1988 - 246 p., french - swedish limnological symposium, Thonon-les-Bains 10-12 juin 1987 INRA.

BARROIN G., 2001 – Evolution naturelle – Evolution anthropique. p. 97-112. In : L'eau dans l'espace rural : vie et milieux aquatiques. Neveu A., Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Papy F. (Eds.) Universités francophones. Paris : INRA Editions. 284 p.

BENEDETTI-CROUZET E., 1971 - Etude géodynamique du lac d'Annecy et de son bassin versant. Thèse – Université de Paris 6, 227 p.

BRIAND J.-F., JACQUET S., FLINOIS C., AVOIS-JACQUET C., MAISONNETTE C., LE BERRE B., HUMBERT J.-F., 2005 - Variations in the microcystins production of *Planktothrix rubescens* (cyanobacteria) assessed by a four-years in situ survey of Lac du Bourget (France) and by laboratory experiments. *Microbial Ecology*, 50, p. 418-428.

BRUNNER P.C., DOUGLAS M.R., BERNATCHEZ L., 1998 - Microsatellite and mitochondrial DNA assessment of population structure and stocking effects in Arctic charr *Salvelinus alpinus* from central Alpine lakes. *Molecular Ecology*, 7, p. 209-223.

CARPENTER, COTTINGHAM, 1997 - *Conservation Ecology* 1, 2
(<http://www.consecol.org/vol1/iss1art2>)

CAUDRON A., CHAMPIGNEULLE A., 2006 - Technique de fluoromarquage en masse à grande échelle des otolithes d'alevins vésiculés de truite commune (*Salmo trutta*) à l'aide de l'alizarine redS. *Cybiurn*, 30, p. 65-72.

CASSELL E.A., MEALS D.W., ASCHMANN S.G., ANDERSON D.P., ROSEN B.H., KORT R.L., DORIOZ J.-M., 2002 – Use of simulation mass balance modelling to estimate phosphorus and bacteria dynamics in watersheds. *Water Sciences and. Technology*, 45, 9, p. 157-168.

CHAMPIGNEULLE A., GERDEAUX D., 1995 - Survey, management and rehabilitation of the Arctic Charr (*Salvelinus alpinus*) fishery in the French-Swiss Lake Lemman. *Nordic Journal Freshwater Research*, 71, p.173-182.

CHAMPIGNEULLE A., MICHOD M., BRUN J.-C., 2001 - Pacage lacustre de salmonidés (omble chevalier, corégone et truite) dans le lac Léman et le lac du Bourget. p. 349-421. In : Gestion piscicole des grands plans d'eau ; Gerdeaux (Ed.). INRA, Paris, 456 p.

COPARD Y., AMIOTTE-SUCHET PH., DI-GIOVANNI C. - Storage and release of fossil organic carbon related to weathering of sedimentary rocks. accepté après revision pour *Earth and Planetary Science Letters*

COPARD Y., DI-GIOVANNI C., MARTAUD T., ALBÉRIC P., OLIVIER J.E., 2006 - Using Rock-Eval 6 pyrolysis for tracking fossil organic carbon in modern environments : implications for the roles of erosion and weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, p.135-153.

COULTHARD T.J., MACKLIN M.G., KIRKBY M.J., 2002 - A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, p. 269– 288.

CRISTOFINI B., ROYBIN D., ETAIX F., 1994 – Qualifying regional developpement. A study in 28 « cantons » of the french Alps. p. 393-406. In : Systems studies in Agricultural and rural Development. Brossier J., de Bonneval L., Landais E. (Eds.) INRA Science Update. 415 p.

DI-GIOVANNI C., DISNAR J.R., TURPIN S., BRÉHÉRET J.G., 1999 - Contribution of reworked organic matter in soils and present lacustrine sediments (Peyssiers basin, Hautes-Alpes, France): preliminary results. *Bulletin de la Société géologique de France*, 170, 2, p.121-129.

DODSON S.I. ARNOTT S.E. COTTINGHAM K. L. 2000 – The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. *Ecology*, 8, p. 2662-2679.

DOKULIL M., JAGSCH A., GEORGE G.D., ANNEVILLE O., JANKOWSKI T., WAHL B., LENHART B., BLECKNER T. ET TEUBNER K., 2006 - Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 51, 6, p. 2787-2793.

DORIGO U., FONTVIEILLE D., HUMBERT J.-F., 2006 - Spatial variability in the abundance and composition of the free living bacterioplankton community in the pelagic zone of Lake Bourget (France) *FEMS Microbiology Ecology* 58, p.109-119.

DORIOZ J.M., CASSEL A., ORAND A., EISENMAN K. 1998 Phosphorus storage, transport and export dynamics in the Foron river watershed. *Hydrol. Processes*, vol. 12, 285-309

DORIOZ J.M., BLANC P., 2001 – Maîtrise de la charge externe en phosphore des plans d'eau et fonctionnement des bassins versants., p. 113-132. In : L'eau dans l'espace rural : vie et milieux aquatiques. Neveu A., Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Papy F. (Eds.) Universités francophones. Paris : INRA Editions. 284 p.

DORIOZ J.-M., TREVISAN D., 2001 – Transferts de phosphore des bassins versants agricoles vers les eaux de surface : l'expérience du bassin lémanique (France) et sa portée générale. *Agrosol*, 12, 2 p. 85-97.

DORIOZ J.-M., VANSTEELANT J.-Y., TREVISAN D., 2000 – Transferts de polluants des bassins agricoles aux eaux de surface. In : Organisation et gestion de l'espace. Séminaire du département Environnement et Agronomie. Nouan-le-Fuzelier du 11-13 octobre 2000, p. 53-56.

ECKMANN R., GERSTER S., KRAEMER A., 2006 - Yields of European perch from Upper Lake Constance from 1991 to present. *Fisheries Management and Ecology*, 13, p. 381-391.

FEUILLADE J. (Ed.), 1994 - Studies on lake Nantua (France) a eutrophic lake on the way to rehabilitation. *Ergebnisse der Limnologie*, 41, 144 p.

GERDEAUX D., PERGA M.-E., 2006 - Alteration of pelagic $\delta^{13}\text{C}$ during eutrophication and re-oligotrophication in three subalpine lakes. *Limnology and Oceanography*, 51, p. 772-780.

GERDEAUX D., ANNEVILLE O., HEFTI D., 2006 - Fishery changes during re-oligotrophication in 11 peri-alpine Swiss and French lakes over the past 30 years. *Acta Oecologica*, 30, p. 161-167.

GILLET C., 2001 – Le déroulement de la fraie des principaux poissons lacustres. p. 241-281. In : Gestion piscicole des grands plans d'eau. D. Gerdeaux (ed.) Hydrobiologie et Aquaculture. 2001 Paris : INRA Editions 457 p.

