

# Observatoire et rétro-observatoire de l'état écologique des plans d'eau d'altitude:

Rapport final

Action n° 19 du Programme 2010 au titre de l'accord  
cadre Agence de l'Eau ZABR

Charline Giguet-Covex, Fabien Arnaud, Bruno Wilhelm, Pierre  
Sabatier, Laurent Millet, Valérie Vernaux, Marie-Elodie Perga, Emilie  
Chalmin, Nathalie Cottin, Emmanuel Naffrechoux, Jean-Louis Reyss



# Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

---



### Table des Matières

Introduction.....	4
<i>Problématique.....</i>	<i>4</i>
<i>Objectifs.....</i>	<i>6</i>
Présentation des sites d'étude.....	8
I. <i>Le Lac de La Thuile.....</i>	<i>10</i>
II. <i>Le Lac d'Anterne.....</i>	<i>11</i>
III. <i>Le Lac du Lauzanier.....</i>	<i>11</i>
IV. <i>Le Lac d'Allos.....</i>	<i>12</i>
L'approche d'observation : Évaluation de la qualité biologique des lacs de Lauzanier, Anterne et Allos par l'Indice Biologique Lacustre (IBL).....	15
I. <i>Introduction.....</i>	<i>16</i>
II. <i>Matériel et méthode.....</i>	<i>17</i>
II.1. Protocole d'échantillonnage des macroinvertébrés pour les IBL.....	17
II.2. Méthode de calcul de l'IBL.....	17
III. <i>Résultats.....</i>	<i>18</i>
IV. <i>Interprétation : la qualité biologique actuelle des lacs par l'Indice Biologique Lacustre....</i>	<i>19</i>
L'approche d'observation : Suivis physico-chimique.....	23
I. <i>Introduction.....</i>	<i>24</i>
II. <i>Les données du Lac d'Anterne : résultats et interprétation.....</i>	<i>24</i>
III. <i>Les données du Lac du Lauzanier : résultats et interprétations.....</i>	<i>26</i>
IV. <i>Les données du Lac de La Thuile : résultats et interprétations.....</i>	<i>27</i>
L'approche de rétro-observation : méthode.....	29
I. <i>Datation.....</i>	<i>30</i>
I.1. Les radioéléments.....	30
I.2. Les marqueurs chronostratigraphiques.....	31
II. <i>Granulométrie.....</i>	<i>31</i>
III. <i>Géochimie minérale.....</i>	<i>31</i>
III.1. Majeurs et traces sur échantillons discrets.....	31
III.2. Scanner de carotte itrax.....	32
IV. <i>Géochimie organique.....</i>	<i>32</i>
IV.1. perte au feu.....	32
IV.2. Pyrolyse Rock Eval.....	33
V. <i>Zooplancton et chironomes.....</i>	<i>33</i>
V.1. Etude du zooplancton.....	33
V.2. Etude des peuplement chironomidiens sub-fossiles.....	33
VI. <i>PCB.....</i>	<i>34</i>
L'approche de rétro-observation : sédimentologie et géochimie.....	35
I. <i>Le Lac de La Thuile.....</i>	<i>36</i>
I.1. Site de carottage	
I.2. Sédimentologie et datation	
I.3. Interprétation : histoire trophique du lac	
II. <i>Le Lac d'Anterne.....</i>	<i>.....</i>
II.1. Sites de carottage	
II.2. Sédimentologie et datation	

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

- II.3. géochimie minérale
- II.4. géochimie organique
- II.5. Interprétations : reconstitution de l'évolution de l'état écologique du lac

### III. *Le Lac du Lauzanier*.....

- III.1. Sites de carottage
- III.2. Sédimentologie et datation
- III.3. géochimie minérale
- III.4. géochimie organique
- III.5. Interprétations : reconstitution de l'évolution de l'état écologique du lac

### IV. *Le Lac d'Allos*.....

- IV.1. Sites de carottage
- IV.2. Sédimentologie et datation
- IV.3. géochimie minérale
- IV.4. géochimie organique
- IV.5. Interprétations : reconstitution de l'évolution de l'état écologique du lac

### L'approche de rétro-observation : les indicateurs biotiques.....

#### *I. Reconstruction de l'histoire fonctionnelle récente par l'étude des peuplements chironomidiens sub-fossiles*.....

- I.1. Remarque préliminaire : origine des capsules céphaliques de chironomes
- I.2. Lac d'Anterne
- I.3. Lac du Lauzanier
- I.4. Lac d'Allos

#### *II. Le zooplancton du Lac du Lauzanier*

### L'approche de rétro-observation : les PCB.....

- I. Le Lac d'Allos*.....12
- VI. Le Lac du Lauzanier*.....11
- VII. Le Lac d'Anterne*.....11



# Introduction

## Problématique

Dans le cadre de la DCE, les lacs d'altitude ont été pressentis par les gestionnaires comme de potentiels références permettant de juger de l'état écologique des plans d'eau en général, pour une région donnée. Les études récentes ont cependant montré que l'espoir de trouver dans ces systèmes, supposés éloignés de toute pression anthropique, un hypothétique état de référence était vain. En effet, loin d'être exempts de toute pression anthropique, ils sont le fruit d'une longue histoire d'interactions entre l'homme et son milieu. Dans les Alpes, la pression pastorale s'exerce ainsi sur les bassins versants d'altitude depuis la fin du Néolithique et a pu atteindre par le passé une intensité bien plus forte qu'actuellement (Tinner et al., 1996 ; Schmidt et al., 2002 ; Hausmann et al., 2002 ; Wick et al., 2003 ; Lotter et al., 2006 ; Schmidt et al., 2008 ; Giguet-Covex et al., 2011). Depuis la révolution industrielle et parfois bien avant, les lacs d'altitude ont par ailleurs été soumis à de nombreuses pollutions, plus ou moins distantes, d'origine atmosphérique ou locale (métaux, nutriments, micropolluants organiques) (Wolfe et al., 2001 ; Arnaud et al., 2005 ; Thévenon et al., 2011 ; Giguet-Covex et al., 2011). De plus, les conditions initiales étant propres à chaque lac (lithologie, surface et géomorphologie du bassin versant), elles ne peuvent être généralisées de l'un à l'autre. Dans ce contexte, les gestionnaires sont confrontés à un double problème : d'une part la méconnaissance d'un état de référence propre à chaque système et d'autre part le cruel manque de données quant à l'évolution récente de l'état écologique des plans d'eau d'altitude.

Dès lors, comment mettre en œuvre des politiques de mitigation de déséquilibres dont on ignore à la fois les causes et les conséquences et dont on ne sait bien souvent pas mesurer l'intensité par rapport à un niveau dit « naturel » ? L'approche paleolimnologique, par sa capacité à retracer l'évolution passée du lac, permet d'apporter des éléments originaux et efficaces de réponse à ces questions cruciales. L'idée est ici de baser le diagnostic environnemental de chaque lac, non sur un hypothétique état initial, mais sur la reconstruction de sa trajectoire évolutive. La mise en évidence de dates de ruptures dans cette trajectoire permettra de remonter aux perturbations subies par le système lacustre et d'en identifier les causes par comparaison avec l'histoire des activités humaines dans le bassin versant et au-delà. En distinguant pressions locales et pressions distantes il sera alors possible pour le gestionnaire de décider des actions efficaces à mener pour restaurer ou conserver la qualité du milieu.

Cinq facteurs sont pressentis comme potentiels perturbateurs de l'état écologique récent des systèmes lacustres : l'activité pastorale et la présence de refuge dans les bassins versants, les apports d'azote atmosphérique liés aux activités humaines en plaine et dans les vallées, l'alevinage et le réchauffement climatique global. L'activité pastorale peut constituer une source de nutriments supplémentaire pour l'écosystème (Hausmann et al. 2002), mais aussi déstabiliser les sols et augmenter les apports sédimentaires (minéraux et organiques) vers le lac et ainsi limiter les apports de lumière et donc la productivité lacustre. Son histoire est propre à chaque lac. Les apports atmosphériques azotés peuvent également constituer une source supplémentaire de nutriments. Des changements de niveaux trophiques causés par cette pollution atmosphérique ont été mis en évidence dans plusieurs lacs arctiques et alpins (Montagnes Rocheuses, Colorado) (Baron et al., 2000 ; Wolfe et al., 2001 ; Wolfe et



# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

*al.*, 2003 ; Holmgren *et al.*, 2010). Une étude de 1989 sur le Lac de Bastani (2089 m, Corse) a également suggéré une eutrophisation récente liée une pollution longue distance (Roche

et Loye-Pilot, 1989). Afin d'évaluer les effets potentiels de ce facteur sur les lacs étudiés, il s'agira dans un premier temps de comparer nos reconstructions de changements d'état écologique avec l'histoire des pollutions atmosphériques azotées connue par l'étude de carottes de glace dans les Alpes (figure 1 ; GJenk *et al.*, 2006 ; Sigl *et al.*, 2006). Les concentrations en nitrate et ammonium commencent à augmenter en 1950 et atteignent leur maximum dans les années 1975-1990 ou 1985-2005 selon les sites. Dans un second temps (deuxième volet du projet) nous mesurerons également le  $\delta^{15}\text{N}$ , qui a déjà été utilisé dans différentes études (Talbot, 2001 ; Wolfe *et al.*, 2001 ; Holmgren *et al.*, 2010) pour déterminer l'origine de l'azote préservé dans les sédiments.

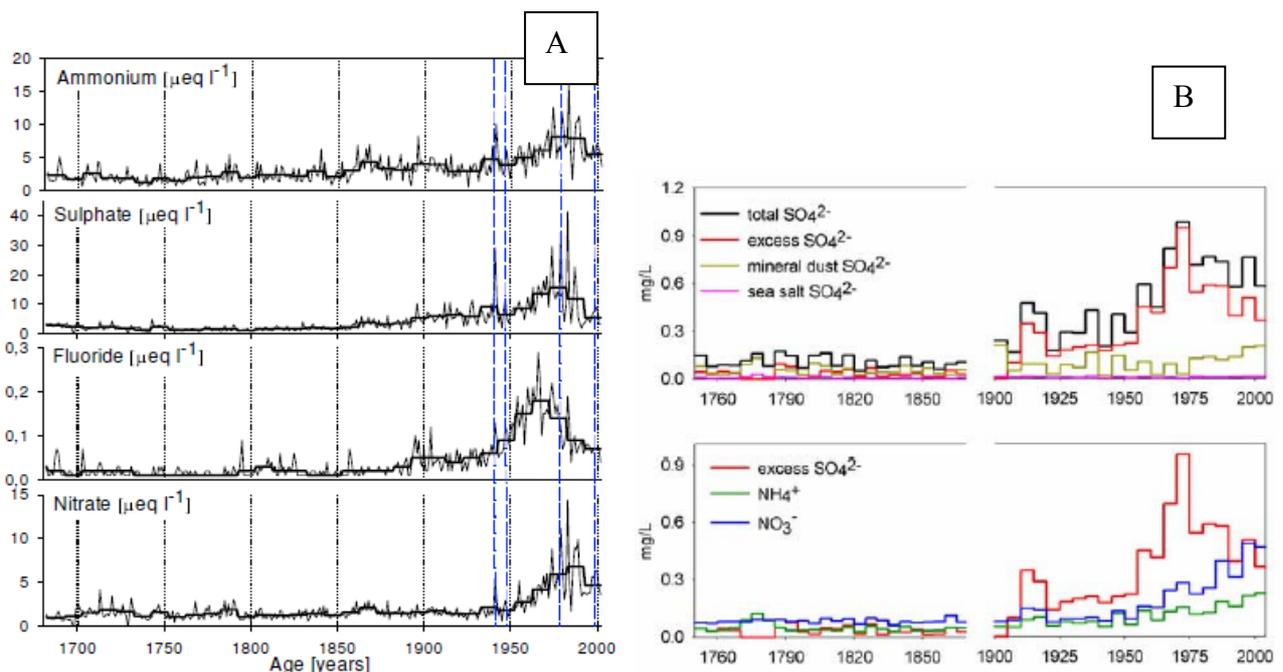


Figure 1. Concentrations en Ammonium, sulfate, fluore et nitrate mesuré dans des carottes de glace des glaciers de Fiescherhorn (A) et de Colle Gnifetti (B) dans les Alpes Suisses, liées aux émissions anthropiques dès le début de l'industrialisation (GJenk *et al.*, 2006 ; Sigl *et al.*, 2006 respectivement).

Les introductions de poisson peuvent induire des interactions trophiques en cascade par l'intermédiaire de la prédation du zooplancton. L'augmentation de cette prédation aurait pour conséquence une diminution du broutage des algues et donc une augmentation de leur concentration. Ce type de réponse a déjà été mis en évidence dans les montagnes rocheuses canadienne et dans des lacs d'altitude en Italie (Leavitt *et al.*, 1994 ; Marchetto *et al.*, 2004). En outre, l'introduction de poissons constitue une petite source supplémentaire de nutriments pour le système (notamment à travers les excréments), laquelle peut contribuer à une augmentation de la biomasse algale (Leavitt *et al.*, 1994).

Enfin, le réchauffement climatique induit des modifications de la durée de l'englacement de la surface du lac ce qui augmente la production primaire et limite la période de désoxygénation des eaux au fond du lac (Catalan *et al.*, 2002 ; Lotter *et Psenner*, 2004).

De plus l'hydrologie peut aussi être modifiée et impliquer des changements d'état écologique (changement dans les apports de sédiments, nutriments, caractéristiques physico-chimiques de l'eau entraînant des changements biotiques).

### Objectifs

Ce projet propose donc de retracer l'évolution sur les derniers siècles de l'état écologique de plusieurs lacs d'altitude situés dans des environnements variés et soumis à des pressions anthropiques différentes :

- ❖ les lacs du Lauzanier et d'Allos dans le Parc du Mercantour qui présentent actuellement des pressions pastorales relativement importantes,
- ❖ le Lac d'Anterne dans la réserve naturelle de Sixt-Passy caractérisé par une sédimentation essentiellement détritique provenant de l'érosion des versants,
- ❖ et le Lac de La Thuile dans le massif des Bauges, qui est un lac de moyenne altitude dont le bassin versant est fortement anthropisé (village au bord lac, prairie pâturée).

Les sédiments lacustres, par leur capacité à piéger de façon chronologique les produits de l'érosion des bassins versants, les pollutions atmosphériques, mais aussi le matériel produit à l'intérieur du lac représentent des archives intéressantes pour étudier ces changements d'état écologique et apporter des informations sur leurs causes. Pour cela, nous proposons d'analyser les caractéristiques physico-chimiques du sédiment (couleur, granulométrie, géochimie minérale et organique), ainsi que la composition du phytoplancton, du zooplancton et des chironomes préservés dans les sédiments.

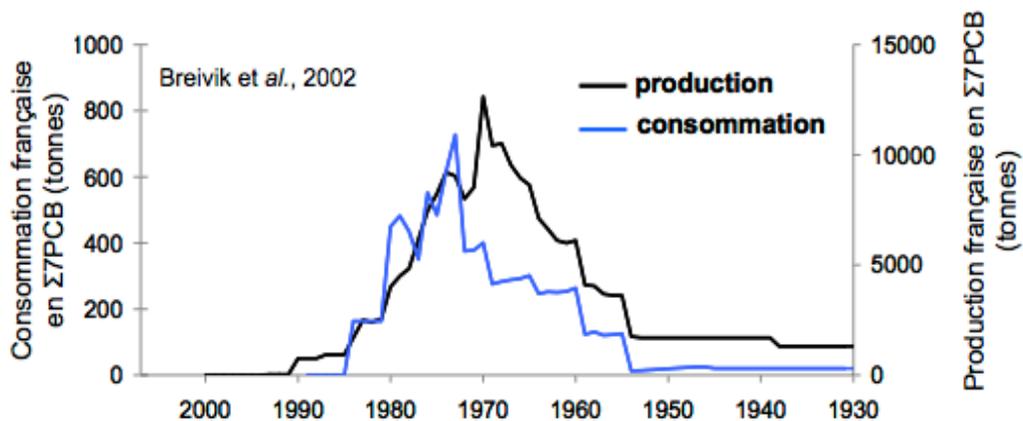


Figure 2 : production et consommation française (Breivik et al., 2002).