GILLET C., QUÉTIN P., 2006 - Effect of temperature changes on the reproductive cycle of roach in Lake Geneva from 1983 to 2001. *Journal of Fish Biology*, 69, 2, p. 518-534.

HUMBERT J.-F., PAOLINI G., LE BERRE B., 2001 - Monitoring a cyanobacterial bloom and its consequences for water quality. In : Harmful Algal Bloom 2000, Hallegraeff, G., et al. (Eds), Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO 2001, p. 496-499.

JACQUET S., BRIAND J.-F., LÉBOULANGER C., AVOIS-JACQUET C., OBERHAUS L., TASSIN B., VINÇON-LEITE B., PAOLINI G., DRUART J.-C., ANNEVILLE O., HUMBERT J.-F., 2005 - The proliferation of the toxic cyanobacterium *Planktothrix*

rubescens following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget). *Harmful Algae*, 4, p.651-672.

JARDILLIER L., BOUCHER D., PERSONNIC S., JACQUET S., THENOT A., SARGOS D., AMBLARD CH. AND DEBROAS D. (2005) - Relative importance of nutrients and mortality factors on prokaryotic community composition in two lakes of different trophic status: Microcosm experiments. *FEMS Microbiol. Ecol.* 53, 429-443.

JEPPESSEN E., SØNDERGAARD M., JENSEN J. P., HAVENS K., ANNEVILLE O., CARVALHO L., COVENEY M.F., DENEKE R., DOKULIL M., FOY B., GERDEAUX D., HAMPTON S.E., KANGUR K., KÖHLER J., KÖRNER S., LAMMENS E., LAURIDSEN T.L., MANCA M., MIRACLE R., MOSS B., NÖGES P., PERSSON G., PHILLIPS G., PORTIELJE R., ROMO S., SCHELSKE C.L., STRAILE D., TATRAI I., WILLÉN E., WINDER M., 2005 - Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary data from 35 European and North American long term studies. *Freshwater Biology*, 50, p. 1747-1771.

JORGENSEN S.E., DE BERNARDI R., 1998 - The use of structural dynamics models to explain successes and failures of biomanipulation. *Hydrobiologia*, 379, 147-158.

JUNG S., WINIARSKI T., DORIOZ J.M., TASSIN B., 2006. Impact of urbanisation on a lacustrine environment through sediment analysis. European Geosciences Union 3-7 april, Vienne (Autriche), Geophysical Research Abstracts (CD-Rom, congrès).

KANSO A., CHEBBO A., TASSIN B., 2006. Application of MCMC-GSA model calibration method to urban runoff quality modelling; *Reliability engineering and system safety*; 91, 1398–1405

LAFARGUE E., MAQUIS F., PILLOT D., 1998 - Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and soil contamination studies. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 53, p. 421-437.

LAZZAROTTO J., 2005. Evolution physico-chimique du Léman de 1957 à nos jours. *Archives des Sciences*, 58, p. 175-182.

MAGUIRE C. M., GREY J., 2006 - Determination of zooplankton dietary shift following a zebra mussel invasion, as indicated by stable isotope analysis. *Freshwater Biology*, 51, p. 1310-1319.

MOLINERO J.C., ANNEVILLE O., SOUISSI S., LAINÉ L. ET GERDEAUX D. (sous presse) Decadal changes in water temperature and ecological time-series in Lake Geneva, Europe - detecting relationships with the subtropical Atlantic climate variability. *Climate Research*

PERGA M. E., GERDEAUX D., 2003 - Using fish scales $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for retrospective ecological studies : the example of the evolution of Whitefish isotopic signature during re-oligotrophication of lake Geneva, 1980-2001. *Journal of Fish Biology*, 63, p. 1197-1207.

PEURAVUORI J, 2005 - NMR Spectroscopy Study of Freshwater Humic Material in Light of Supramolecular Assembly. *Environmental Sciences and Technology*, 39, 15, p. 5541 - 5549.

POURRIOT R., MEYBECK M. (Eds.), 1995 - Limnologie générale. Collection d'Ecologie n° 25. Masson Editeur. 956 p.

RUBIN J.F., 1990 - Biologie de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) dans le Léman (Suisse). Thèse de docteur es Sciences, Université de Lausanne, 169 p.

SAS H., 1990 - Lake Restoration by Reduction of Nutrient Loading: Expectations, Experiences, Extrapolations. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie. Verhandlungen*, 24, 1, p 247-251.

SEBAG D., COPARD Y., DI-GIOVANNI C., DURAND A., LAIGNEL B., OGIER S., VERGES E., 2006 - Palynofacies as a tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments : Synopsis and prospects. *Earth Sciences Review*, 79, p. 241-259.

STRAILE, D., JÖHNK, K.D., ROSSKNECHT, H., 2003. Complex effects of winter-warming on the physico-chemical characteristics of a deep lake. *Limnology & Oceanography*, 48: 1432-1438.

TREVISAN D., DORIOZ J.-M., coll tech., MOILLE. J.-P., BOSSE J.-P., 2001 – Bandes herbeuses et lutte contre les pollutions diffuses d'origine agricole. Critère d'efficacité et conditions d'implantation. p. 231-259. In : COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LEMAN, C.I.P.E.L. - 2001- Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Programme quinquennal 1996-2000, campagne 2000. Lausanne : CIPEL, 295 p.

TREVISAN D., VANSTEELANT J.-Y., DORIOZ J.-M., 2002 - Survival and leaching of fecal bacteria after slurry spreading on mountain hay meadows : consequences for the management of water contamination risk. *Water Research*, 36, p. 275-283.

VIOLLIER E., RABOUILLE C., HALL P., WITTE U., JANSSEN F., TENGBERG A., TAILLEFERT M., MORFORD J., WENZHÖFER F., BREUER E., GRENZ C., APITZ S., FURUKAWA Y., SHIMMIELD T., 2003. *In situ* benthic biogeochemistry : state of the art technologies and guidelines for the future, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 285-286, 5-31

VOLLENWEIDER R.A., 1968 - Scientific fundamental of the eutrophicationof lakes and flowing waters, with Particular reference to phosphorus and nitrogen as factors in eutrophication, OCDE Paris Technical report DAS/CSI/68.27159 p.

VOLLENWEIDER R.A., 1975 - Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 37, 1, p. 53-84.

WINIARSKI T., BEDELL J.P., DELOLME C., PERRODIN Y., 2006. The impact of stormwater on a soil profile in an infiltration basin. *Hydrogeology Journal* 14(7): 1244-1251.