Des analyses de micropolluants organiques (polychlorobiphenyl, PCB) sont également proposées afin de retracer l'évolution de la concentration de ces polluants anthropiques (synthétisés par l'homme) apportés par voie atmosphérique dans les sédiments. Leur évolution pourra être interprétée au regard de la courbe de production et consommation globale de ces polluants (Breivik et al., 2002 ; figure 2). Depuis l'interdiction de leur production en 1987 en France, les sources actuelles pour les zones de montagne sont les fuites des systèmes encore en service, les rejets illicites et la ré-émission à partir de sites contaminés (volatilisation à partir de sols pollués). D'autres émissions minoritaires

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

peuvent provenir de l'incinération de déchets industriels contenant des PCB ou des sources chlorées, et d'incendies de transformateurs ou de condensateurs électriques. Une fois libérés dans l'atmosphère, les PCB, peuvent être transportés sur de très longues distances lorsqu'ils sont adsorbés sur les particules atmosphériques, et ainsi contaminer des lieux éloignés de la source de pollution. Sur le bassin du Rhône, Trois établissements sont susceptibles de constituer des sources de PCB: TREDI à Saint-Vulbas (01) AREVA à Aix les Bains (73) et ARKEMA St Auban à Château-Arnoux (04). La figure 3 présente à titre d'indication les concentrations actuelles mesurées dans l'air à l'échelle européenne. Les Alpes font parties des zones où des concentrations assez importantes sont mesurées.

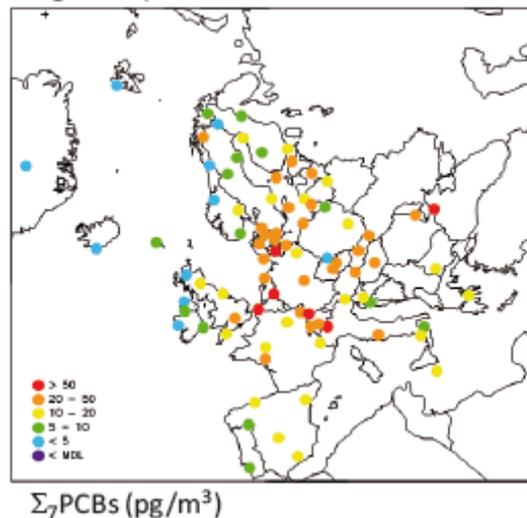


Figure 3. Variabilité spatiale des 7 PCB dans l'air (Halse et al., 2011).

Les analyses de PCB réalisées permettront d'évaluer les apports après arrêt de la production et éventuellement de raisonner en termes de source proche ou lointaine. Cette pollution atmosphérique pourra également permettre de déterminer la sensibilité des sites aux apports atmosphériques azotés et de mieux évaluer son effet sur l'état écologique des différents lacs.

Quatre lacs supplémentaires (le Pontet et Eychauda dans les Ecrins, Petit dans le Mercantour, et Blanc en Belledonne) seront étudiés. Cette multiplication des sites d'étude permettra d'avoir des lacs répartis à des distances différentes des zones d'émission actuelles de polluants et ainsi de mieux comprendre la dynamique atmosphérique de ces polluants. En outre, ceci apportera une meilleure compréhension de la relation entre les typologies de lacs, leurs niveaux trophiques et les concentrations retrouvées dans les sédiments (Berglund et al., 2000).

Cette approche de rétro-observation, par l'analyse des sédiments lacustres, est également complétée par une approche d'observation apportant des informations sur l'état et le fonctionnement actuel des systèmes lacustres. En complément de ces suivis, des IBL (indice biologique lacustre) seront réalisés sur les lacs d'Anterne, Allos et Lauzanier afin d'évaluer le potentiel biogène des lacs et la qualité du fonctionnement de l'écosystème. Ces résultats pourront être mis en regard de ceux obtenus par l'approche paléolimnologique.

## Présentation des sites d'étude

### I. Le Lac de La Thuile

Le Lac de La Thuile se situe dans le Massif des Bauges à 869 m d'altitude. Les formations géologiques sont de type marno-calcaires (Valanginien-Berriasien ; figure 4). La moitié du bassin versant est recouverte par la forêt, tandis que l'autre est formée de prairies. La particularité de ce lac plus bas en altitude que les autres, est la présence d'un village dans le bassin versant. Une station d'épuration a été installée en 1995, afin de traiter les eaux usées. Sa capacité est de 150 habitants. A titre d'indication, l'évolution de la population depuis la fin des années 60 est présentée sur la figure 5.

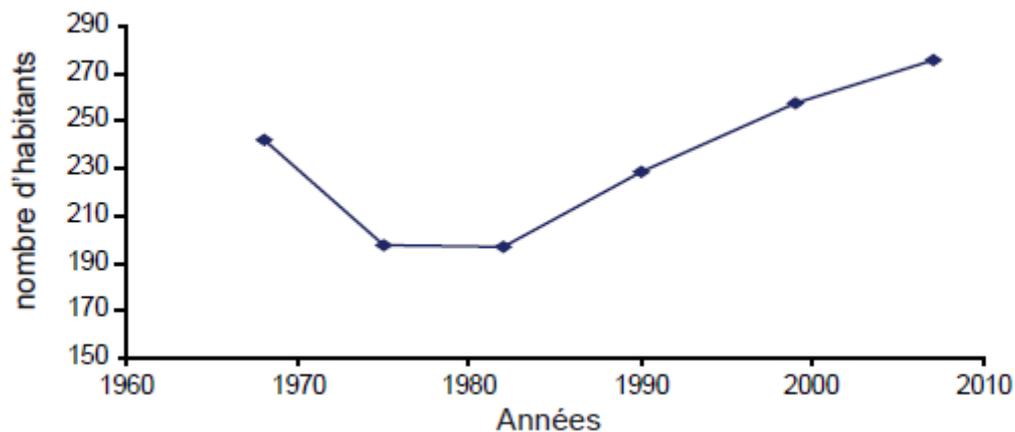
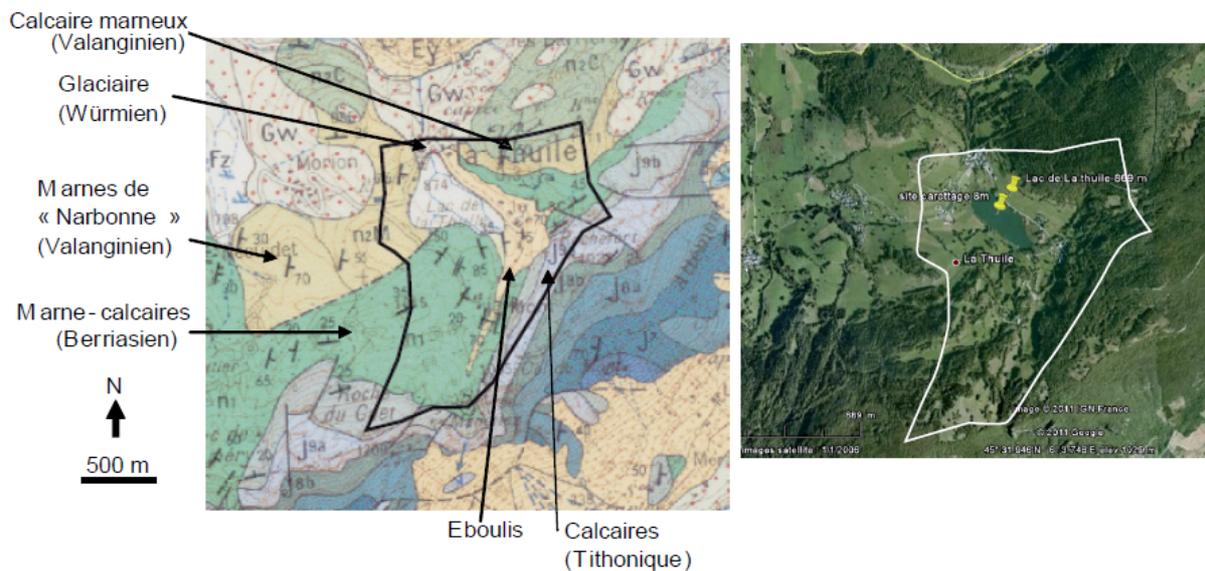


Figure 5. Evolution de la population de la commune de La Thuile.

### II. Le Lac d'Anterne

Le lac d'Anterne se situe dans la réserve naturelle de Sixt-Passy en Haute Savoie, sur le massif calcaire et schisto-calcaire d'Arve-Giffre. Bien que la géologie soit relativement homogène, les sols sont très diversifiés (figure 6). Le lac est entouré d'une prairie subalpine (herbacées et quelques zones de landes à rhododendrons et myrtilles). Les fortes pentes et la présence de terres noires rendent le bassin versant très sensible aux processus d'érosion. Cette caractéristique se traduit par une sédimentation essentiellement détritique dans le lac. Le bassin versant est pâturé actuellement. Dans les archives communales il est mentionné que la montagne d'Anterne a été pâturée par des bovins.

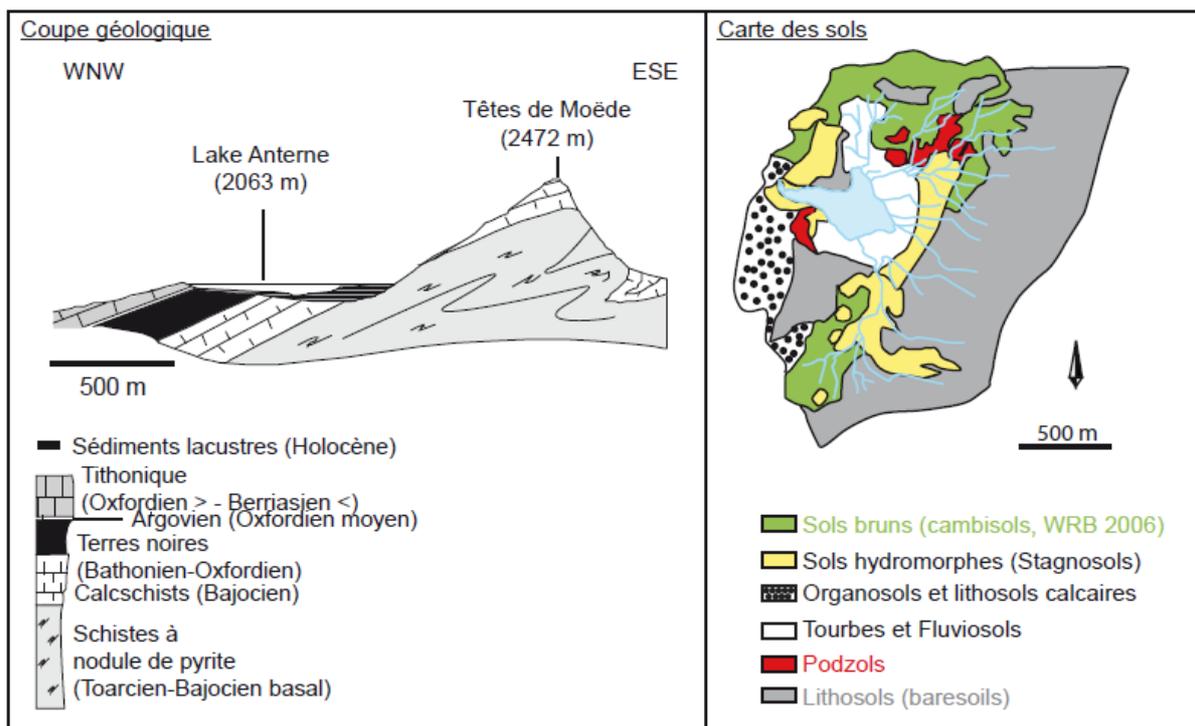


Figure 6. Géologie et carte de sols du bassin versant (J. Poulénard ; Giguet-covex et al., 2011).

### III. Le Lac du Lauzanier

Le lac du Lauzanier se situe au sein du massif de l'Ubaye, dans les Alpes de Haute-Provence (Parc du Mercantour). La géologie du bassin versant est composée des grès d'Annot, de marnes et de calcaires nummulitiques (figure 7). Nous pouvons noter la présence de deux failles sur les bordures est et ouest du lac. Ceci suggère une sensibilité importante à la sismicité pouvant affecter le remplissage sédimentaire. Le lac est entouré de prairies pâturées par les moutons.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

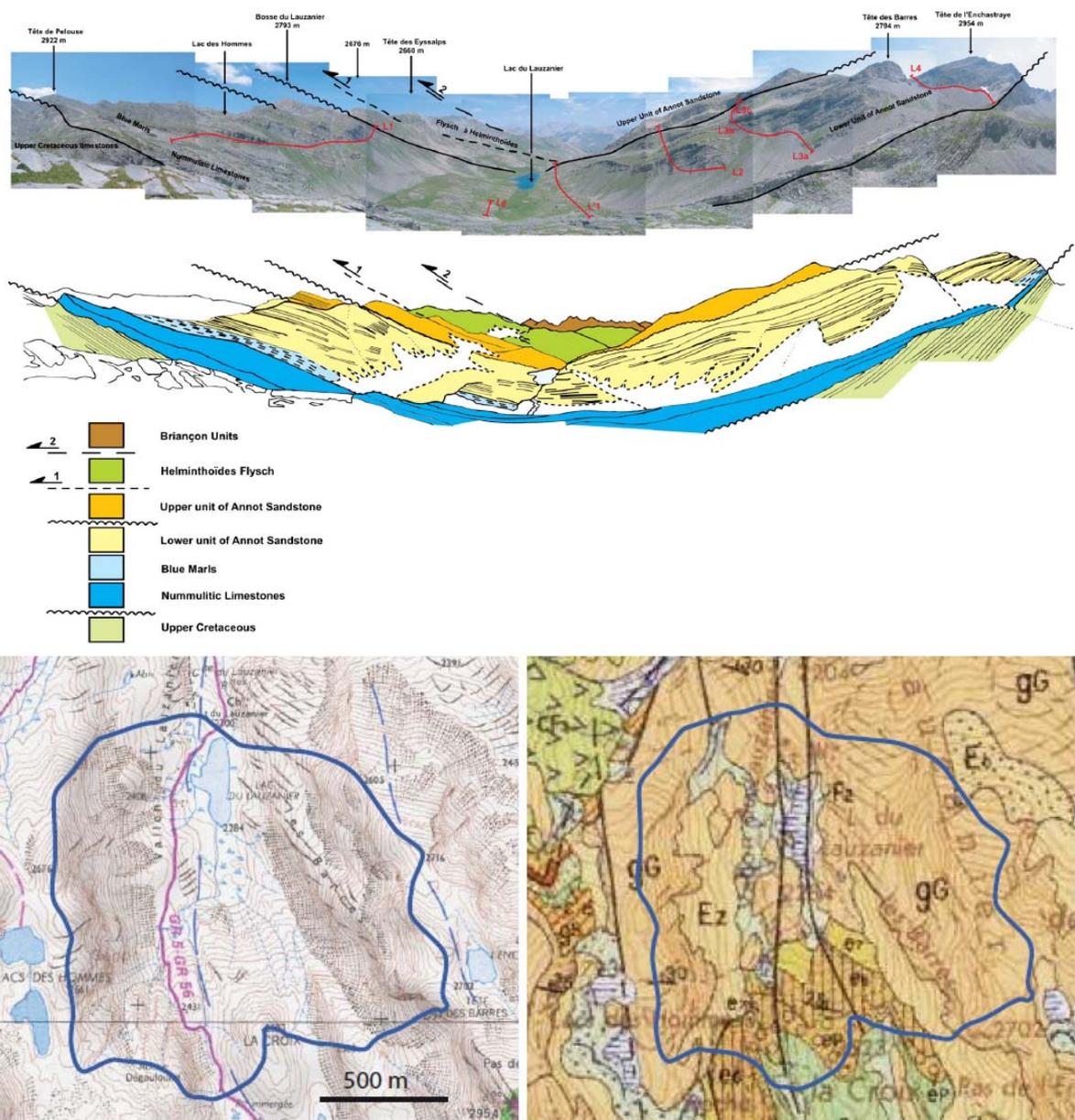


Figure 7. Coupe géologique du bassin versant du Lac du Lauzanier (Mulder et al. 2010) : Grès d'Annot, marnes et calcaires nummulitiques. La carte géologique (en bas à droite) montre que le lac est cerné par deux failles orientées nord-sud.

### IV. Le Lac d'Allos

Le lac d'Allos se trouve également dans le parc du Mercantour. C'est le plus grand lac naturel d'Europe à une telle altitude. Il présente un marnage maximal de 9 m. Son bassin versant est principalement composé de grès d'Annot, de conglomérats et un peu de calcaire (figure 8). Contrairement aux autres lacs de haute altitude de notre étude, il présente une forêt éparse de mélèzes (figure 8). La pression pastorale dans ce bassin versant est

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

actuellement très forte. De plus, au début du 20<sup>ème</sup> siècle, un refuge a été installé sur la bordure nord-ouest du lac.