ZANELLA D., 2003 - Bilan de la situation actuelle de l'omble chevalier sur le lac d'Annecy et de sa gestion halieutique. DESS Restauration des Milieux Aquatiques Continentaux. Université Blaise Pascal, Clermont 2. 40 p.

BIBLIOGRAPHIE des EQUIPES PARTENAIRES de l'ORE

➤ CARTEL INRA Université de Savoie

ANNEVILLE O., GAMMETER S., STRAILE D., 2005 - Phosphorus decrease and climate variability: mediator of synchrony in phytoplankton changes among European peri-alpine lakes. *Freshwater Biology*, 50, p. 1731-1746.

ANNEVILLE O., SOUISSI S., GINOT V., IBANEZ F., DRUART J.-C. ANGELI N., 2002 temporal mapping of phytoplankton assemblages in Lake Geneva : annual and interannual changes in their patterns of succession. *Limnology and Oceanography*, 47, p. 1355-1366.

BARROIN G. , 2001 – Evolution naturelle – Evolution anthropique. In : L'eau dans l'espace rural : vie et milieux aquatiques. Neveu A., Riou C., Bonhomme R., Chassin P., Papy F. (eds.) Universités francophones. Paris : INRA Editions. 284 p. p. 97-112.

BRIAND J.-F., JACQUET S., FLINOIS C., AVOIS-JACQUET C., MAISONNETTE C., LE BERRE B., HUMBERT J.-F., 2005 - Variations in the microcystins production of *Planktothrix rubescens* (cyanobacteria) assessed by a four-years in situ survey of Lac du Bourget (France) and by laboratory experiments. *Microbial Ecology*, 50, p. 418-428.

CHAMPIGNEULLE A., MICHOD M., BRUN J.-C., 2001 - Pacage lacustre de salmonidés (omble chevalier, corégone et truite) dans le lac Léman et le lac du Bourget. In : Gestion piscicole des grands plans d'eau ; Gerdeaux Ed. INRA, Paris, 456 p. p. 349-421.

GERDEAUX D., PERGA M.-E., 2006 - Alteration of pelagic $\delta^{13}\text{C}$ during eutrophication and re-oligotrophication in three subalpine lakes. *Limnology and Oceanography*, 51, p. 772-780.

GERDEAUX D., ANNEVILLE O., HEFTI D., 2006 - Fishery changes during re-oligotrophication in 11 peri-alpine Swiss and French lakes over the past 30 years. *Acta Oecologica*, 30, p. 161-167.

GILLET C., QUÉTIN P., 2006 - Effect of temperature changes on the reproductive cycle of roach in Lake Geneva from 1983 to 2001. *Journal of Fish Biology*. 69, 2, p. 518-534.

MOLINERO J.C., ANNEVILLE O., SOUISSI S., LAINÉ L. ET GERDEAUX D. (sous presse) Decadal changes in water temperature and ecological time-series in Lake Geneva, Europe - detecting relationships with the subtropical Atlantic climate variability. *Climate Research*

PERGA M. E., GERDEAUX D., 2003 - Using fish scales $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for retrospective ecological studies: the example of the evolution of Whitefish isotopic signature during re-oligotrophication of lake Geneva, 1980-2001. *Journal of Fish Biology*, 63 p. 1197-1207.

➤ **EDYTEM - UMR 5204 CNRS**

ARNAUD F., 2003. Signatures climatique et anthropique dans les sédiments holocènes des lacs du Bourget et d'Anterne (Nord Ouest des Alpes). Thèse soutenue le 19 décembre 2003 à l'Université des Sciences et techniques de Lille.

ARNAUD F., 2005. Discriminating the fingerprints of bio-induced and detrital sedimentary processes in particle size distribution spectra of hard water lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 34-4, 519 -526.

ARNAUD F., REVEL-ROLLAND M., CHAPRON E., DESMET M., TRIBOVILLARD N., 2005. 7200 years of Rhône river flooding activity recorded in Lake Le Bourget: A high resolution sediment record of NW Alps hydrology. *The Holocene*, 15-3, 420-428.

ARNAUD, F., MAGAND, O., CHAPRON, E., BOES, X., BERTRAND S., MELIERES, M.-A., 2006. Radionuclide dating (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{241}Am) of recent lake sediments in a highly active geodynamic setting (lakes Puyehue and Icalma - Chilean Lake District). *The Science of the Total Environment*, 366, 837-850.

CHAPRON E., ARNAUD F., NOËL H., REVEL-ROLLAND M., DESMET M., PERDEREAU L. 2005. Rhone River flood deposits in Lake Le Bourget: a proxy for Holocene environmental changes in the NW Alps, France. *Boreas*, 34, 404-416.

DESMET M., MELIERES M.-A., ARNAUD F., CHAPRON E. 2005. Holocene Climate in the Alps: toward a common framework? *Boreas*, 34, 401-403.

NOMADE J., 2005. Chronologie et sédimentologie du remplissage du lac d'Annecy depuis le Tardiglaciaire : implications paléoclimatiques et paléohydrologiques Thèse soutenue le 24 juin 2005 à l'Université de Savoie

NOMADE J., CHAPRON E., DESMET M., REYSS J.-L., ARNAUD F., LIGNIER V., 2005. Reconstructing historical seismicity from lake sediments (Lake Laffrey, Western Alps, France). *Terra Nova*, 17-4, 350-357.

REVEL-ROLLAND M., ARNAUD F., CHAPRON E., DESMET M., GIVELET N., ALIBERT C., MCCULLOCH M., 2005. Sr and Nd isotope as a tracer of sources of clastic material, in the Bourget lake sediment (NW Alps, France) during the Little Ice Age. *Chemical Geology*, 224-4, 183-200.

➤ **Equipe “Biodiversité microbienne et fonctionnement des écosystèmes aquatiques” UMR CNRS 6023**

BETTAREL Y., SIME-NGANDO T., AMBLARD C., BOUVY M., 2005. Low Consumption of Virus-Sized Particles by Heterotrophic Nanoflagellates in Two Lakes of the French Massif Central. *Aquat. Microb. Ecol.*, 39: 205-209

JARDILLIER L., BOUCHER D., PERSONNIC S., JACQUET S., THENOT A., SARGOS D., AMBLARD CH., DEBROAS D., 2005. Relative importance of nutrients and mortality factors on prokaryotic community composition in two lakes of different trophic status: Microcosm experiments. *FEMS Microbiol. Ecol.* 53, 429-443.

LEFRANC M., THÉNOT A., LEPÈRE C., DEBROAS D., 2005. Genetic diversity of small eukaryotes in lakes differing by their trophic status. *Appl. Environ. Microbiol.* 71, 5935-5942.