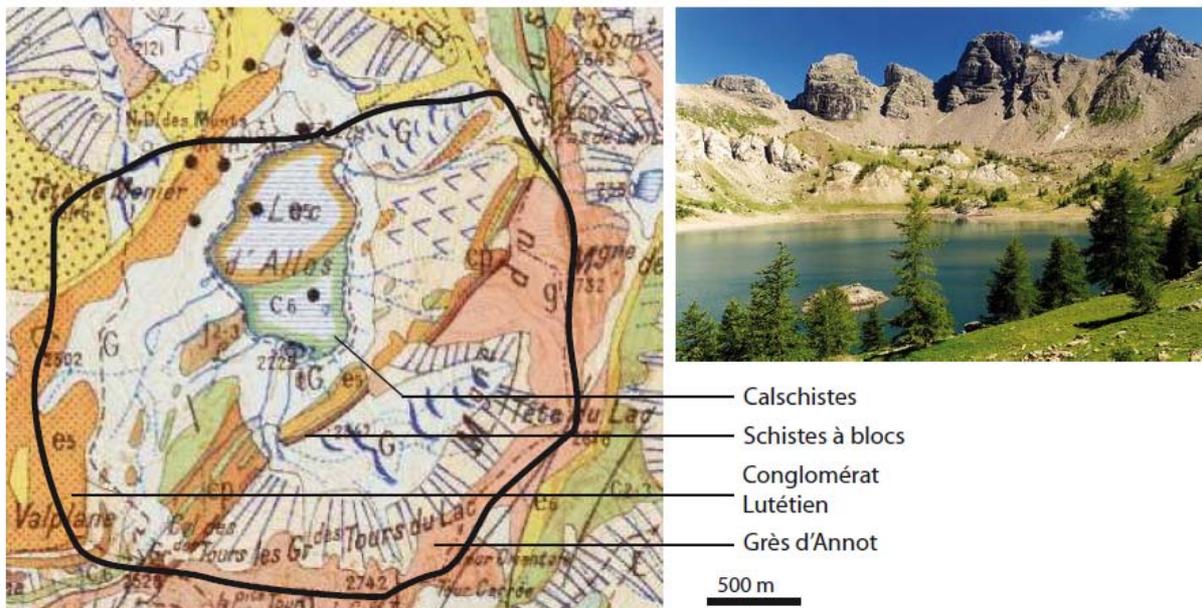
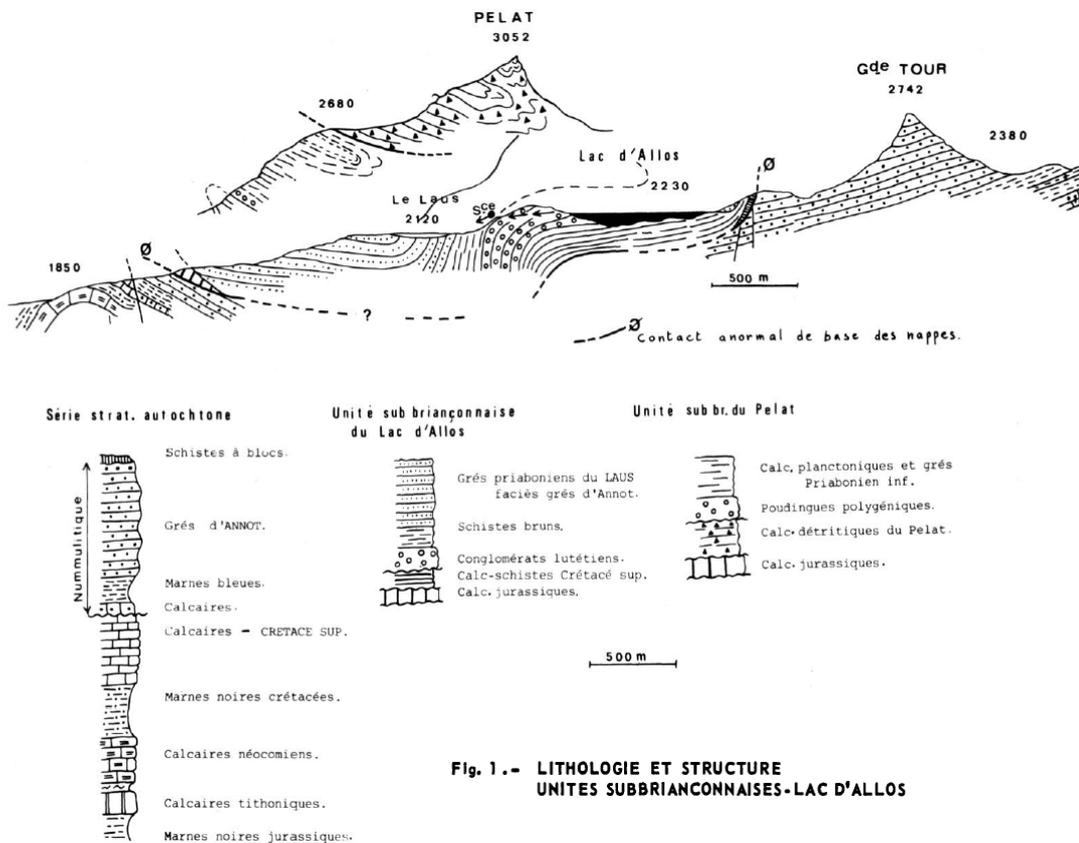


Figure 8. Coupe géologique du bassin versant du Lac d'Allos (Jorda, 1976 ; en haut). Carte géologique et contour du bassin versant (en bas à gauche). Photo du lac montrant la présence de forêts éparées de Mélèzes dans le bassin versant (en bas à droite).

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Les lacs d'Anterne, Allos et Lauzanier situés à plus de 2000 m d'altitude (tableau 1), font partie des lacs alpins de haute altitude, de type N1 pour Anterne et Lauzanier et de type N2 pour le lac d'Allos (typologie nationale des masses d'eau CEMAGREF).

	Superficie BV ha	Superficie Lac ha	Superficie Lac/BV %	Altitude m	Profondeur maximale m	Conductivité surface $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
ALLOS	520	50	9.6	2228	42	105
ANTERNE	278	11.6	4.2	2063	13.2	148
LAUZANIER	159.5	3.1	1.9	2284	7.5	150
LA THUILE	~150	14.7	9.8	869	8	330

Tableau 1. Principales caractéristiques des lacs étudiés.

**L'approche d'observation :**

***Évaluation de la qualité biologique des lacs  
de Lauzanier, Anterne et Allos par l'Indice  
Biologique Lacustre (IBL)***

### I. Introduction

L'IBL est un indice biocénotique proposé pour évaluer la qualité biologique globale des écosystèmes lacustres (Verneaux *et al.*, 2004).

Basé sur une étude des macroinvertébrés peuplant les substrats meubles l'indice permet de proposer des conclusions relatives (figure 9)

- au potentiel biogène des lacs, en relation avec la minéralisation des eaux
- à la qualité du fonctionnement de l'écosystème, c'est-à-dire la capacité du lac à transférer la matière organique (autochtone et/ou allochtone) au sein du réseau de consommateurs de manière plus ou moins efficace par rapport à un modèle théorique de transfert optimal dépendant du type lacustre.

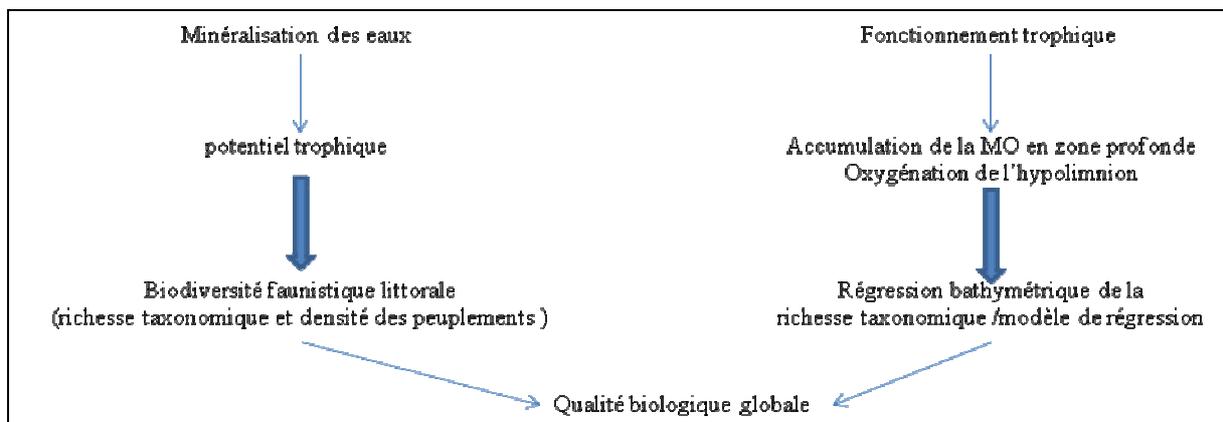


Figure 9. Principes d'interprétation de l'indice biologique lacustre

L'IBL a été appliqué sur les lacs du Lauzanier et d'Anterne en 2010 par le laboratoire de Chrono-environnement (UMR CNRS/UFC 6249, Besançon) et sur le lac d'Allos en 2007 par le bureau d'étude GREBE (Groupe de Recherche et d'Etude Biologie et Environnement, Lyon).

Les Chironomidae (Insecta : Diptera) sont une des composantes majeures (nombre d'espèces et densité) du macro-benthos lacustre. Le développement larvaire passe par quatre stades ponctués par la production d'exuvies dont les parties bien chitinisées (les capsules céphaliques) présentent la particularité de se conserver dans les dépôts sédimentaires (des capsules céphaliques vieilles de plus de 100 000 ans ont été retrouvées dans les sédiments des Echets). Après extraction et identification (le plus souvent au niveau générique) des ces restes subfossiles (capsules céphaliques) contenues dans les archives sédimentaires, la composition des communautés anciennes et leur évolution au cours du temps peuvent être reconstituées. Ainsi, l'approche paléolimnologique peut pallier à l'absence de données instrumentées en indiquant:

- un état des communautés « pré-perturbation »
- la réponse des communautés de Chironomidae aux changements de fonctionnement lacustre
- les facteurs de perturbations potentiels à partir des préférences écologiques connues des différents taxa impliqués dans ces dynamiques des communautés.

### II. Matériel et méthode

#### II.1. Protocole d'échantillonnage des macroinvertébrés pour les IBL

Les substrats minéraux meubles ont été échantillonnés en zone littorale et profonde à l'aide d'une benne Ekman (surface d'échantillonnage de 215 cm<sup>2</sup>), excepté en zone littorale du lac d'Anterne où un filet de Surber a été utilisé (surface d'échantillonnage de 1/20 m<sup>2</sup>). Sur les deux isobathes, le nombre d'échantillons est proportionnel à la longueur de chaque isobathe (tableau 2). Un échantillon correspond au contenu de deux bennes Ekman ou au contenu d'un filet de Surber. Après filtration sur le terrain dans un filet à 250 µm de vide de maille, chaque échantillon est conditionné avec du formaldéhyde à 10%.

	ALLOS	ANTERNE	LAUZANIER
Profondeur isobathe littorale	-10 à 14m	-2m	m
Profondeur isobathe profonde (0.66 *Zmax)	-32 à -39m	-9m	-5m
Longueur isobathe littorale = LI (km)		1.35	1
Nombre échantillons littoraux : nl = 4*Ln (10LI+1)	14	12	9
Longueur isobathe profonde = Lf (km)		0.9	0.6
Nombre échantillons profonds : nf= 2.5*Ln (10Lf+1)	7	6	4
Matériel d'échantillonnage à LI à Lf	Benne Benne	Surber** Benne	Benne Benne
Surface échantillonnée en littoral (m <sup>2</sup> )	0.63	0.6**	0.38
Surface échantillonnée en zone profonde (m <sup>2</sup> )	0.315	0.25	0.17
Date d'échantillonnage	juin 2007	juillet 2010	juin 2010

\*\* : échantillonnage réalisé par la FDPPMA Isère (L. Hibon, étudiante Master 2 Qualité des eaux des sols et traitements, Université Franche-Comté)

Données GREBE 2008

Tableau 2. Plan d'échantillonnage des trois lacs.

Au laboratoire l'ensemble des macroinvertébrés présents dans les échantillons sont extraits sous loupe binoculaire (X 40) puis identifiés selon les limites taxonomiques précisées dans la méthode IBL. La faune des échantillons littoraux du lac d'Anterne a été extraite par la FDPPMA Isère puis mise à disposition du laboratoire Chrono-environnement pour complément d'identification (Oligochètes et Diptères Chironomidae) et utilisation pour le calcul de l'IBL. Pour ce calcul, la faune issue de deux des échantillons littoraux du lac d'Anterne, ne correspondant pas à des substrats minéraux meubles (bryophytes et dalle), n'a pas été prise en compte.

#### II.2. Méthodes de calcul de l'IBL

Les descripteurs biocénétiques nécessaires au calcul de l'Indice Biologique lacustre sont :

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

- Richesse taxonomique littorale : vl
- Richesse taxonomique profonde : vf
- Densité du peuplement littoral : dl (ind.m<sup>-2</sup>)
- Qualité du peuplement littoral : ql = degré de sténoécie (tableau 3) du taxon le plus sténoèce présent dans au moins 50% des échantillons littoraux.  $0 \leq ql \leq 1$
- Coefficient de correction de la régression faunistique :  $k = (0.033 * vl) + 1$
- Régression faunistique :  $df = (k * vf) / vl$ ,  $0 \leq df \leq 1$

ql	Taxons repères (occ ≥ 50% nl)
1.0	<i>Ephemera</i> - <i>Paratendipes</i> - <i>Heterotrissocladius</i> –chaque genre de Plécoptères
0.9	Chaque genre de Trichoptères et Ephéméroptères exceptés <i>Ephemera</i> et <i>Caenis</i>
0.8	Chaque genre de Diamesinae et Orthoclaadiinae exceptés <i>Cricotopus</i> ( <i>lato sensu</i> ) et <i>Heterotrissocladius</i> , chaque genre de Tanytarsini exceptés <i>Cladotanytarsus</i> , <i>Paratanytarsus</i> et <i>Tanytarsus</i>
0.7	Chaque genre de Tanypodinae exceptés <i>Procladius</i> et <i>Tanypus</i> , chaque genre de Chironomini exceptés <i>Paratendipes</i> , <i>Dicrotendipes</i> , <i>Glyptotendipes</i> , <i>Tribelos</i> et <i>Chironomus</i>
0.6	<i>Sialis</i> , <i>Pisidium</i> , <i>Cladotanytarsus</i> , <i>Paratanytarsus</i> , <i>Tanytarsus</i> , Prodiamesinae
0.5	<i>Caenis</i> , <i>Tanypus</i> , <i>Dicrotendipes</i> , <i>Glyptotendipes</i> , <i>Tribelos</i> , <i>Cricotopus</i> ( <i>lato sensu</i> )
0.4	<i>Chironomus</i> , <i>Procladius</i>
0.3	Oligochètes exceptés les Tubificidae
0.2	<i>Chaoborus</i> - Tubificidae sans soies capillaires
0.1	Tubificidae avec soies capillaires, Nématodes

Tableau 3. Tableau de détermination de ql.

Les différents descripteurs permettent le calcul de deux sous-indices et de l'IBL résultant :

- Sous-indice biogénique littoral :  $BI = RACINE(vl) * LN(dl)$
- Sous-indice de déficit faunistique :  $Df = RACINE(k * vf / vl) * ql$  ;  $0 \leq Df \leq 1$  La valeur de Df est d'autant plus élevée
  - que la perte de taxons entre -2m et la zone profonde (df) est conforme à la perte prédite par le modèle de régression faunistique dépendant de la valeur de vl.
  - que le degré de sténoécie (ql) des taxons littoraux est élevé.

### III. Résultats

Les listes faunistiques obtenues par application du protocole de l'IBL en 2010 sont présentées en Annexe 2.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

	vl	dl (ind.m <sup>-2</sup> )	Bl	ql/1	k	vf	df	Df/1	<b>IBL/20</b>
<b>ALLOS</b>	14	4860	31.8	0.8	1.462	6	0.62	0.63	<b>11.2</b>
<b>ANTERNE</b>	24	2310	38	0.8	1.792	14	1	0.80	<b>14</b>
<b>LAUZANIER</b>	20	4879	40	0.8	1.66	11	0.9	0.76	<b>13.5</b>

Données GREBE 2008.

Tableau 4. Valeurs des descripteurs biocénétiques, des sous indices et de l'indice IBL des lacs Allos, Anterne et Lauzanier.

Avec des IBL respectivement de 14/20 et 13.5/20, les lacs d'Anterne et de Lauzanier présentent une qualité biologique globale moyenne qu'il convient d'interpréter en termes de potentiel trophique et de fonctionnement trophique. Le lac d'Allos, avec un IBL de seulement 11.2/20 possède une qualité biologique globale assez faible.