LEHOURS A.C., BARDOT C., THÉNOT A., DEBROAS D., FONTY G., 2005. First investigation of anaerobic microbial communities in lake Pavin: the unique meromictic lake in France. *Appl. Environ. Microbiol.*, 71 : 7389-7400.

BEC A., MARTIN-CREUZBURG D., VON ELERT E., 2006. Trophic upgrading of autotrophic picoplankton by the heterotrophic flagellate *Paraphysomonas* sp. *Limnol. Oceanogr.*, 51:1699-1707.

COLOMBET J., SIME-NGANDO T., CAUCHIE H-M, FONTY G., HOFFMAN L., DEMEURE J.C., 2006. Depth related viral activity in lake Pavin. *Appl. Environ. Microbiol.* 72: 4440-4445.

LEMARCHAND C., JARDILLIER L., CARRIAS J-F, RICHARDOT M., DEBROAS D. SIME-NGANDO T., AMBLARD, C., 2006. Community composition and activity of prokaryotes associated to detrital particles in two contrasting lake ecosystems *FEMS Microb. Ecol.* 57:442-451

LEPERE C., BOUCHER D., JARDILLIER L., DOMAIZON I., DEBROAS D., 2006. Succession and regulation factors of small eukaryote community composition in a lacustrine ecosystem (Lake Pavin). *Appl. Environ. Microbiol.* 72, 2971-2981.

LEFEVRE E., BARDOT C., NOËL C., CARRIAS JF, VISCOGLIOSI E., AMBLARD C., SIME-NGANDO T., 2007. Unveiling fungal zooflagellates as members of freshwater picoeukaryotes: evidence from a molecular diversity study in a deep meromictic lake. *Environ. Microbiol.* 9 (1) : 61-71.

LEHOURS A-C., EVANS P., BARDOT C., JOBLIN K., FONTY G., 2007. Phylogenetic diversity of Archaea and Bacteria in the anoxic zone of a meromictic lake (lake Pavin, France). *Appl. Environ. Microbiol.* (in press).

➤ **CEMAGREF microbiologie des eaux, Lyon**

BOISSON JC, VOLAT B., LAZARROTO J., DORIOZ JM., MADIGOU E., MONTUELLE B., 2006, Typologie chimique de 3 cours d'eau et typologie fonctionnelle des communautés microbiennes épilithiques associées, 8^{ème} CILEF, Hammamet Tunisie, 17-21 Mars.

DORIGO U. , LEBOULANGER C., BÉRARD A., BOUCHEZ A., HUMBERT JF., MONTUELLE B. Lotic biofilm community structure and tolerance along a pesticide contamination gradient in a vineyard area. Soumis à *Aquatic Microbial Ecology*.

FÉRAY C., MONTUELLE B., 2003, Chemical and microbial hypotheses explaining the effect of wastewater treatment plant discharges on the nitrifying communities in freshwater sediment, *Chemosphere*, 50, 7, 919-92

LAZZAROTTO J., NIREL P.M., MONTUELLE B., DRUART J.C., GILLET C., DORIOZ J.M., 2006, Comparison Of Chemical Indicators And Biological Indicators For The Quality Evaluation Of Anthropized Brooks, *WORKSHOP "ANALYTICAL CHEMISTRY AND ECOTOXICOLOGY*, 15/02/06, GENÈVE .)

MADIGOU E., 2005, Modulation des fonctionnalités microbiennes du sédiment et du périphyton en petits cours d'eau, Thèse de l'Université de Lyon I, Cemagref- ENTPE- U. Lyon I. 252p.

MERMILLOD BLONDIN F., MAUCLAIRE L., MONTUELLE B., 2005. Use of slow filtration columns to assess O₂ respiration, DOC consumption, nitrogen transformation, and microbial parameters in hyporheic sediments. *Water research*, 39, 9, p. 1687 – 1698.

MONTUELLE B., MADIGOU E., VOLAT B., BOISSON J.C., 2004, Qualité des milieux et communautés microbiennes, Contribution au rapport final AQUAE, INRA CEMAGREF, Ombredane D. et Dorioz JM Coordinateur, 15p

MOUTHON J., MAGNY M., 2004. Malacological history of lake Annecy (France): a comparison of late holocene (since 4700 BC) and present mollusc assemblages. *Archiv für Hydrobiologie*, vol. 160, n° 4, p. 555 – 57

PERRODIN Y., BABUT M., BEDELL JM., BRAY M., CLÉMENT B., DELOLME C., DEVAUX A., DURRIEU C., GARRIC J., MONTUELLE B., 2006, Assessment of ecotoxicological risks related to depositing dredged materials from canals in northern France on soil, *Environment International*, 32, 804-814.

➤ **Cereve ENPC-UPVM-ENGREF**

CATHERINE A., QUIBLIER C., YÉPRÉMIAN C., GOT P., GROLEAU A., VINÇON-LEITE B., BERNARD C., TROUSSELLIER M., 2007. *Planktothrix agardhii* dynamics, toxicity and controlling factors in a temperate lake (Viry-Chatillon, France); *Applied and Environmental Microbiology*; sous presse.

GROLEAU A., 2000. Précipitation de calcite sédimentation et cycle de phosphore dans un lac alpin. Étude du Lac du Bourget ENPC, septembre 2000 Thèse

GROLEAU A., SARAZIN G., VINÇON-LEITE B., TASSIN B., QUIBLIER-LLOBERAS C. Tracing calcite precipitation with specific conductance in a hardwater alpine lake (lac du Bourget), *Water Research*, (2000) 34 (17), 4151-4160.

JUNG, S., ARNAUD F., BONTÉ P., CHEBBO G., DORIOZ J.M., TASSIN B., WINIARSKI T., 2007. Impact des rejets urbains de temps de pluie sur les milieux aquatiques : Analyse à partir des sédiments lacustres; Application au Lac du Bourget (*accepté pour publication à TSM*)

KANSO G., CHEBBO F., TASSIN B., 2006. Application of MCMC-GSA model calibration method to urban runoff quality modelling; *Reliability engineering and system safety*; 91, 1398 – 1405

VON SPERLING E., TASSIN B., VINÇON-LEITE B., 2006. Aspectos de qualidade de agua em bacias de retenção urbanas. *Revista brasileira de recursos hidricos*; Vol. 11; n° 2.

➤ **ENTPE LSE Lyon**

ARNAUD F., REVEL M., WINIARSKI T., BOSCH D., CHAPRON E., DESMET M. et TRIBOVILLARD N., 2003. Lead fall-out isotopic signal over French northern Alps: Timing and sources constraints from distant lake sediment records. *Journal de Physique IV* **1**(107): 61-64.

ARNAUD F., REVEL-ROLLAND M., BOSCH D., WINIARSKI T., DESMET M., TRIBOVILLARD N., GIVELET N., 2004. A reliable 300-years long history of lead contamination in Northern French Alps from distant lake sediment records. *Journal of Environmental Monitoring* **6**(5): 448-456.

ARNAUD, F., SERRALONGUE J., WINIARSKI T., DESMET M., 2006. Pollution au plomb dans la Savoie antique (II-IIIe s. ap. J.-C.) en relation avec une installation métallurgique de la cité de Vienne. Lead pollution in antique Savoy (2nd–3rd centuries AD) in relation with a metallurgical settlement of the city of Vienne *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Géosciences* **338**(4): 244-252.

DUBÉ J.-S., WINIARSKI T., GALVEZ-CLOUTIER R., 2003. Effects of initial saturation on the behaviour of mixed LNAPL and heavy-metal contaminated glaciofluvial deposit. *European Journal of Soil Science* **54**(3): 517-530.

GOUTALAND D., WINIARSKI T., BIEVRE G., BUONCRISTIANI J.-F., 2005. Intérêt de l'approche sédimentologique en matière d'infiltration d'eaux pluviales. Caractérisation par radar géologique. *Techniques Sciences Méthodes* **10**: 71-79.

JUNG , S., WINIARSKI T., DORIOZ J. M., TASSIN B., 2006. Impact of urbanisation on a lacustrine environment through sediment analysis. European Geosciences Union 3-7 april, Vienne (Autriche), Geophysical Research Abstracts (CD-Rom, congrès).

LASSABATERE L., WINIARSKI T., GALVEZ CLOUTIER R., 2004. Retention of three heavy metals (Zn, Pb, Cd) in a calcareous soil controlled by the modification of flow with geotextiles. *Environmental Sciences and Technology*, **38**: 4215-4221.

WINIARSKI, T., BEDELL J. P., DELOLME C., PERRODIN Y., 2006. The impact of stormwater on a soil profile in an infiltration basin. *Hydrogeology Journal* **14**(7): 1244-1251.

➤ **Laboratoire de Géochimie des Eaux**

ASSAYAG N., JEZEQUEL D., VIOLLIER E., MICHARD G., ADERM., PREVOT F., AGRINIER P., 2007. Hydrological budget, carbon sources and biogeochemical processes in lac Pavin (France) d18O and d13C of dissolved inorganic carbon. *Applied Geochemistry* (sous presse)

DOMINGOS R. F., BENEDETTI M. F., CROUE J. P., PINHEIRO J. P., 2004. Electrochemical methodology to study labile trace metal/natural organic matter complexation at low concentration levels in natural waters *Analytica chimica acta* 521, 77-86

MICHARD G., JEZEQUEL D., VIOLLIER E. 2003. Vitesses des réactions de dissolution et précipitation au voisinage de l'interface oxydo-réducteur dans un lac méromictique : le lac Pavin (Puy de Dôme, France), *Revue des Sciences de l'Eau*, 16 (2) : 199-218

MICHARD G., VIOLLIER E., JEZEQUEL D., SARAZIN G., 1994. ,Geochemical study of a crater lake : the Pavin lake, France - Identification, location and quantification of chemical reactions in the lake, *Chem. Geol.*, 115, 103-115

OBERHAUS L., GROLEAU A., QUIBLIER-LLOBERAS C., DRUART J.-C., VINÇON-LEITE B., TASSIN B., 2003. Influence of physical factors on cyanobacteria development in a deep sub-alpine lake (Lake Bourget). *Journ. Rech. Oceanogr.* 28 (1-2):190-195.

MICHARD, G., SARAZIN, G., JEZEQUEL, D., ALBERIC, P., OGIER, S., 2001. Annual budget of chemical elements in a eutrophic lake, Aydat lake (Puy de Dôme), France. *Hydrobiol.* 459, 27-46

VIOLLIER E., RABOUILLE C., HALL P., WITTE U., JANSSEN F., TENGBERG A., TAILLEFERT M., MORFORD J., WENZHÖFER F., BREUER E., GRENZ E., APITZ S., FURUKAWA Y., SHIMMIELD T., 2003. *In situ* benthic biogeochemistry : state of the art technologies and guidelines for the future, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 285-286, 5-31

➤ **UMR M2C-Rouen**

COPARD, Y., DI-GIOVANNI, C., MARTAUD, T., ALBÉRIC, P., OLIVIER J.E., 2006. Using Rock-Eval 6 pyrolysis for tracking fossil organic carbon in modern environments: implications for the roles of erosion and weathering. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 135-153.

COPARD, Y., AMIOTTE-SUCHET, PH., DI-GIOVANNI, CH., 2007. Storage and release of fossil organic carbon related to weathering of sedimentary rocks. in press pour *Earth and Planetary Science Letters*

COULTHARD, T.J., MACKLIN, M.G., KIRKBY, M.J., 2002. A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 269– 288.

SEBAG, D., COPARD, Y., DI-GIOVANNI, CH., DURAND A., LAIGNEL, B., OGIER, S., VERGÈS E., 2006. Palynofacies as a tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments: Synopsis and prospects. *Earth Sciences Review* 79, 241-259.

SEBAG, D., 2001. Apports de la MO pour la reconstitution des paléoenvironnements holocènes de la basse vallée de la Seine. Fluctuations des conditions hydrologiques locales et paléoenvironnements. 356 p.



ANNEXE 1 : CV du RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

DORIOZ Jean-Marcel
Né le 25 Mars 1953

POSITION INRA :

ASC Sciences du Sol Versailles (1981).
Chargé de Recherche INRA de Thonon-les-Bains (1987) , responsable de l'équipe bassin versant (1987-2004)
Directeur de recherche (DR2)
Directeur de L'UMR 42 CARRTEL depuis 2002

RESPONSABILITES SCIENTIFIQUES

- *Projet Impluvium d'Evian*, contrat BSN/INRA, Activités agricoles, milieu physique et qualité des eaux dans l'impluvium d'Evian. CRISTOFINI B., DORIOZ J.M., (1992- 1996)
- *Projet « agriculture environnement »* du GIS « Alpes du Nord » de 1997-2005
- *Action structurante INRA-CEMAGREF 'AQUAE'* Dorioz –Ombredanne- Effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particuliers et dissous et de la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage.(2001-2004)
- *FAIR5 CT97-3798* project FLEURY P., DORIOZ J.M. - Sustainable agricultural land use in alpine regions (SAGRI-ALP 1998-2001)
- *Associate Professor* School of Natural Ressources Université du Vermont (USA (Année sabbatique1998 -1999)