#### IV. Interprétation : la qualité biologique actuelle des lacs par l'Indice Biologique Lacustre

Pour les lacs d'Anterne et de Lauzanier, la valeur assez moyenne du sous-indice biogénique littoral (Bl) permet de les qualifier tous deux de lac mésobiotique (figure 10). Par rapport à d'autres lacs du même type (N1), comme Crop et Grand Domenon, la plus forte diversité faunistique littorale peut résulter d'une plus forte minéralisation des eaux conduisant à un potentiel trophique supérieur. Cependant, on note également pour ces deux lacs une valeur non optimale du sous-indice de déficit faunistique résultant :

- Pour le lac d'Anterne d'une occurrence faible en zone littorale de taxons les plus sténoèces (ql = 0.8) comme *Heterotrissocladius* (20% d'occurrence)
- Pour le lac du Lauzanier de l'absence en zone littorale de taxons les plus sténoèces (ql = 0.8) et d'une perte de richesse faunistique entre -2m et la zone profonde légèrement plus importante que ne prévoit le modèle de régression (df<1)

Ces deux lacs présentent donc un léger dysfonctionnement apparent. Le lac d'Allos montre un dysfonctionnement plus marqué et est qualifié de mésobiotique méso-dysfonctionnel.

Dans le lac d'Anterne, le dysfonctionnement trophique se traduit par une raréfaction des taxons les plus sensibles en zone littorale probablement associée à une augmentation de la densité du peuplement littoral. La répartition de la densité relative des taxons indicateurs en fonction de leur degré de sténoécie montre que la majorité des taxons indicateurs présentent un indice de sténoécie assez moyen de 0.8 (figure 11). En revanche ce peuplement, globalement peu sténoèce, est bien conservé jusqu'à la profondeur de  $0.66 \cdot Z_{max}$  (9m). Le lac est alors encore qualifié de lac eufonctionnel (figure 10). Cette isobathe « profonde » est cependant encore située dans la zone euphotique du lac dans laquelle les processus hétérotrophes de consommation de l'oxygène dissous sont compensés par l'activité photosynthétique. Il est donc probable que l'IBL minimise le problème de fonctionnement trophique du lac d'Anterne. Un prélèvement supplémentaire a été réalisé à la profondeur maximale, hors zone euphotique, afin de préciser l'évolution bathymétrique des peuplements de macroinvertébrés. Calculé entre -2m et la profondeur maximale (avec  $k=(0.047 \cdot vl)+1$ , Verneaux et al., 1993) le sous-indice de déficit faunistique Df est alors de 0.6 ce qui traduit un état intermédiaire entre méso et dysfonctionnel.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Le lac d'Anterne est probablement perturbé dans son fonctionnement trophique par des apports excédentaires de nutriments (d'origine atmosphérique ou locale) et /ou de matière organique provenant de son bassin versant. Ces excédents s'accumulent dès la zone littorale conduisant à la raréfaction des taxons les plus sténocécs et provoquant un développement important de taxons plus euryèces. Encore relativement peu marquées, même en zone plus profonde, les conséquences de ce dysfonctionnement trophique sont susceptibles de s'accroître.

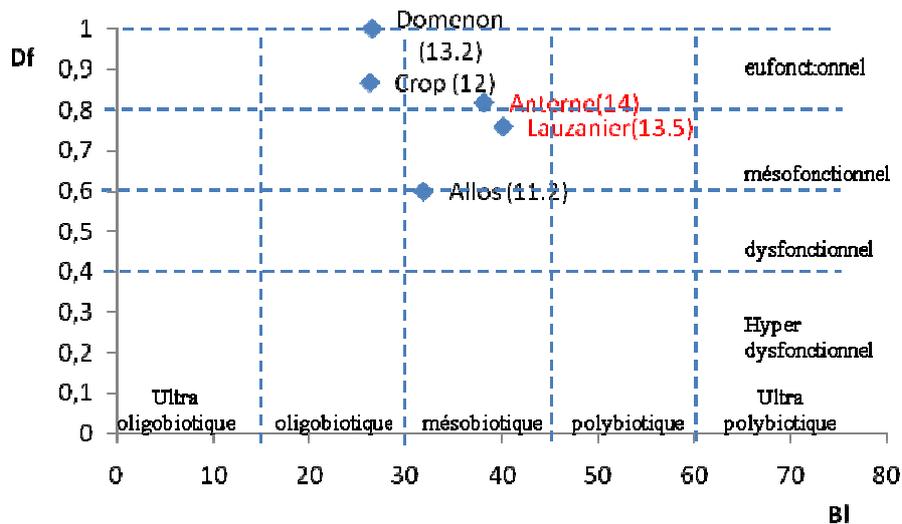


Figure 10. Positionnement de quelques lacs d'altitude dans le graphique d'interprétation de l'IBL. BI : sous-indice biogénique littoral, Df : sous-indice de déficit faunistique, ( ) : IBL /20. Domenon et Crop : données 2006 laboratoire Chrono-environnement UMR 6249 pour FDPPMA Isère, Allos : données GREBE 2008 pour l'Agence de l'Eau RMC.

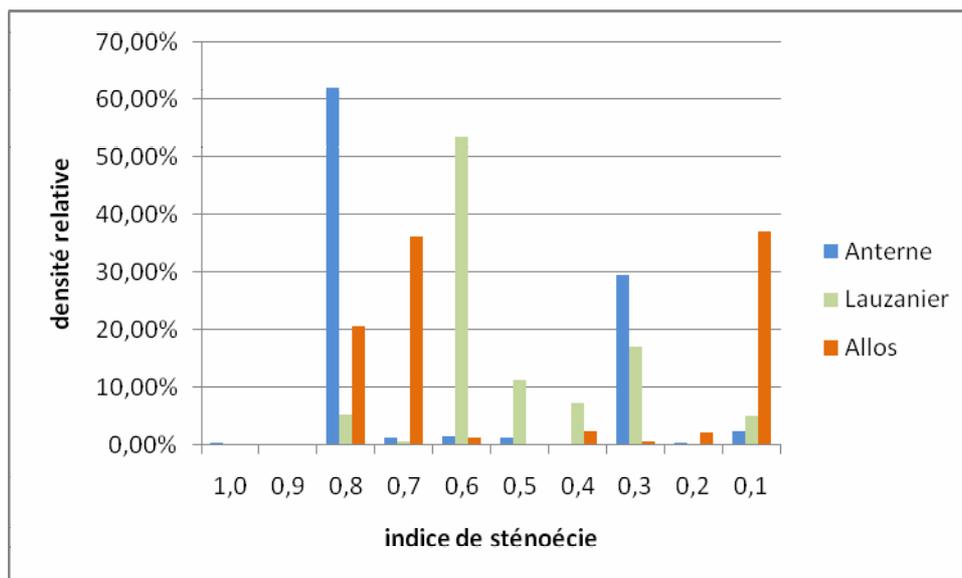


Figure 11. Répartition, en densité relative, du degré de sténocécie des taxons indicateurs des peuplements littoraux des lacs d'Anterne, de Lauzanier et d'Allos.

- ❖ Dans le lac du Lauzanier, le dysfonctionnement trophique paraît plus marqué que dans le lac d'Anterne et il est qualifié de lac mésofonctionnel (figure 10). Cela se traduit par une absence en zone peu profonde (-2m) des taxons les plus sténoèces (figure 11) et une dominance numérique de taxons indicateurs assez euryèces (indice de sténoécie de 0.6). Ce peuplement n'est pas conservé de manière optimale jusqu'à la profondeur de  $0.66 \cdot Z_{max}$  (-5m), traduisant une augmentation des contraintes environnementales en zone profonde par rapport au type théorique ( $Df < 1$ ). Ces contraintes sont très probablement une augmentation de la consommation d'oxygène dissous en zone hypolimnétique associée à une augmentation de l'accumulation de matière organique non transférée. L'impact du dysfonctionnement est encore plus marqué lorsque l'on considère le peuplement échantillonné à la profondeur maximale puisque le sous-indice de déficit faunistique ( $Df$ ) est alors de seulement 0.1/1 (avec  $k=(0.047v)+1$ , Verneaux et al., 1993) indiquant un très fort état de dysfonctionnement.

Comme pour le lac d'Anterne mais de manière beaucoup plus marquée, le lac du Lauzanier subit une perturbation trophique due probablement à un enrichissement de ses eaux par des apports excédentaires de nutriments et /ou de matière organique. Cet excédent provoque :

- un remplacement des taxons sténoèces par une faune plus euryèce qui prolifère en zone peu profonde (-2m)
- une disparition progressive en zone profonde des macroinvertébrés, déjà bien effective dans la zone la plus profonde (-7.5m) et initiée sur l'isobathe -5m.

L'augmentation des contraintes mésologiques, surtout de l'hypoxie, dans l'hypolimnion d'un lac aussi peu profond est particulièrement inquiétante. En effet, compte-tenu de sa faible profondeur le lac du Lauzanier n'est en fait qu'une vaste zone littorale dans laquelle les processus hétérotrophes devraient être compensés par l'activité photosynthétique en période de stratification. Il est urgent de limiter au maximum les intrants nutritifs du lac du Lauzanier qui semble être en cours de dystrophisation très rapide qui pourrait se traduire rapidement par une disparition complète de la macrofaune benthique de la zone la plus profonde jusqu'à de faibles profondeurs.

- ❖ Dans le lac d'Allos le caractère mésobiotique peut résulter d'une minéralisation assez importante des eaux due au substrat calcaire mais également très probablement à un enrichissement d'origine anthropique dont l'impact en zone peu profonde est l'absence des taxons les plus sténoèces et une forte proportion numérique de taxons parmi les plus euryèces (Tubificidae avec soies capillaires,  $q_i=0.1/1$ , figure 11). Ce résultat, qui pourrait être particulièrement inquiétant, est à relativiser du fait que la zone littorale ait été échantillonnée à plus de 10m de profondeur. Cependant, la valeur également assez faible du sous-indice  $Df$  ( $Df = 0.63/1$ ) témoigne également d'un problème assez net de transfert de matière organique au sein du réseau trophique avec un excès de matière accumulée en zone profonde.

# Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

---



## L'approche d'observation : Suivis physico-chimique

### I. Introduction

Les lacs du Lauzanier et d'Anterne ont fait l'objet de suivis de plusieurs paramètres physico-chimiques :

- ❖ Anterne : température à 0, 2, 5 et 12.5 m, turbidité, pression et oxygène à 12.5 m, chlorophylle à 2 m et trappes à sédiment à 2 et 12.5 m. Une station météo a également été installée dans le bassin versant.
- ❖ Lauzanier : température à 0, 2 et 8 m, turbidité, conductivité et pression à 7.5 m, et trappes à sédiment à 2 et 7.5 m.

Ces suivis physico-chimiques, dans le cadre de ce projet, couvrent une année à Anterne (22 octobre 2009-21 octobre 2010) et 9 mois au Lauzanier. Dans un premier temps, l'objectif de ces suivis est de mieux comprendre le fonctionnement interne du système lacustre (stratification thermique, chimique, productivité primaire) et les relations avec les paramètres climatiques, météorologiques et le bassin versant. Ce travail pourra ensuite être utilisé pour améliorer les interprétations obtenues à partir de l'étude des archives sédimentaires.

### II. Les données du Lac d'Anterne : résultats et interprétations

Durant cette année de suivi le lac est resté gelé du 2/12/2009 au 20 juin 2010, c'est-à-dire 200 jours. Les deux années précédentes, le lac est resté gelé du 23/11/2007 au 26/06/2008 et du 14/11/2008 au 05/06/2009 (215 et 204 jours, respectivement). Il faut environ 40 jours pour désoxygéner le fond du lac (figure 12). C'est également le temps qu'il faut pour stabiliser la température autour de 3°C (figure 12).

Le dégel du lac fin juin coïncide avec un épisode de crues entraînant l'apport de sédiments dans le lac. La réoxygénation du fond du lac commence alors lentement. Elle est liée au mélange de la colonne d'eau engendré par le réchauffement des eaux de surface et probablement également à l'apport d'eau plus riche en oxygène lors de la crue. 20 jours plus tard, alors que la saturation en oxygène a atteint seulement 40%, la concentration en oxygène recommence à décliner, probablement en raison de la dégradation de la matière organique fraîchement produite en surface. Une nouvelle crue autour du 15 août permet de recharger le stock d'oxygène.

La sonde de chlorophylle installée le 12 juillet indique que cette crue a stoppé la prolifération du phytoplancton pendant environ 25 jours. L'hypothèse proposée pour expliquer ce résultat est une diminution de la quantité de lumière nécessaire à la photosynthèse, qui aurait été causée par les argiles en suspension amenés par la crue. La concentration en chlorophylle est plus importante après la crue (à partir de début septembre) qu'avant celle-ci, c'est-à-dire de mi-juillet à mi-août. Ce résultat soulève la question de la période de productivité maximale de ce type de lac, estivale ou automnale ?, mais pourrait aussi suggérer une augmentation de la productivité en relation avec des apports de nutriments lors de la crue.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

En automne, le retournement de la colonne s'est opéré rapidement (28-30 septembre) et a permis de réoxygéner le fond du lac jusqu'à 60 % de saturation.

A titre d'information, les 10 juillet et 15 octobre 2008, la concentration en oxygène était de 9 et 10.6 mg/l en surface et 5.2 et 8.7 mg/l au fond, respectivement.

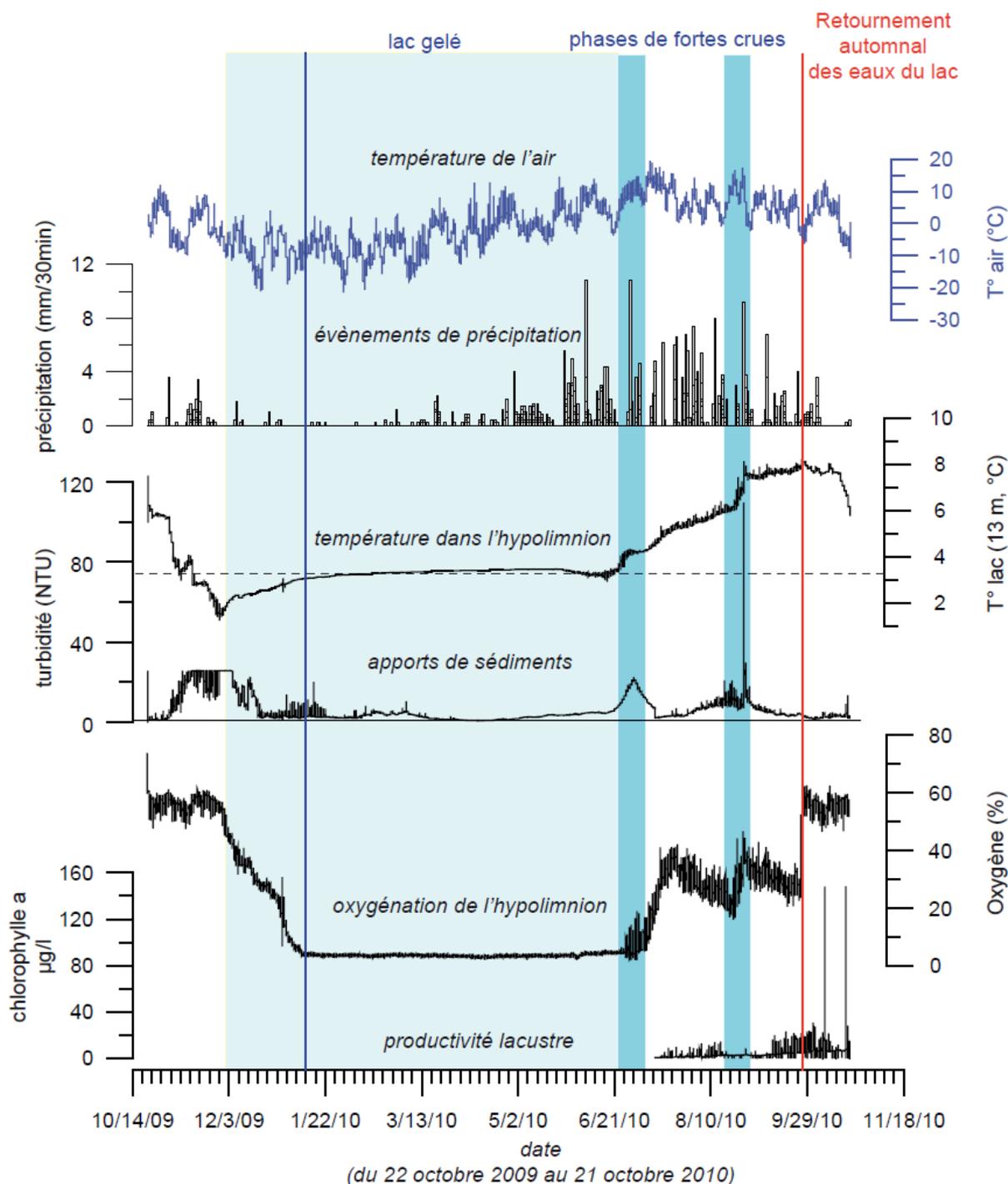


Figure 12. Evolution annuelle des paramètres physico-chimiques du lac d'Anterne (température, turbidité et oxygène au fond et chlorophylle a à 2 m) comparée aux événements de précipitation et à la température dans le bassin versant.

### III. Les données du Lac du Lauzanier : résultats et interprétations

Les mesures de température montrent que le lac est monomictique, c'est-à-dire qu'il est stratifié uniquement en hiver, lorsque le lac est couvert de glace (figure 13). Le lac est resté gelé du 3 novembre 2010 au 7 mai 2011 (186 jours, 2 semaines de moins qu'à Anterne). Sous la glace, au fond du lac on enregistre une augmentation de la conductivité qui traduit l'augmentation des matières dissoutes dans l'eau. Cette minéralisation est liée au relargage d'éléments par les sédiments. Au moment de la fonte de la glace, le mélange de la colonne d'eau et l'apport d'eau de fonte faiblement minéralisée explique probablement la chute de la conductivité.

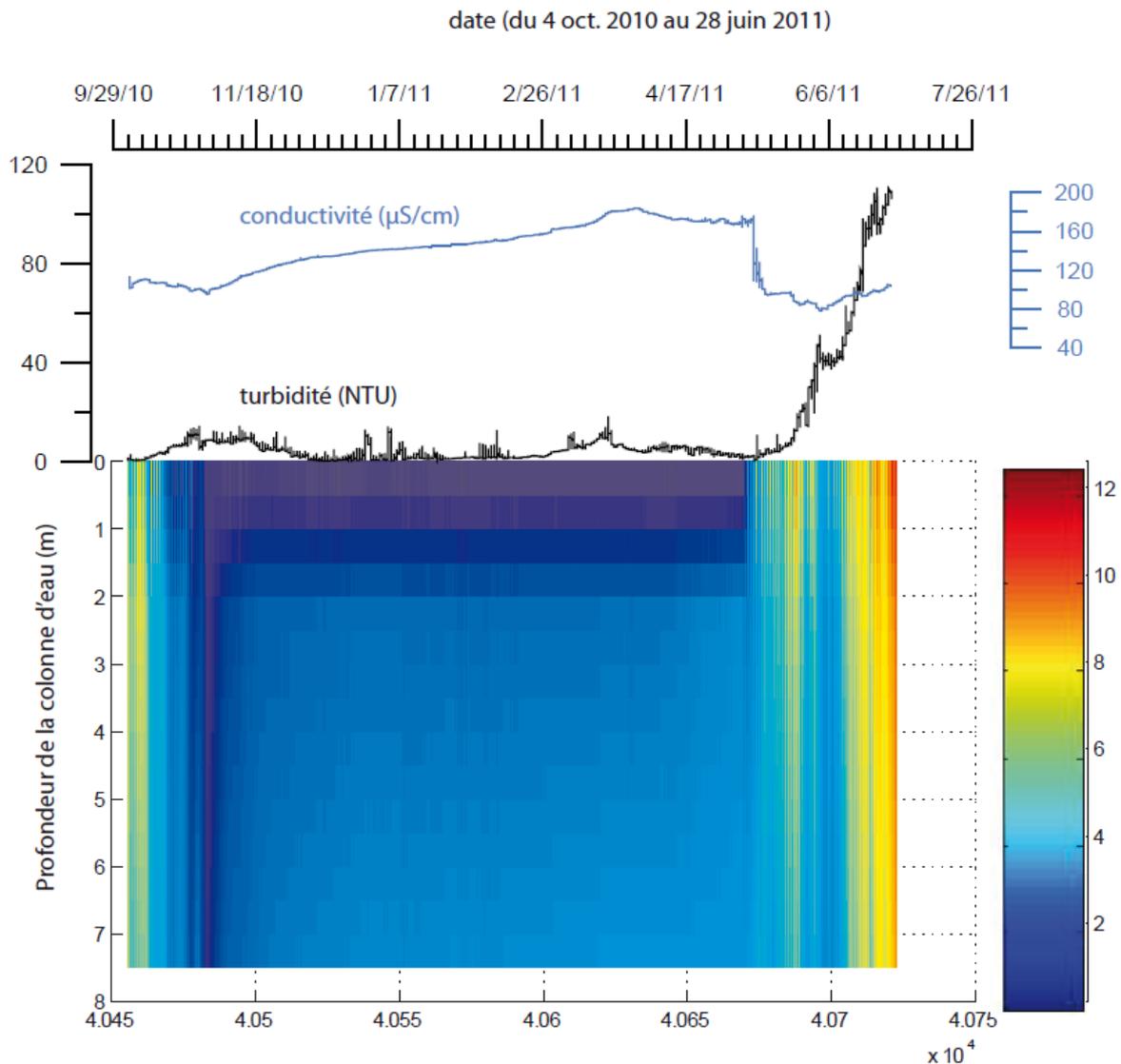


Figure 13. Evolution de la conductivité, de la turbidité au fond du lac et des températures de la colonne d'eau (thermistors à 0, 2 et 7.5 m).

Entre le 26 mai et le 11 juin, la température de la colonne d'eau se refroidit et la turbidité augmente fortement. Des événements de précipitation entraînant l'apport d'eau

froide et de sédiments expliquent de tels résultats. Ensuite, la colonne d'eau se réchauffe à nouveau et atteint 11 à 12°C fin juin. Cette phase de réchauffement est accompagnée par une augmentation de la turbidité, ce qui pourrait être associé à une augmentation de la productivité primaire.

Les trappes à sédiments installées à 2 et 7.5 m ont fourni du matériel sédimentaire. Les premières observations visuelles lors de la récupération des trappes montrent que dans celle du fond il y a des matériaux détritiques (minéral) et biologiques tandis que dans celle à 2m, essentiellement du matériel biologique a été observé. La détermination de la quantité (masse sèche) de sédiment pourra être comparée aux flux de sédiment moyen dans les carottes de sédiment (déterminé à partir de la datation et de la densité sèche des sédiments). L'étude du matériel biologique pourra également être utilisée pour compléter la qualification de l'état actuel du lac obtenue à partir des IBL, et pour comparer avec les analyses de restes fossiles dans les sédiments.

### IV. Les données du Lac de La Thuile : résultats et interprétations

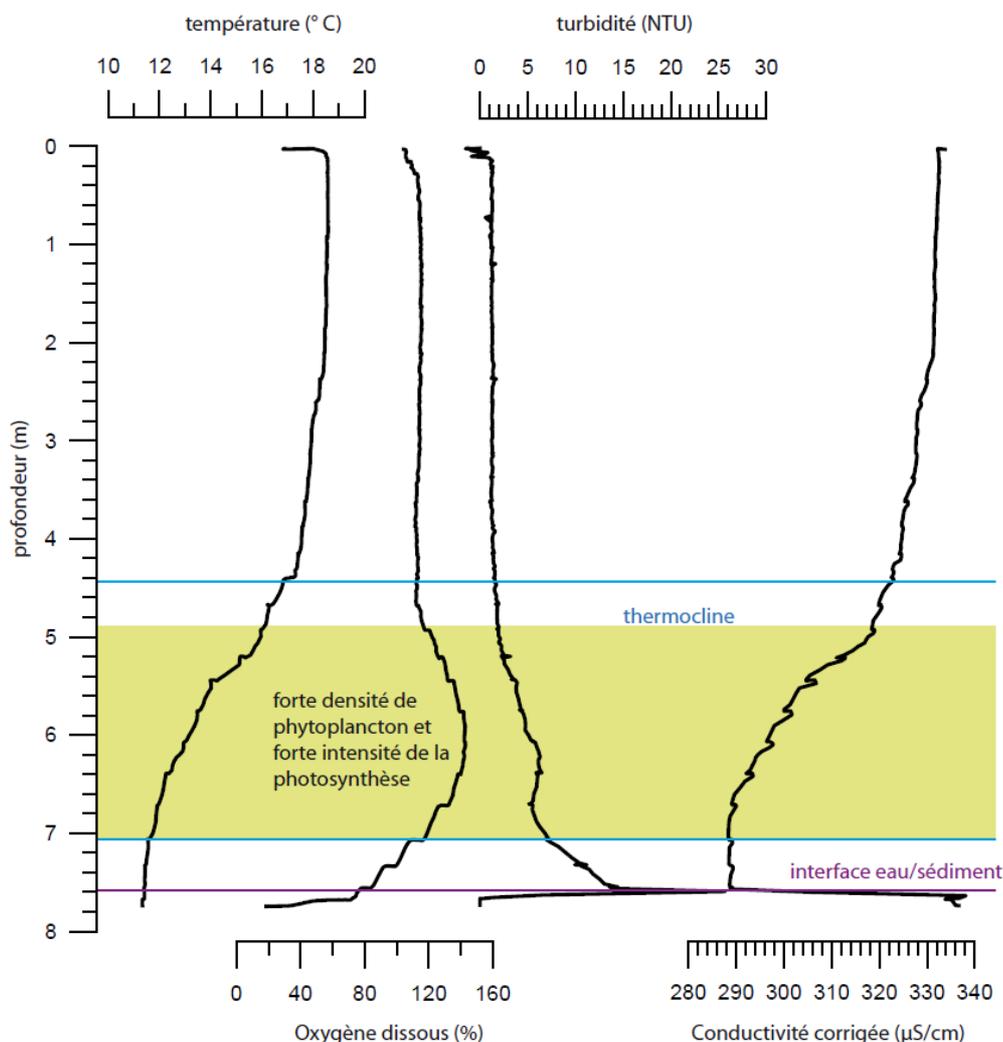


Figure 14. Profils de température, oxygène dissous, turbidité et conductivité.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

---

Lors d'une nouvelle mission de carottage au lac de La Thuile, le 19 mai 2011, nous avons réalisé des profils de température, conductivité, turbidité et oxygène de la colonne d'eau au point de carottage (zone la plus profonde à 7.7 m). La température en surface est à 18.5 °C et au fond à 10.6°C (figure 14). Le lac est légèrement stratifié. La thermocline apparaît entre 4.4 et 7.1 m de profondeur. La colonne d'eau est bien oxygénée. La zone entre 4.9 et 7.1 m présente une forte sursaturation en oxygène. Ceci indique une importante activité photosynthétique liée à une forte densité du phytoplancton dans cette zone. Celle-ci entraîne également une augmentation de la turbidité et la chute de la conductivité, en raison de l'utilisation des éléments nutritifs (N, P et Si dissous) mais aussi de la précipitation de carbonate de calcium (cristaux bio-précipités) (figure 14).

## L'approche de rétro-observation : méthodes

## I. Datation

### I.1. Les radioéléments : $^{210}\text{Pb}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$

Les analyses de radioéléments ont été effectuées au laboratoire souterrain de Modane (LSM). Les carottes du Lauzanier, Allos, et de La Thuile ont été datées à partir de ces mesures. Les pas d'échantillonnage sont de 5 mm au Lauzanier, de 1 cm à Allos et  $\sim 1\text{cm}$  à La Thuile. La datation des sédiments du Lac d'Anterne avait déjà été effectuée auparavant (Arnaud et al., 2002).

#### I.1.1. Plomb - $^{210}\text{Pb}$

La méthode de datation par le  $^{210}\text{Pb}$  est utilisée pour dater les sédiments récents (couvrant une période de  $\sim 100$ ) (Krishnaswamy et al., 1971 ; Appleby & Oldfield, 1978 ; Engstrom et al., 1986; Pinglot & Pourchet, 1995 ; Lucia Lima et al., 2005 ; Gasiorowski & Hercman, 2005; Tylmann, 2005). Cette méthode est basée sur la loi de désintégration radioactive :

$$N(x) = N_0 e^{-\lambda t} \text{ où}$$

- $N_0$  correspond au  $^{210}\text{Pb}$  initial déposé à l'interface eau-sédiment
- $N(x)$  correspond au  $^{210}\text{Pb}$  mesuré dans le sédiment.
- $\lambda$  est la constante de désintégration du  $^{210}\text{Pb}$  (0.0311 an<sup>-1</sup>)

Le  $^{210}\text{Pb}$  des sédiments provient de deux sources : le  $^{222}\text{Rn}$  émis par les continents, qui se désintègre dans l'atmosphère avec une période de quelques jours. Ce  $^{210}\text{Pb}$  est rapidement déposé dans les sédiments via les précipitations, le ruissellement ou par dépôt sec. Ce  $^{210}\text{Pb}$  est dit « non-supporté ». Il décroît dans le sédiment selon la loi de désintégration radioactive présentée ci-dessus avec une période de 22,3 ans et permet de déterminer le temps écoulé depuis sa sédimentation. Le  $^{210}\text{Pb}$  provient aussi de la lente et constante désintégration des isotopes de la famille de l' $^{238}\text{U}$ , lesquels maintiennent son taux constant. Ce plomb est dit « supporté ». Le  $^{210}\text{Pb}$  mesuré dans le sédiment correspond alors à la somme de ces deux sources. Par conséquent, la valeur mesurée doit être corrigée en lui soustrayant le  $^{210}\text{Pb}$  supporté, qui peut être estimé en mesurant l'activité du  $^{226}\text{Ra}$  (élément père du  $^{210}\text{Pb}$  supporté via le  $^{222}\text{Rn}$ ), car à l'échelle du siècle il est en équilibre avec lui.

Le modèle CF:CS (constant flux:constant sedimentation rate) utilisé ici, permet de calculer le taux de sédimentation moyen à partir de la pente du profil représentant l'activité du plomb  $^{210}\text{Pb}$  non-supporté (échelle log) en fonction de la profondeur (Goldberg, 1963 ; Krishnaswamy et al., 1971 ; Tylmann, 2004 ; Lu, 2004). L'équation de la courbe exponentielle ajustée permet alors de déduire le taux de sédimentation :

$N = N_0 e^{-\lambda t}$  équivaut à  $N = N_0 e^{-\lambda x/R}$  (où R correspond au taux de sédimentation et x à la profondeur de sédiment). Ce modèle ne prend donc pas en compte les changements de taux de sédimentation et suppose un flux constant de  $^{210}\text{Pb}$  non-supporté à l'interface eau-sédiment.

La courbe de décroissance peut parfois présenter deux pentes différentes. Ceci peut-être causé par l'existence de deux taux de sédimentation.

### I.1.2. Les radioéléments artificiels : $^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$

Ces deux radioéléments ont été émis lors des essais nucléaires atmosphériques. Le maximum de ces essais a eu lieu en 1963. Du  $^{137}\text{Cs}$  a également été émis lors de l'accident de Chernobyl de 1986. Ces deux événements d'origine anthropique peuvent donc être utilisés comme marqueurs chronologiques, permettant de caler plus précisément notre modèle d'âge au  $^{210}\text{Pb}$ .

### ***I.2. marqueurs chronostratigraphiques***

Afin d'affiner la datation par les radioéléments, il est parfois possible d'utiliser des marqueurs chronostratigraphiques, c'est-à-dire des événements historiques (crues, séismes, pollutions...) reconnaissables dans la sédimentation et dont la date est connue par ailleurs. Cette approche méthodologique a pu être appliquée sur les lacs d'Anterne (séismes, [Arnaud et al., 2002](#)) et d'Allos (crues, [Wilhelm com. pers.](#)).

## **II. Granulométrie**

Les analyses granulométriques ont été réalisées au laboratoire EDYTEM, à l'aide d'un microgranulomètre laser Malvern Mastersizer S. Les spectres granulométriques couvrent les particules comprises entre 0.06 et 878  $\mu\text{m}$ . Ils sont formés de 53 classes de tailles. Le pas d'échantillonnage pour chacune des carottes analysées est de 5 mm. Ces mesures ont été réalisées sur les lacs de La Thuile, du Lauzanier et d'Allos. Les analyses sur les sédiments du Lac d'Anterne ont été déjà effectuées lors d'une précédente étude ([Arnaud et al., 2002](#)).

## **III. Géochimie minérale**

### ***III. 1. Majeurs et traces sur échantillons discrets***

Les analyses de géochimie minérales sur échantillons discrets ont été réalisées par le laboratoire canadien *Actlab*, après prélèvement, séchage (étuve à 60°C) et broyage au laboratoire EDYTEM. L'échantillonnage des sédiments du Lac du Lauzanier est continu et constant (tous les 5 mm), tandis que celui sur le Lac d'Anterne est discontinu. Il dépend de la présence d'événements instantanés (crues et séismes) supérieurs à 5 mm, lesquels n'ont pas été analysés.