PRINCIPALES PUBLICATIONS

- CASSEL A., DORIOZ J.M., KORT R.L., HOFFMANN J.P., MEALS D.W., KIRSCHTEL D., BRAUN D.C. 1998, Watershed modeling : dynamic of phosphorus storage, cycling, transport,export. *Journ. Env. Qual. Vol.27,N) 2*, 293-298
- CASELL A., KORT R.L., MEALS D.W., ASCHMAN S.G., ANDERSON D.P, ROSEN BH DORIOZ J.M., , 2002 Use of mass balance modelling to estimate phosphorus and bacteria dynamics in watersheds. *Water Sciences and Technology* vol 45, N°9 pp157-168
- DORIOZ J. M., QUETIN P., LAZZAROTTO J., ORAND A. (2004). Bilan de Phosphore dans un bassin versant du lac Léman : conséquences pour la détermination de l'origine des flux exportés. *Revue des Sciences de l'Eau* 17(3) : 329-354.
- DORIOZ J.M., CASSEL A., ORAND A., EISENMAN K. 1998 Phosphorus storage, transport and export dynamics in the Foron river watershed. *Hydrol. Processes*, vol. 12, 285-309
- DORIOZ J.-M., WANG D., POULENARD J., TREVISAN D., 2006 - The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics - A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes, in France. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 117, p. 4-21. dec 395
- JORDAN MEILLE L., DORIOZ -2004 Soluble phosphorus dynamic in an agricultural watershed *Agronomie* (2004) 237-248.
- JORDAN MEILLE L., DORIOZ J.M. , WANG D.,1998 , Analysis of the export of diffuse phosphorus from a small rural watershed. *Agronomie* ,18, 5-26

TREVISAN D., VANSTEELANT J.Y., DORIOZ J.M., 2002. Survival and leaching of fecal micro-organisms after slurry spreading on mountain hay meadows : consequences for the management of water contamination risk. *Water Research*, 36, 275-283.

WANG D., DORIOZ J.M., TREVISAN D., BRAUN D.C., WINDHAUSEN L.J., VANSTEELANT J.Y., 2003. Using a landscape approach to interpret diffuse phosphorus pollution and assist with water quality management in the basin of Lake Champlain (Vermont) and Lac Léman (France) In T.O. Manley and P.L. Manley (eds.) Lake Champlain in the New Millennium . *Water Science and Application*. Vol. 2. American Geophysical Union.

ANNEXE 2 : PROJETS en CONSTRUCTION

Erosion et transferts hydrosédimentaires de matières organiques dans les bassins versants

Problématique

Pour un bassin versant donné, qualité et flux de Carbone Organique Total (COT) exportés par l'eau sont fonction de facteurs géologiques (type de roches sédimentaires, relief) et de variables climatiques et anthropiques. A titre d'exemple, la géologie régionale contrôle la nature et le stock de la carbone organique fossile disponible après érosion et altération des roches sédimentaires (Di-Giovanni *et al.*, 1999; Copard *et al.*, 2007). L'Homme et le climat influencent aussi la qualité et le stock du Corg terrestre (couverts végétaux, sols, consortium bactérien). Il en résulte que le Corg particulaire apporté aux lacs montrera tantôt un caractère "labile" ((bio)dégradabilité, formation de COD dissout) et tantôt un caractère réfractaire (stockage dans les sédiments lacustres).

L'objectif serait de caractériser les transferts hydrosédimentaires de COT du bassin versant au lac ce qui signifie de connaître la nature de ce COT et de comprendre la variabilité de ses flux. L'ambition est à terme d'être capable de modéliser ces flux pour évaluer l'impact respectif du climat et des activités humaines sur les modifications tant qualitatives que quantitatives des charges organiques allochtones exportées au lac.

Ce projet bénéficierait des résultats acquis lors d'une précédente étude sur la variabilité des flux de Corg en fonction de la lithologie et du couvert végétal (bassin versant de Montmin). Enfin, à travers la caractérisation des apports allochtones aux lacs, ce projet s'inscrit dans une perspective d'étude intégrée de la matière organique du bassin, aux lacs, aux sédiments (relation avec le projet processus 1). Cette perspective est en cours de formalisation et sera soumise ultérieurement au CS de l'ORE. Un projet ANR est envisagé en relation avec CARTEL et EDYTEM.

Site d'étude potentiel et démarche

La zone d'étude serait le petit lac d'Annecy et son bassin versant, en particulier le sous bassin versant de l'Ire. Plusieurs raisons motivent notre choix: i) ce bassin versant est le site pilote pour la calibration du modèle CAESAR (Coulthard *et al.*, 2002) "érosion/dépôt" (*prog. CLIMASILAC* 2), ii) l'Ire est avec l'Eau Morte, l'une des principales sources de matières dissoutes et particulaires aux lac d'Annecy (Benedetti-Crouzet, 1971) enfin 3) ce bassin a fait l'objet d'une première campagne d'échantillonnage au cours de l'été 2005.

La stratégie d'échantillonnage proposée repose sur une estimation quantitative et qualitative (nature) des stocks de matière organique dans les différents compartiments du système étudié (roches, sols, rivière, dépôt fluviatile, sédiment lacustre). Pour les sols, le nombre de profils doit refléter le couplage entre couvert végétal, type de sols et substrat géologique. Ceci doit nous permettre de connaître la contribution des matières organiques des compartiments érodés (sols, roches) dans les transferts actuels voire sub-actuels (particules fluviales) et dans les zones de dépôt (dépôt de berges, plaine d'inondation, lac). Ensuite en utilisant le modèle CAESAR, il s'agira d'estimer la valeur et la répartition spatiale des flux organiques transférés dans le bassin versant.

La MO particulière serait analysée par la méthode des Palynofaciès (Sebag *et al.*, 2006) et sa géochimie globale par Pyrolyse Rock-Eval6 (Lafargue *et al.*, 1998). A cette étude géochimique sera développée des outils mathématiques permettant d'identifier des marqueurs géochimiques spécifique (Copard *et al.*, 2006). Enfin la modélisation des flux requiert l'utilisation d'outils de spatialisation SIG.

Proposition de UMR CNRS M2C, Université de Rouen

Y. Copard (MC, UMR CNRS M2C, Université de Rouen)

Chercheurs et équipes intéressés:

D. Sebag (UMR CNRS M2C, Université de Rouen),

J.M. Dorioz, J. Poulenard (UMR CARRTEL INRA-Université de Savoie)

Partenaires à contacter

Université de Liverpool (RU), Département de Géographie, (Pr. J.A. Dearing),

Université de Hull (RU), Département de Géographie, (Pr. T. Coulthard).