Les analyses par ICP optique ont été réalisées après attaque quasi-totale ( $\text{HF}$ ,  $\text{HClO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  et  $\text{HCl}$ ). Cette méthode permet de dissoudre les sulfates, sulfures, certains oxydes et silicates. Par contre, les zircons, sphènes et magnétites ne sont pas totalement dissous et la silice est volatilisée lors des attaques acides. La silice ne peut donc pas être déterminée par cette méthode. La plupart des métaux sont attaqués et peuvent être bien mesurés.

Cette méthode a été choisie en particulier parce qu'elle permet de quantifier le phosphore (élément nutritif) et le soufre avec une bonne précision.

### III.2. Scanner de carotte itrax

Le scanner de carotte permet de mesurer en continu et à haute résolution (max 100 µm) les éléments majeurs et éventuellement les traces tel que le plomb. C'est une méthode de mesure semi-quantitative. Elle ne permet donc pas de déterminer directement des concentrations en éléments mais permet de suivre les variations relatives en éléments. Nous avons ici utilisé les scanners de carotte, de marque Cox, modèle Itrax (Croudace *et al.*, 2006) du Cerege (Aix en Provence), de l'ETE (Québec) et de Géopolar (Brême). Les conditions analytiques pour chacune des carottes sont présentées dans le tableau 5.

Lacs	voltage (kV)	ampérage (mA)	temps d'acquisition (s)	pas de mesure (µm)	tube (source)
Lauzanier	30	35	30	1000	Mo (Molybdène)
Allos				200	Cr (Chrome)
Anterne	30	35	10	100	Mo (Molybdène)

Tableau 5 : Conditions analytiques pour les différents lacs.

Les analyses réalisées au tube Mo (Molybdène) permettent d'augmenter la sensibilité de mesure des éléments lourds et notamment du plomb, tandis que le tube Cr (Chrome) est plus adapté pour les analyses des éléments légers.

## IV. Géochimie organique

### IV.1. perte au feu

Les analyses de perte au feu (PAF) ont été réalisées au laboratoire EDYTEM pour estimer le contenu en matières organiques, inorganiques silicatées et en carbonates des sédiments. La méthode standard détaillée par Heiri *et al.* (2001) a été appliquée. Elle consiste à brûler la matière organique à 550°C pendant 4h, puis les carbonates à 950°C pendant 2h dans un four à moufle. Afin d'obtenir des résultats les plus fiables possibles, les échantillons analysés sont de taille similaire (Heiri *et al.*, 2001).

$$\% \text{Matière Organique} = (M_{\text{tot}} - M_{\text{PAF550}^\circ}) * 100 / M_{\text{tot}}$$

$$\% \text{Carbonates} = (M_{\text{PAF550}^\circ} - M_{\text{PAF950}^\circ}) * 100 / M_{\text{tot}}$$

$$\% \text{Silicates} = 100 - (\% \text{ Matière Organique} + \% \text{ Carbonates})$$

$M_{\text{tot}}$  = Masse de sédiment sec utilisée pour l'analyse

$M_{\text{PAF550}^\circ}$  = Masse de sédiments restant après la PAF à 550°C

$M_{\text{PAF950}^\circ}$  = Masse de sédiments restant après la PAF à 950°C

Le % de silicates peut refléter les apports détritiques silicatés et/ou la silice biogène selon le contexte. Ces analyses ont été réalisées sur les lacs de La Thuile et du Lauzanier. Les pas d'échantillonnage sont de 5 mm pour les 2 lacs.

## **IV.2. Pyrolyse Rock Eval**

Les analyses de quantité et de qualité de la matière organique ont été réalisées avec un Pyrolyseur Rock Eval 6 modèle « Turbo » (technologies Vinci) au laboratoire ISTO (Orléans). La pyrolyse Rock Eval consiste à analyser les composés qui sont produits lors du craquage thermique de la matière organique (MO) soumise à des températures croissantes (de 200 à 650°C). Cette mesure est effectuée sous atmosphère inerte (N<sub>2</sub>). Les effluents hydrocarbonés produits sont quantifiés en continu par un détecteur à ionisation de flamme. Deux cellules infrarouges (IR) analysent le CO et le CO<sub>2</sub> produits lors de la phase de pyrolyse. Une fois la pyrolyse terminée, l'échantillon résiduel est mis sous air pour être oxydé. L'échantillon est de nouveau soumis à une augmentation de température de 400 à 850°C. Le CO et le CO<sub>2</sub> sont détectés et quantifiés par les cellules (IR). Les principes de base sont décrits plus en détail par [Lafarge et al. \(1998\)](#). L'intégration des cinq courbes d'émission d'effluents (phase de pyrolyse + phase d'oxydation) entre des bornes de température déterminées permet d'obtenir le carbone organique total (COT%) de l'échantillon de sédiment et les proportions de matériels hydrocarboné et oxygéné de la MO (l'indice d'hydrogène IH et l'indice d'oxygène IO, respectivement).

Cette méthode a été mise au point et est utilisée en routine pour l'exploration pétrolière afin de déterminer les roches mères potentielles pour la formation d'hydrocarbures et leur maturité. Depuis une dizaine d'année cette méthode est appliquée à l'étude des sédiments, des dépôts tourbeux mais aussi des sols afin de reconstituer les changements paléoenvironnementaux et mieux appréhender les variations environnementales ([Lafarge et al., 1998](#) ; [Noël et al., 2001](#) ; [Manalt et al., 2001](#) ; [Disnar et al., 2003](#) ; [Jacob et al., 2004](#) ; [Disnar et al., 2008](#)). Dans le cas des sédiments lacustres, cette méthode permet de distinguer la MO d'origine lacustre de celle d'origine terrestre, qu'elle soit issue de végétaux du bassin versant ou du substratum rocheux sédimentaire ([Manalt et al., 2001](#) ; [Noël, 2001](#) ; [Hanisch et al., 2009](#)).

Ces analyses ont été réalisées sur les lacs d'Anterne et d'Allos.

## **V. Zooplancton et chironomes**

### **V.1. Etude du zooplancton**

### **V.2. Etude des peuplements chironomidiens sub-fossiles**

Pour chacun des 3 lacs (Anterne, Allos et Lauzanier), les assemblages sub-fossiles de Chironomidae ont été étudiés le long d'une carotte de sédiments prélevée au point de plus grande profondeur de la cuvette (Fig. localisation carotte Charline) à l'aide d'un carottier gravitaire d'interface UWITEC. Le pas d'échantillonnage le long des carottes a été adapté selon les contextes particuliers de chaque système afin de documenter avec la meilleure précision temporelle possible les 150 dernières années :

- Sur la carotte du Lauzanier, les sédiments ont été analysés tous les 1/2 cm en continu,

- Sur la carotte d'Anterne, la faible concentration en capsules céphaliques des sédiments et la présence de dépôts épais (>5mm) de crues et de séismes, nous a imposé un échantillonnage pluri-centimétrique variable selon les échantillons.

- Sur la carotte d'Allos, les Chironomidae ont été analysés tous les cm en continu.

Au Laboratoire, le sédiment est d'abord éventuellement décarbonaté par une solution d'HCl à 10 % puis la matière organique est en partie éliminée par passage dans une solution de KOH à 10 %. Les sédiments sont ensuite tamisés à 100 et 200 µm. Les refus de tamis sont triés sous loupe binoculaire (40X). Chaque capsule céphalique de Chironomidae est montée entre lame et lamelle et déterminée au microscope. L'identification des restes subfossiles est menée jusqu'au niveau générique à l'aide de la clé de [Brooks et al. \(2007\)](#).

Les changements de composition des communautés sont résumés sous la forme d'un diagramme des abondances relatives des différents taxa dans chacun des échantillons. Pour les enregistrements où le modèle age/profondeur est suffisamment fiable, l'influx total (en nombre de capsules céphaliques déposées par unité de surface et par an) peut être calculé. La biozonation des diagrammes matérialise les changements majeurs dans la composition (en pourcentages des différents taxa) des assemblages. Elle est déterminée d'après une classification hiérarchique stratigraphiquement contrainte (Coniss).

Le cas échéant, la composition de la communauté dite « de référence » est définie par la composition taxonomique moyenne de la biozone correspondante. Pour chaque échantillon on détermine l'écart à cette communauté « de référence » par la Chord distance (valeur=0 : échantillons très proches).

## VI. PCB

La mise au point d'une méthodologie analytique spécifique est nécessaire pour détecter et quantifier de très faibles concentrations en PCB. La détermination de la teneur en micropolluant dans les carottes de sédiment a donc nécessité au préalable une mise au point de la méthode jusqu'alors non utilisée au laboratoire (LCME) en ce qui concerne la quantification de PCB (polychlorobiphenyl).

Afin de pouvoir comparer les enregistrements entre les différents lacs et de limiter le nombre d'analyses (longues à effectuer), nous avons décidé d'analyser les sédiments déposés durant les périodes suivantes :

- ❖ 1920-1950 : avant la production
- ❖ 1950-1980 : durant le pic de production et de consommation
- ❖ 1980-1997 : durant la période de déclin et d'arrêt de la production-consommation
- ❖ 1997-2007 : après l'arrêt.

## L'approche de rétro-observation : Sédimentologie et géochimie

## I. Le Lac de La Thuile (870 m d'altitude, Massif des Bauges)

### I.1. Site de carottage



Figure 15. localisation du point de carottage.

La carotte a été prélevée dans la zone profonde, à 8 m de fond (figure 15).

### I.2. Sédimentologie et datation

Deux unités sédimentologiques sont mises en évidence par les analyses granulométriques et la densité sèche (figure 16):

- ❖ 30-14 cm : unité riche en argiles et silts fins (particules < 3.9  $\mu\text{m}$ ) et mal triée. Le mode principal des distributions granulométriques se situe autour de 15-20  $\mu\text{m}$ . La densité sèche est élevée (autour de 0.27-0.3  $\text{g}/\text{cm}^3$ ).
- ❖ 0-14 cm : unité riche en particules grossières (entre 3.9 et 880  $\mu\text{m}$ , silt et sables) et présentant des valeurs faibles de classement. Les sédiments sont donc bien triés. Le mode principal augmente jusqu'à 25  $\mu\text{m}$ . Cette unité se subdivise en deux sous unités : 14-8 cm et 8-0 cm. La première est plus sombre et de plus faible densité, tandis que la seconde présente une couleur plus claire et est plus dense (valeurs similaires à l'unité inférieure). La sous-unité entre 14 et 8 cm représente une phase de transition granulométrique (augmentation des silts et sables).

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

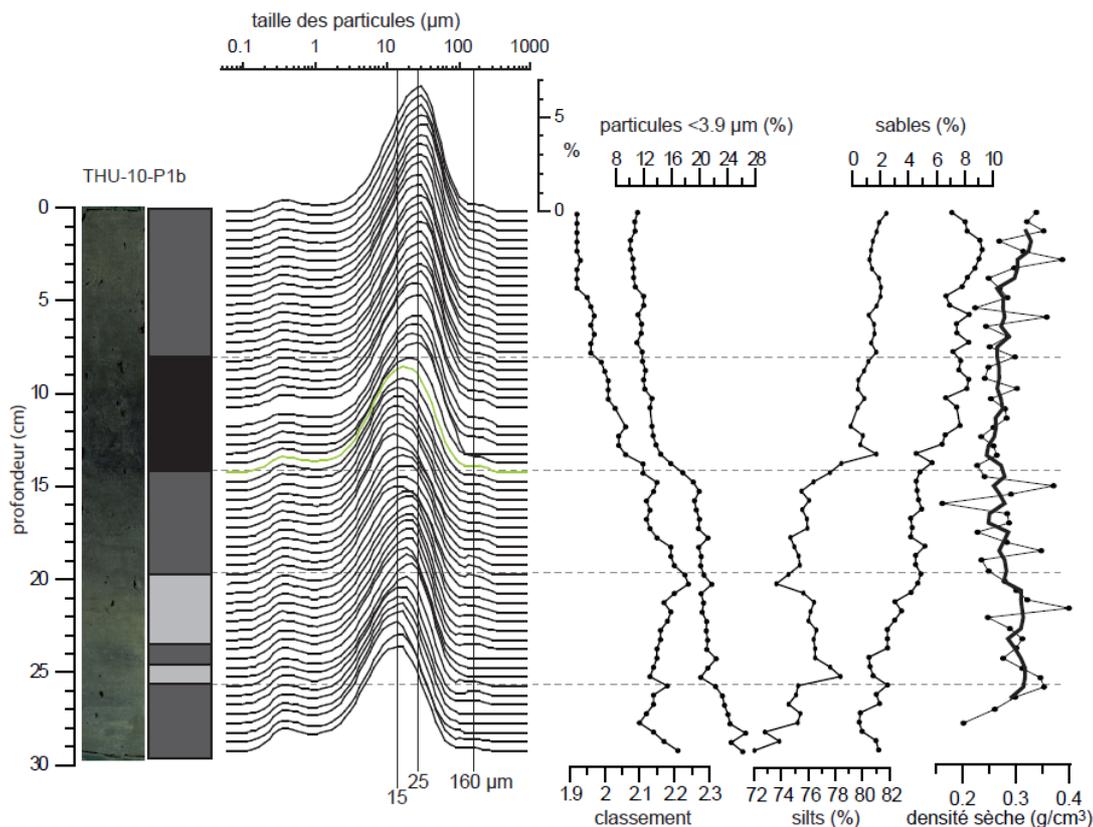


Figure 16 : Caractéristiques sédimentologiques des sédiments du Lac de La Thuile: distributions granulométriques, paramètres de taille de grain et densité sèche.

Selon le modèle d'âge obtenu à partir du  $^{210}\text{Pb}$ , du pic de  $^{137}\text{Cs}$  de Tchernobyl et des pics de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$  du maximum des essais nucléaires aériens, le passage de l'unité inférieure à l'unité supérieure est daté à  $\sim 1974$  (figure 17). La sous-unité supérieure débute quant à elle en 2000. Cette sous-unité est caractérisée par une forte augmentation du taux de sédimentation. Il passe de 2.5 mm/an à 1.27 cm/an. Cependant, cette phase présente un flux total moyen intermédiaire inférieur à celui de l'unité précédant 1974 (figure 18).

Avant 1974, les sédiments sont essentiellement composés de silicates (silicates détritiques et peut-être un peu de silice biogène) (figure 18). Cependant ils diminuent de façon continue. Cette diminution est compensée par l'augmentation des carbonates et dans une moindre mesure de la matière organique. Entre 1974 et 2000, le flux de sédiment est très faible en raison d'une chute des apports détritiques (matériel silicaté). La contribution en matière organique augmente fortement et les carbonates continuent à augmenter à la même vitesse que dans l'unité inférieure. Depuis 2000, le flux de sédiment augmente fortement (figure 18). Le dépôt de carbonates et de matière organique expliquent principalement cette augmentation.

Tout comme dans le Lac du Bourget, une partie des carbonates de ce lac sont liés à la bio-précipitation du carbonate de calcium causée par l'activité photosynthétique des algues.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

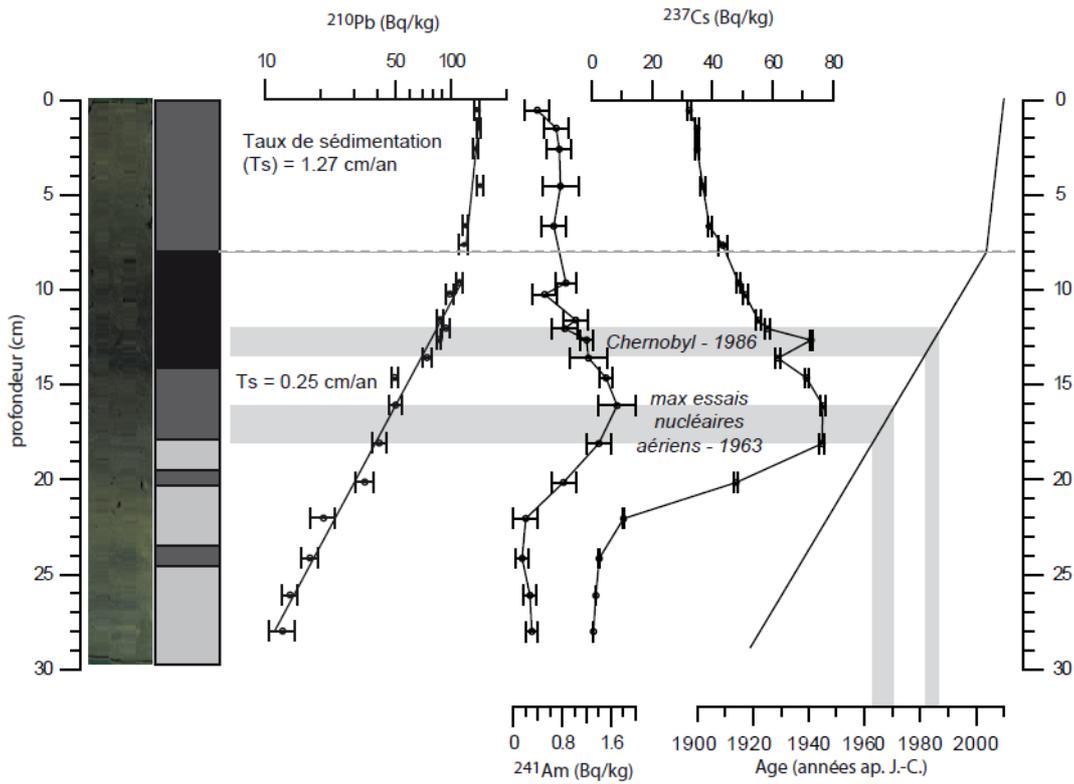


Figure 17. Datation de la carotte THU-10-P1.

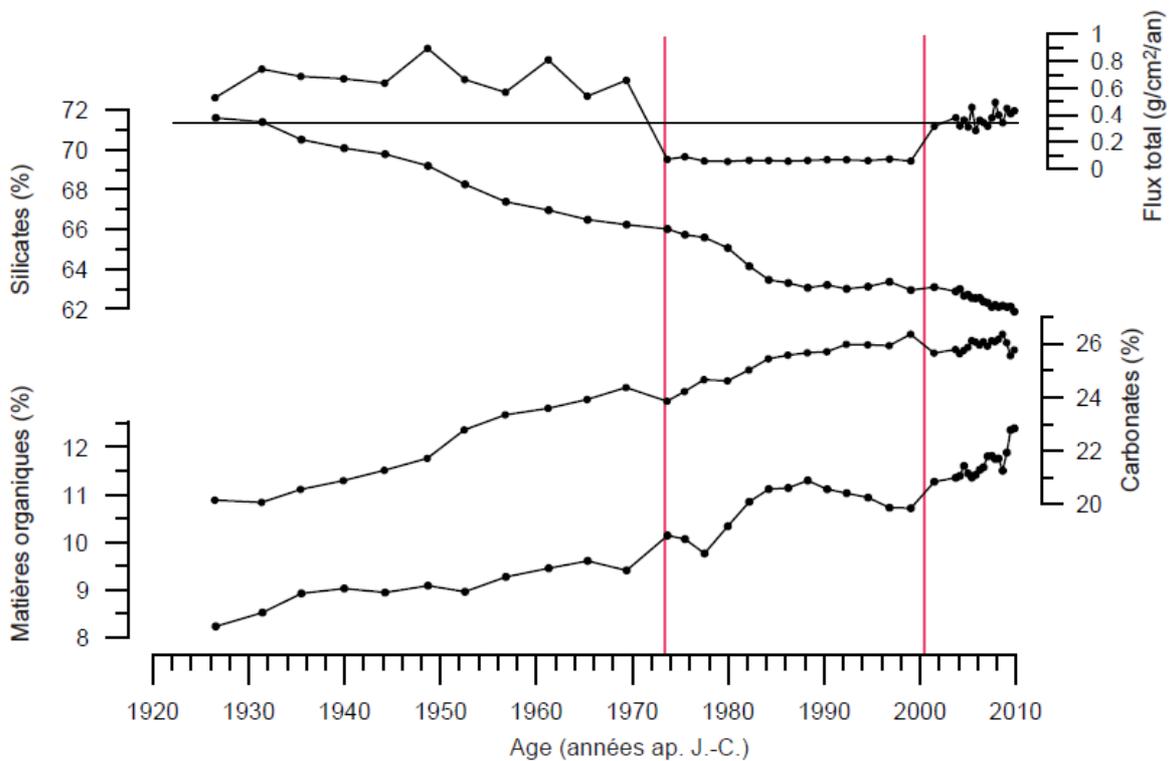


Figure 18. Evolution du flux total et de la composition chimique (PAF) des sédiments depuis 1920.

### ***1.3. Interprétation : histoire trophique du lac***

Ces résultats suggèrent une augmentation du niveau trophique du lac dans les années 70, laquelle aurait entraîné une augmentation de la matière organique préservée dans les sédiments et probablement une dégradation des conditions d'oxygénation au fond du lac. Cet état trophique ce serait dégradé à partir des années 2000. Des analyses de qualité de la matière organique (C, H, N) et des analyses géochimiques devraient permettre de vérifier ces hypothèses. L'augmentation de la taille des grains mesurée pourrait être causée par la matière organique et par la précipitation de gros cristaux de calcite biogénique. La présence de ces gros cristaux est liée au processus d'eutrophisation (Lotter, 1998 ; Giguet-Covex et al., 2010). La présence de ces gros cristaux pourra facilement être vérifiée à partir de l'observation au microscope pétrographique de frottis.

## **II. Le Lac d'Anterne (2063 m d'altitude, Réserve Naturelle de Sixt-Passy)**

### ***II.1. Sites de carottage***

Pour cette étude, quatre carottes ont été utilisées. Excepté la carotte ANT-07-n°3, toutes les carottes ont été prélevées dans la zone profonde (13 m ; figure 19). Actuellement l'affluent principal du lac est celui situé au sud.

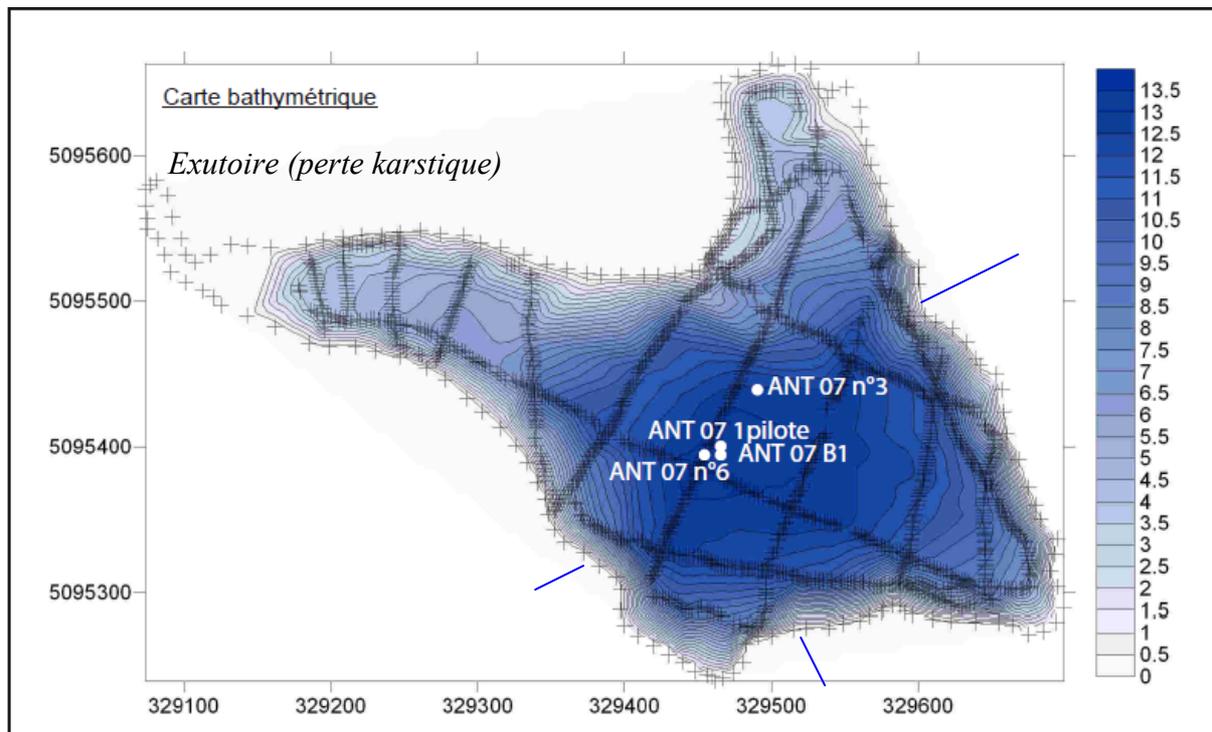


Figure 19. Carte bathymétrique et positions des carottes utilisées pour l'étude.

Les analyses réalisées sur les différentes carottes sont listées dans le tableau 6. Toutes ces carottes ont du être corrélées les unes par rapports aux autres afin de vérifier

que les séquences sédimentaires sont identiques et de pouvoir ensuite appliquer le modèle d'âge sur chacune d'elles.

nom des carottes	type d'analyse
ANT-07-B1	spectrocolorimétrie
	ICP-optique
	scanner itrax
	pyrolyse Rock Eval
	chironomes
ANT-07-n°3	PCBs
ANT-07-n°6	Chironomes
ANT-07-1 pilote	ICP-optique
	pyrolyse Rock Eval
ANT-99-02	Datation par les radioéléments lors d'une étude précédente

Tableau 6. Liste des carottes et des analyses effectuées.

### II.2. Sédimentologie et datation

Les sédiments sont composés d'alternances de lamines claires et sombres, de dépôts épais (> 5mm) caractérisés par une grano-décroissance (avec une lamine d'argile au sommet), des sédiments bien triés à la base et des dépôts grano-décroissants (sans argile au sommet) mais mal triés à la base. Les deux premiers types de sédimentation sont associés à des dépôts de crues plus ou moins intenses et causés par des événements de précipitation (Arnaud *et al.*, 2002 ; Enters *et al.*, 2008). Le troisième correspond à des dépôts de sédiments remaniés probablement causés par des séismes (Arnaud *et al.*, 2002 ; Beck, 2009). Au sein des sédiments laminés, on peut distinguer des couplets de lamines plus sombre que les autres. Cette caractéristique est bien mise en évidence par la réflectance (L\*) mesurée. Le principal changement durable de cette caractéristique a lieu vers 38 cm de profondeur, c'est-à-dire au début du siècle.

Quatre des cinq dépôts de séisme les plus récents ont pu être utilisés pour améliorer la datation au  $^{210}\text{Pb}$  réalisée lors d'une précédente étude (figure 20; Arnaud *et al.*, 2002). Ces séismes sont ceux de Brigg en 1755, Chamonix en 1817, Visp en 1855 et Emosson en 1905 AD. Les barres bleues sur la figure x correspondent aux pics de Tchernobyl (1986) et du maximum des essais nucléaires aériens (1963) obtenus lors de la précédente étude. Le pic de pollution au Pb par les essences est bien visible dans les analyses de scanner de carotte. Il permet d'ajouter un calage chronologique supplémentaire : la crise pétrolière de 1974 (Arnaud *et al.*, 2004).

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

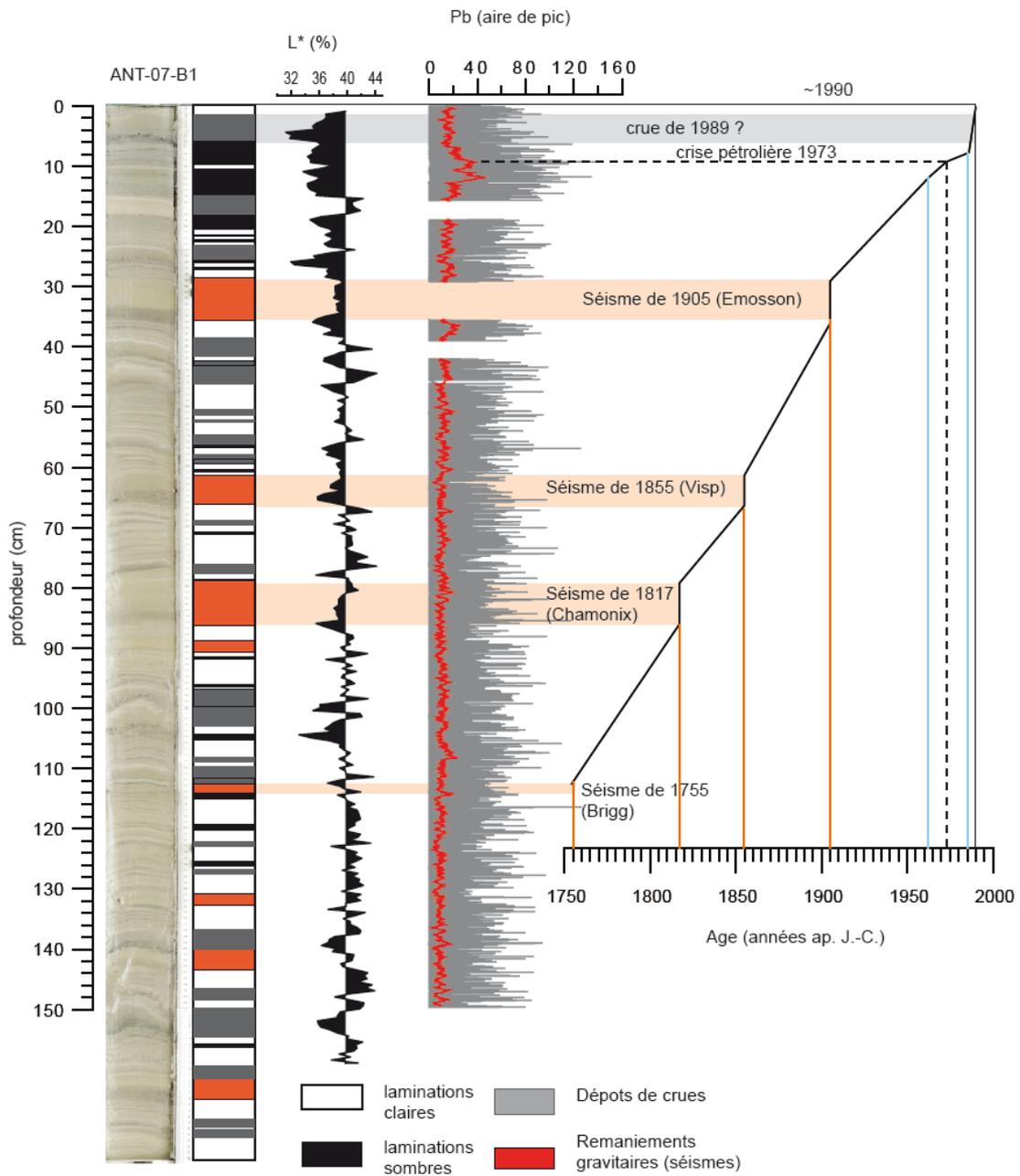


Figure 20. Description lithologique de la carotte et datation.

### II.3. géochimie minérale

Les analyses continues et à haute résolution à partir du scanner de carotte permettent de mettre en évidence des changements rapides dans la géochimie des sédiments. Les éléments les moins bruités sont le Mn et le Ca. La comparaison avec les analyses sur échantillons discrets du Pb, Mn, Ca, et K montre une bonne cohérence entre les deux types d'analyses (figure 21).

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Le signal de calcium est lié à la granulométrie. Les fortes concentrations en calcium sont associées aux grosses particules (sables > 300  $\mu\text{m}$ ) (Giguet-Covex, 2010). Le K et le Ti sont quant à eux associés aux sédiments fins (silts fins/argiles). Ces éléments sont d'origine détritique. Le Mn est un élément rédox dépendant. Il peut donc refléter les conditions d'oxygénation au fond du lac. Cependant, il est aussi présent dans les roches et sols du bassin versant. Il peut alors aussi être apporté sous forme particulaire lors des événements de crues. Comme le calcium, il apparaît enrichi dans la fraction grossière des événements de crues. Le K et le Ti ne présentent pas de tendance le long de la carotte. Bien que faible, le Mn et le Ca présentent une tendance à l'augmentation au-dessus de 60 cm. Le paramètre d'incohérence, lié à la quantité de matière organique, d'eau et à la densité, ainsi que le Pb augmente à partir de 38 cm.