UMR CNRS ISTO, Université d'Orléans, (Pr. C. Di-Giovanni)

Ecologie de la conservation : une espèce emblématique face aux conséquences du changement global

Objectifs

L'omble chevalier (*Salvelinus alpinus* L.) est une espèce sténotherme d'eau froide à répartition circumpolaire présente dans les 3 grands lacs de l'ORE et dans des lacs profonds voisins (Aiguebelette, Paladru). L'espèce est autochtone au Léman et au lac du Bourget qui sont les lacs les plus méridionaux de son aire de répartition naturelle. Une étude génétique (Brunner *et al.*, 1998) a montré que les populations du Léman et du lac du Bourget se différenciaient à la fois de populations d'omble du bassin du Rhin et de Scandinavie.

Dans les lacs de l'ORE l'omble se reproduit en profondeur (30 à 120 m) dans des substrats de galets et/ou cailloux (naturels : falaises rivulaires ou apports de rivières et/ou rejets d'exploitation de carrières). Les populations d'omble ont très fortement régressé lors de la phase d'eutrophisation. Les facteurs limitants alors identifiés étaient la faible surface des omblières, la sédimentation sur les substrats de fraie et le déficit d'oxygénation à l'interface eau-sédiment dans les couches profondes.

Pour pallier aux fortes mortalités aux stades embryo-larvaires mises en évidence au pic d'eutrophisation (travaux suisses, Rubin, 1990) les gestionnaires ont développé des repeuplements en juvéniles produits à partir de géniteurs locaux. La SHL, dans ce contexte, a développé dans les 3 lacs de l'ORE des campagnes de marquage à grande échelle afin d'évaluer l'évolution des contributions respectives du soutien d'effectifs et du recrutement naturel. Les programmes de repeuplement au Léman ayant donné de très bons résultats (Champigneulle et Gerdeaux, 1995), le pacage a été étendu au lac du Bourget en période d'eutrophisation (Champigneulle *et al.*, 2001). Les captures ont atteint des niveaux record dans les années 90 mais elles sont en forte baisse depuis le début des années 2000 et ce malgré la réoligotrophisation qui ne semble pas encore avoir amélioré la qualité/quantité des omblières profondes. En outre, les trop fortes températures de fin d'automne commencent à menacer la survie des oeufs issus des reproducteurs les plus précoces. Il s'en suit un questionnement relatif à la conservation de l'omble, l'omble est-il condamné ? Faudra-t-il assister sa fraie *in situ* et/ou continuer à faire du soutien d'effectifs ? Le réchauffement climatique va-t-il contrecarrer les effets bénéfiques de la réoligotrophisation ? Quelles sont les stratégies opérationnelles de gestion à mettre en œuvre pour conserver ces populations ?

Notre objectif est d'explorer et de valider une ingénierie de la conservation / réhabilitation d'une ressource naturelle exploitée et ce dans un contexte d'écosystèmes non stabilisés. Dans le cas de l'omble, l'enjeu majeur de conservation de la biodiversité se double d'importants enjeux socio-économiques (pêche professionnelle, restauration, pêche de loisir, fonctionnement des écloseries).

Plusieurs approches, détaillées ci-dessous, seront menées pour répondre à ces objectifs scientifiques et opérationnels. Il s'agit notamment de faire la part des évolutions liée au peuplement piscicole, aux changements trophiques, aux aspects pathologiques, à une exploitation/gestion non optimale et au réchauffement des eaux.

Opérations et démarches

♦ **Diagnostic et évolution du peuplement piscicole.** Le premier travail porte sur la validation du diagnostic de baisse des indices d'abondance. L'unité possède des séries de données sur la pêche (amateurs, professionnels et reproducteurs) permettant de suivre des évolutions d'indices d'abondance (CPUE). Par ailleurs les statistiques de captures suggèrent, en relation avec la réoligotrophisation, l'existence de changements majeurs dans la composition du peuplement piscicole des lacs Léman et Bourget avec: un fort développement du brochet (prédateur), une sous-exploitation de la lotte (prédatrice), une régression du gardon (d'où une hypothèse de report de prédation sur les salmonidés) et un retour important du corégone (espèce compétitrice?).

♦ **Evaluation du pacage lacustre.** Des campagnes de marquage des juvéniles de repeuplement menées dans la phase eutrophe ont montré une forte contribution du pacage aux populations et aux pêcheries d'omble. De nouvelles campagnes (2003 et 2004 au Bourget ; 2007 au Léman) sont développées pour évaluer ce qu'il en est en phase de réoligotrophisation. Les campagnes de marquage menées au lac d'Annecy fournissent des références importantes en lac oligotrophe (Zanella, 2003).

♦ **Changement climatique et traits de vie de l'Omble.** La zone ORE (lac Léman et Bourget) abrite les populations les plus méridionales de l'aire de répartition naturelle de l'espèce. Ceci place donc l'ORE de façon idéale pour aborder pour cette espèce modèle l'influence du réchauffement climatique et ce d'autant plus qu'un programme de recherche est mené par C. Gillet (CR INRA) sur l'influence de la température sur l'écophysiologie de la reproduction de l'omble et la qualité des oeufs. Ces approches permettront à terme de fournir des scénarios d'évolution des populations d'omble en fonction de diverses hypothèses en lien avec des paramètres limnologiques (accroissement thermique, évolution O₂, brassage du lac).

♦ **Aménagement de la fraie.** Les omblières naturelles traditionnellement connues au Léman ont été cartographiées et décrites en fin des années 80 grâce à des campagnes de plongées en bathyscaphe organisées par la Suisse au Léman (Rubin, 1990). Le même type d'approche a été pratiqué plus récemment dans le cadre de tentatives de création/régénération d'omblières, programme relancé par la Suisse mais l'outil bathyscaphe n'est plus disponible. Les omblières étant géoréférencées, les techniques d'acoustique devraient permettre de mener un travail visant à caractériser la dynamique spatio-temporelle de présence des géniteurs d'omble sur ces omblières anciennes et celles nouvellement créées ou renaturées. Pour les aménagements d'omblière, comme dans le cas du pacage, des évaluations chiffrées seront à faire en terme de comparaison de rentabilité/coûts et de gestion durable en intégrant les objectifs de gestion affichés par les gestionnaires.

Relation avec le volet « limnologie » de l'ORE

Plusieurs variables d'état de l'écosystème lacustre sont aussi les variables qui agissent directement sur les populations d'ombles et sur les scénarios d'évolution de leurs dynamiques. Ce projet omble apporte également une bonne lisibilité à l'extérieur car il correspond à une demande socio-économique forte (pêcheurs professionnels et restauration, pêche de loisir).

Stratégies et échantillonnage

Les chroniques d'évolution des captures (base de données ORE) et des indices d'abondance de type CPUE (ex. : capture par sortie de pêche amateur, CPUE de géniteurs /filet) seront analysées. Par ailleurs des analyses scalimétriques permettront de connaître les évolutions en terme de structure d'âge et de croissance. La totalité des ombles déversés au Bourget et au Léman a été marquée par fluoromarquage des otolithes à l'alizarine redS (Caudron et Champigneulle, 2006). Les cohortes marquées seront suivies pour faire un bilan. Les évaluations des contributions respectives du pacage et du recrutement naturel seront comparées en phase d'eutrophisation puis de réoligotrophisation. Le cas du lac d'Annecy fournira une référence oligotrophe. Dans les cas où le marquage aura été total, les caractéristiques (structure d'âge, croissance, sexe-ratio, maturation/reproduction ...) des ombles issus des deux origines de recrutement seront comparées.

Des recherches seront menées en milieu contrôlé (Installations Expérimentales de la SHL) sur le rôle du facteur thermique dans l'écophysiologie de la reproduction de l'omble. Par ailleurs, des travaux seront menés en mésocosme sur l'utilisation de frayères expérimentales de différents types (granulométrie, présence ou non d'upwelling) qui seront comparées (densité en œufs, survie embryolaire, évolution du micro-habitat de fraie).

Coordination

Ce projet sera **coordonné par A. Champigneulle** (IR INRA)

Chercheurs impliqués

Gillet, Guillard (CARRETEL)

Partenariat

Réseau européen Charr net (<http://www.charrnet.org/>).

Les gestionnaires et Associations de pêcheurs des divers lacs de l'ORE sont associés à ce projet.

ANNEXE 2 DECLARATION d'INTENTION

Propositions pour une étude des peuplements de mollusques des trois grands lacs subalpins
Annecy, Bourget et Léman

Etat des connaissances

♦ *Lac Léman*

Seule la partie occidentale du lac Léman (Petit Lac) a fait l'objet d'un inventaire détaillé de ses population de mollusques (Favre, 1927 ; 1935). A partir des prospections réalisées dans la seconde moitié du XXe siècle, Lods-Crozet (1984) a montré l'évolution de la faune benthique littorale de ce plan d'eau depuis la fin du XIXe siècle. Par ailleurs, la distribution bathymétrique de différents taxons incluant plusieurs espèces de gastéropodes a également été établies (Lods-Crozet & al., 1985). Malheureusement, les espèces de bivalves appartenant au genre *Pisidium* (Sphaeriidae) n'ont pas toujours été déterminées. Quelques prospections ont également été réalisées au niveau de Nernier et d'Yvoire et dans le Grand Lac au niveau de Thonon-les-Bains et de Sciez (Mouthon, 1987).

♦ *Lac d'Annecy*

Les données anciennes sont rares et ne concernent que quelques genres de mollusques. Elles figurent dans les travaux de Forel (1884), Le Roux (1907-1908) et Juget (1954) ainsi que dans une collection déposée au Muséum de Genève qui n'avait jamais fait l'objet de publication. Cette collection renferme des spécimens récoltés par Favre antérieurement aux années 40.

A l'occasion de recherches sur la dermatite cercarienne (les gastéropodes appartenant à la famille des Lymnaeidae sont des hôtes intermédiaires) un inventaire des populations de mollusques de la zone littorale du lac a été réalisé (Mouthon & Dubois, 2001). Après étude de la collection Favre, les stations échantillonnées par ce dernier, toutes situées dans la partie nord du lac, ont à nouveau été prospectées afin de mettre en évidence les changements survenus dans la composition et la structure des peuplements entre ces deux époques (Mouthon, 2002). Les assemblages fossiles des craies de ce lac ont également été étudiés à partir de 8 sondages réalisés en différents points de sa zone littorale par le personnel du département des recherches archéologiques subaquatiques d'Annecy. Une comparaison entre les peuplements fossiles et actuels a été réalisée, les principaux résultats obtenus figurent dans Mouthon & Magny (Arch. Hydrobiol., 2004).

♦ *Lac du Bourget*

Un inventaire très détaillé (des dragages ont été effectués sur 160 points) des peuplements de mollusques de ce lac a été réalisé au cours de la première moitié du XXe siècle (Favre 1940). Depuis cette date, aucun relevé n'a été effectué jusqu'en 1992 au cours de laquelle différentes profondeurs le long de deux transects longitudinaux ont été échantillonnées dans le cadre de la mise au point d'un indice de qualité malacologique des lacs (Mouthon, 1993). Plus récemment, la prospection d'une trentaine de stations de la zone littorale a été réalisée cette fois dans le cadre de recherches sur la dermatite cercarienne.

Perspectives

♦ *Lac d'Annecy*

Compléter l'état des lieux des malacocénoses de ce plan d'eau (cf. recommandations de la Directive Cadre Européenne) par la prospection de profondeurs ≤ 10 m au niveau de plusieurs transects.

♦ *Lac du Bourget*

C'est le seul grand lac français pour lequel on dispose d'un inventaire détaillé de ses peuplements de mollusques antérieur aux années 40. Une comparaison de ces données aux peuplements actuels serait évidemment riche d'enseignement sur l'évolution du plan d'eau.

Trois étapes sont envisagées :

(1) Poursuivre la prospection des peuplements de la zone littorale et l'étendre aux zones sublittorale et profonde.

(2) Comparer les peuplements actuels à ceux des années 40 ; les premières observations montrent que des changements spectaculaires sont intervenus dans la composition et la structure des malacocénoses de la zone littorale du lac (de 0 à 2-3 m de profondeur) entre 1940 et aujourd'hui.

(3) Comparer les peuplements actuels et des années 40 aux assemblages fossiles (cf. lac d'Annecy) : deux carottes extraites des dépôts crayeux de la zone littorale du lac ont déjà été analysées.

Une comparaison de l'histoire malacologique de ces grands lacs subalpins peut également être envisagée à plus long terme.

Par ailleurs, la présence d'une espèce invasive *Corbicula fluminea* dans les lacs d'Annecy et du Bourget mérite peut-être quelque intérêt. En effet, ce bivalve qui se nourrit préférentiellement de phytoplancton peut rapidement atteindre des densités importantes et par conséquent avoir un impact sur la flore et la faune de ces plans d'eau. *C. fluminea* n'a pas encore été signalé dans le Léman.

collaboration ORE

Très conscient du caractère individualiste de la démarche proposée inhérent à ce type d'investigation, je suis disponible pour une participation à un thème de recherche pluridisciplinaire prenant en compte le benthos et par conséquent les mollusques, dont la teneur reste évidemment à définir.

Jacques Mouthon (CR CEMAGREF, Biologie des écosystèmes aquatiques Cemagref Lyon)