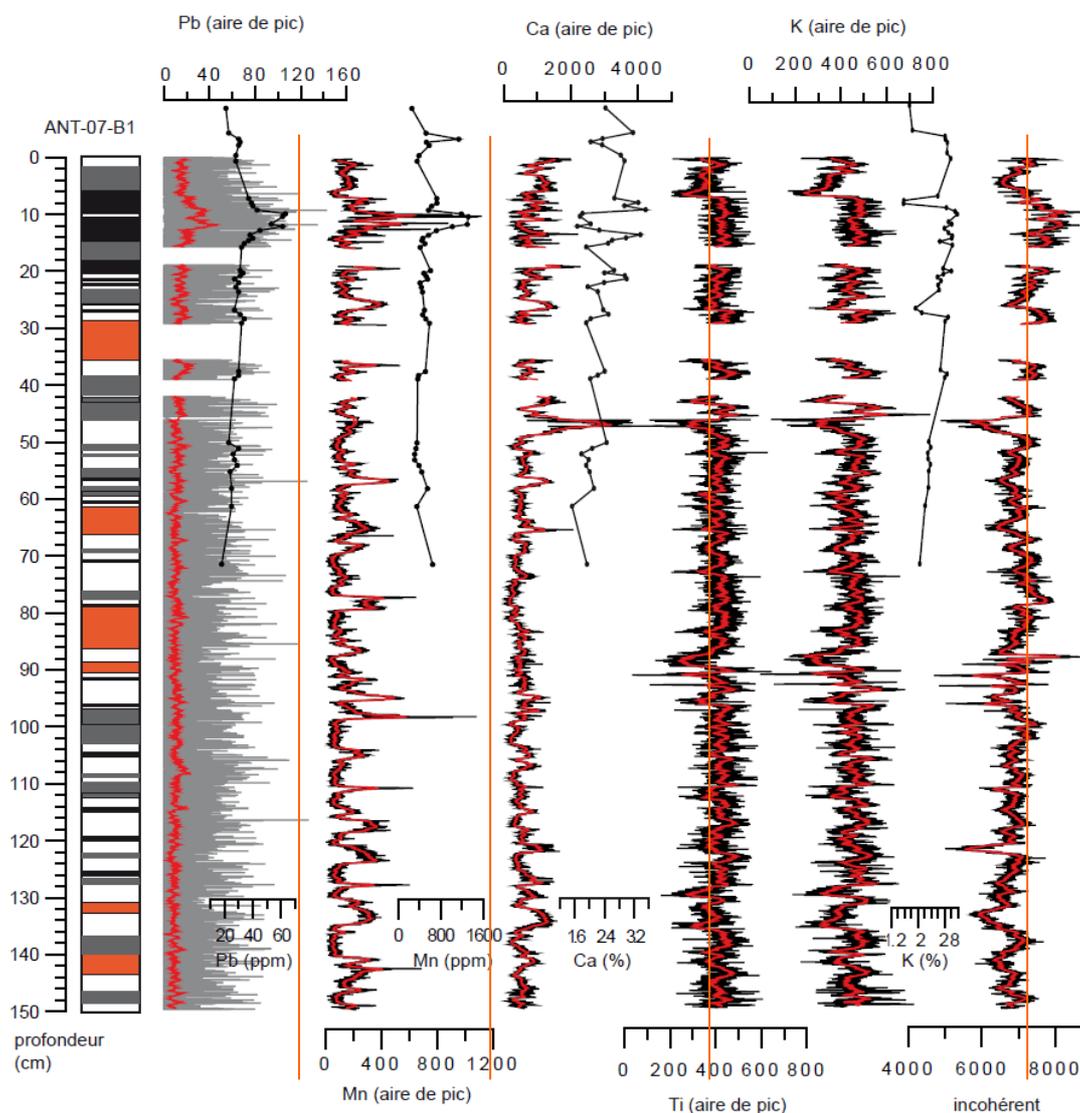


Figure 21. évolution des éléments majeurs mesurés au scanner de carotte itrax et comparaison avec les analyses sur échantillons discrets. Les courbes en noir et gris correspondent aux analyses avec un pas de 100 $\mu\text{m}$  et les courbes rouges à un rééchantillonnage à 5mm. Le paramètre « incohérent » est dépendant de la quantité de matière organique, d'eau et de la densité.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Le Mn présente un pic important en même temps que le pic de Pb des essences. Cette phase est marquée par une chute du Ca qui ré-augmente ensuite.

Les analyses sur échantillons discrets ont permis de quantifier les éléments présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 7). Trois familles d'éléments sont mises en évidence :

1. Ca et Sr
2. P et V
3. Fe, Mn, Mg, Na, K, Pb, Zn, Ni, Co et S

Au sein de cette dernière famille, le Zn, et le Pb présentent des évolutions très similaires (voir annexe). Le Pb provient des pollutions atmosphériques (essences plombées). Les éléments K, Na et Mg sont associés à l'érosion des roches et sols du bassin versant. Le Ca et Sr reflètent les apports détritiques grossiers et proviennent des lithosols (figure 6).

La corrélation entre le P et le V n'est pas encore comprise. Cependant, il est intéressant de noter que le V provient essentiellement des émissions volcaniques, de l'érosion des sols et roches ou de la combustion d'hydrocarbures (le pétrole brut Koweïtien ou d'Arabie saoudite en renferme de 29 à 60 mg par kg de pétrole, soit un apport de 12 000 à 24 000 t/an dont 10 à 15 % rejoignent la mer via les pluies. 53 % de tout le vanadium de l'air serait ainsi d'origine anthropique.

	Ca	Co	Cr	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	S	Sr	V	Zn
Ca	1.00														
Co	-0.43	1.00													
Cr	-0.11	0.26	1.00												
Fe	-0.45	0.84	0.41	1.00											
K	-0.38	0.56	0.29	0.51	1.00										
Mg	-0.34	0.75	0.40	0.81	0.69	1.00									
Mn	-0.33	0.51	0.25	0.74	0.24	0.37	1.00								
Na	-0.19	0.52	0.17	0.65	0.44	0.73	0.36	1.00							
Ni	-0.24	0.89	0.36	0.86	0.54	0.82	0.55	0.52	1.00						
P	-0.32	0.18	0.23	0.24	0.28	0.14	0.35	-0.27	0.21	1.00					
Pb	-0.30	0.64	0.42	0.84	0.37	0.62	0.80	0.55	0.72	0.25	1.00				
S	-0.25	0.74	0.38	0.84	0.52	0.75	0.56	0.64	0.74	0.30	0.79	1.00			
Sr	0.92	-0.27	-0.05	-0.39	-0.20	-0.31	-0.28	-0.32	-0.10	-0.08	-0.29	-0.18	1.00		
V	-0.30	0.27	0.38	0.37	-0.01	0.18	0.37	-0.18	0.28	0.77	0.36	0.39	-0.17	1.00	
Zn	-0.38	0.82	0.36	0.85	0.52	0.66	0.71	0.36	0.87	0.39	0.85	0.70	-0.22	0.41	1.00

Tableau 7. Coefficients de corrélation entre les différents éléments.

### II.4. géochimie organique

Des analyses de Pyrolyse Rock Eval ont été utilisées pour déterminer l'origine de la matière organique des sédiments holocènes (derniers 10 000 ans) du Lac d'Anterne (Giguet-Covex et al., 2011). Pour cela les signatures IH/IO des sources de sédiments actuelles du bassin versant ont été comparées à celles des sédiments du lac (figure 22). Le diagramme IH/IO montre des signatures très différenciées des horizons de surface des sols développés, des horizons profonds de sols développés et des lithosols (schistes en partie décarbonatés). La signature de la matière organique lacustre, extraite d'un travail de thèse sur le Lac d'Annecy (Noël, 2001), se distingue également des autres sources.

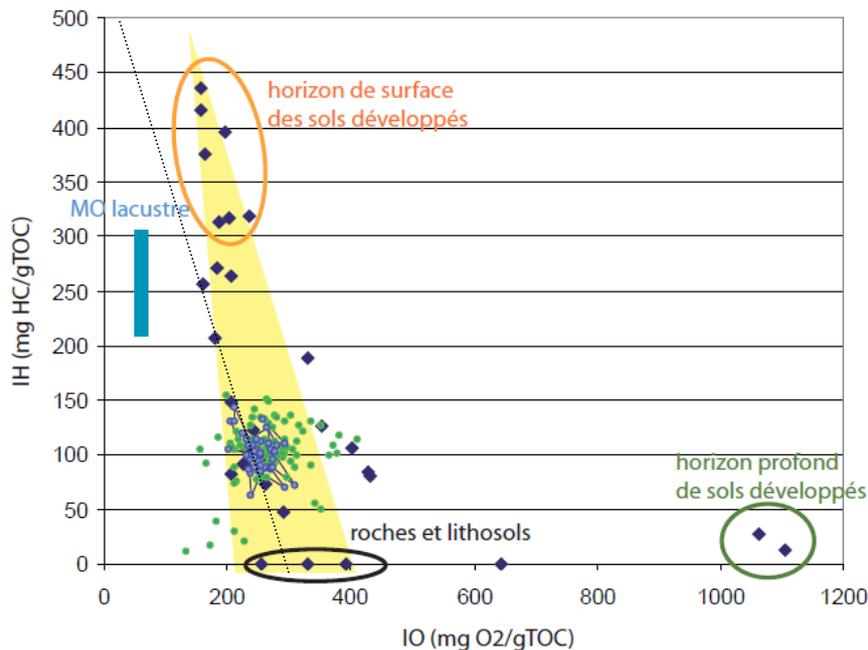


Figure 22. Diagramme IO/IH permettant de distinguer l'origine de la matière organique. Les ronds verts correspondent à la signature des sédiments holocène du lac d'Anterne (Giguet-Covex et al., 2011) et les bleus aux analyses réalisées sur les 170 dernières années.

Les données sur l'Holocène (en vert, figure 22), montrent des différences importantes qui peuvent être interprétées en termes de changement de contribution des sources. Les données représentant les 150 dernières années présentent une plus faible variabilité aussi bien en IH qu'en IO. Les valeurs suggèrent un mélange de matière organique provenant essentiellement des lithosols et des horizons de surface des sols développés. Cependant, ceci n'exclue pas une contribution non négligeable de la production lacustre dans certains échantillons (notamment avec des faibles valeurs d'IO).

### II.5. Interprétations : reconstitution de l'évolution de l'état écologique du lac

Durant les périodes 1905-1920, 1937-1950, 1960-1980, et 1990-2000, la matière organique augmente de manière concomitante avec le soufre (figure 23). 1935-1950 et 1960-1980 correspondent aux phases d'augmentations les plus marquées, surtout de la concentration en soufre. Durant ces deux phases, le taux de sédimentation est faible (<2mm/an). Ce résultat pourrait traduire une période de plus forte productivité lacustre, liée au moins en partie à de faibles apports sédimentaires. Cette production primaire aurait eu pour conséquence une augmentation de l'activité bactérienne dégradant cette matière organique et consécutivement une diminution de la concentration en oxygène au fond du lac. Cette désoxygénation est marquée ici par la forte concentration en soufre (précipitation de sulfures). Le maintien de conditions désoxygénées doit également être favorisé par la quasi absence de crues (voir § sur le suivi physico-chimique).

La signature autour de 100 mg de HC/g COT (IH) et de 240-250 mg d'O<sub>2</sub>/g COT (IO) est difficile à interpréter en termes d'origine de la matière organique. Cependant, par rapport

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

aux périodes de faibles concentrations en COT, la contribution en matière organique lacustre est probablement plus élevée (IH plus élevé et IO plus faible, figure 23).

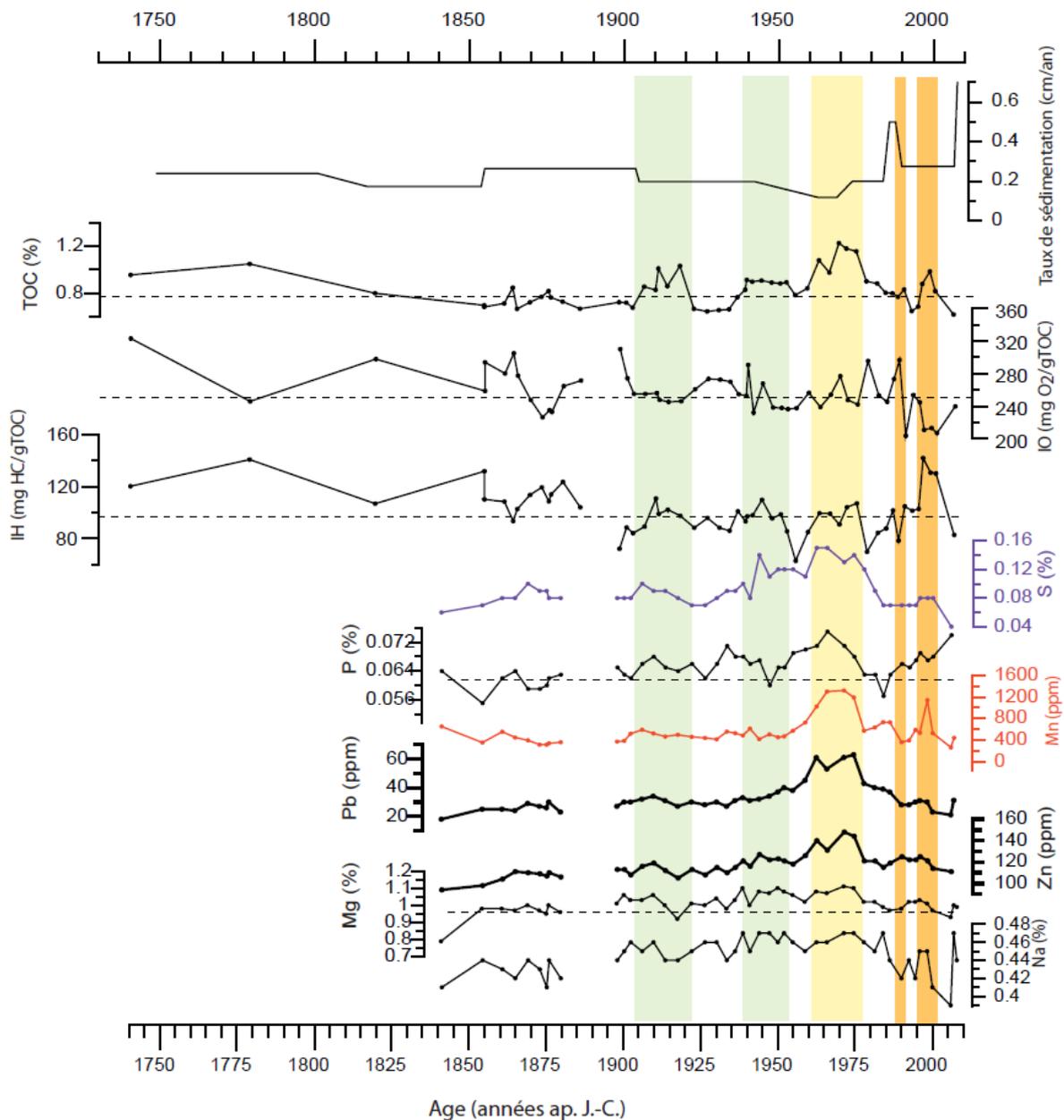


Figure 23. Evolution temporelle des éléments majeurs et traces, de la quantité et qualité de la matière organique.

La période autour des années 1900-2000 est marquée par une augmentation de matière organique essentiellement d'origine lacustre, ce qui traduit une nouvelle courte période de productivité primaire importante. Le taux de sédimentation durant cette période est plus élevé que durant la phase précédente.

Le Mn sous forme dissoute (réduite) généralement en condition anoxique (Kawashima et al., 1988 ; Davison, 1993 ; Aguilar et Neilson, 1998 ; Koinig et al., 2003) est

présent en forte concentration entre 1960 et 1980 alors que nous interprétons cette période comme une phase où l'hypolimnion est mal oxygéné durant l'hiver mais surtout une grande partie de l'été/automne. Ce résultat soulève donc la question de l'origine du Mn.

Le Pb et le Zn commencent à augmenter dans les années 40, puis atteignent un maximum entre 1960 et 73. Après la crise de 73, le Pb décroît de manière constante jusqu'à aujourd'hui. Le Zn diminue également. Cependant un nouveau léger pic est enregistré entre 1990 et 2000. Cette période correspond à celle d'augmentation de la matière organique lacustre. En outre, les concentrations maximales en nitrate et ammonium enregistrées dans les carottes de glace à Colle Gniffetti (Alpes Suisses, à ~80 km d'Anserne) sont enregistrées durant cette période. Une augmentation des apports d'azote atmosphériques pourraient alors être à l'origine de l'augmentation de la productivité primaire.

L'augmentation du calcium vers 1855 (60 cm ; figure 21) est associée à une augmentation des événements de précipitations de fortes intensités (Giguet-Covex *et al.*, [soumis](#)).

### III. Le Lac du Lauzanier (2285 m d'altitude, Parc du Mercantour, secteur Ubaye)

#### III.1. Sites de carottage

Pour cette étude, quatre carottes ont été utilisées. Elles ont toutes été prélevées dans la zone profonde (7.5 m ; figure 24). Les analyses réalisées sur les différentes carottes sont listées dans le tableau 8.

<i>nom des carottes</i>	<i>type d'analyse</i>
LAZ-10-P1	spectrocolorimétrie
	densité
	radioéléments
	ICP-optique
	PAF
LAZ-10-P2	chironomes
	densité
	radioéléments
	PAF
LAZ-10-P3	PCBs
	spectrocolorimétrie
	granulométrie
LAZ-10-P4	zooplancton
	spectrocolorimétrie
	Scanner itrax

Tableau 8. Liste des analyses effectuées sur les différentes carottes.

Toutes ces carottes ont du être corrélées les unes par rapports aux autres afin de vérifier que les séquences sédimentaires sont identiques et de pouvoir ensuite appliquer le modèle d'âge sur chacune d'entres elles.

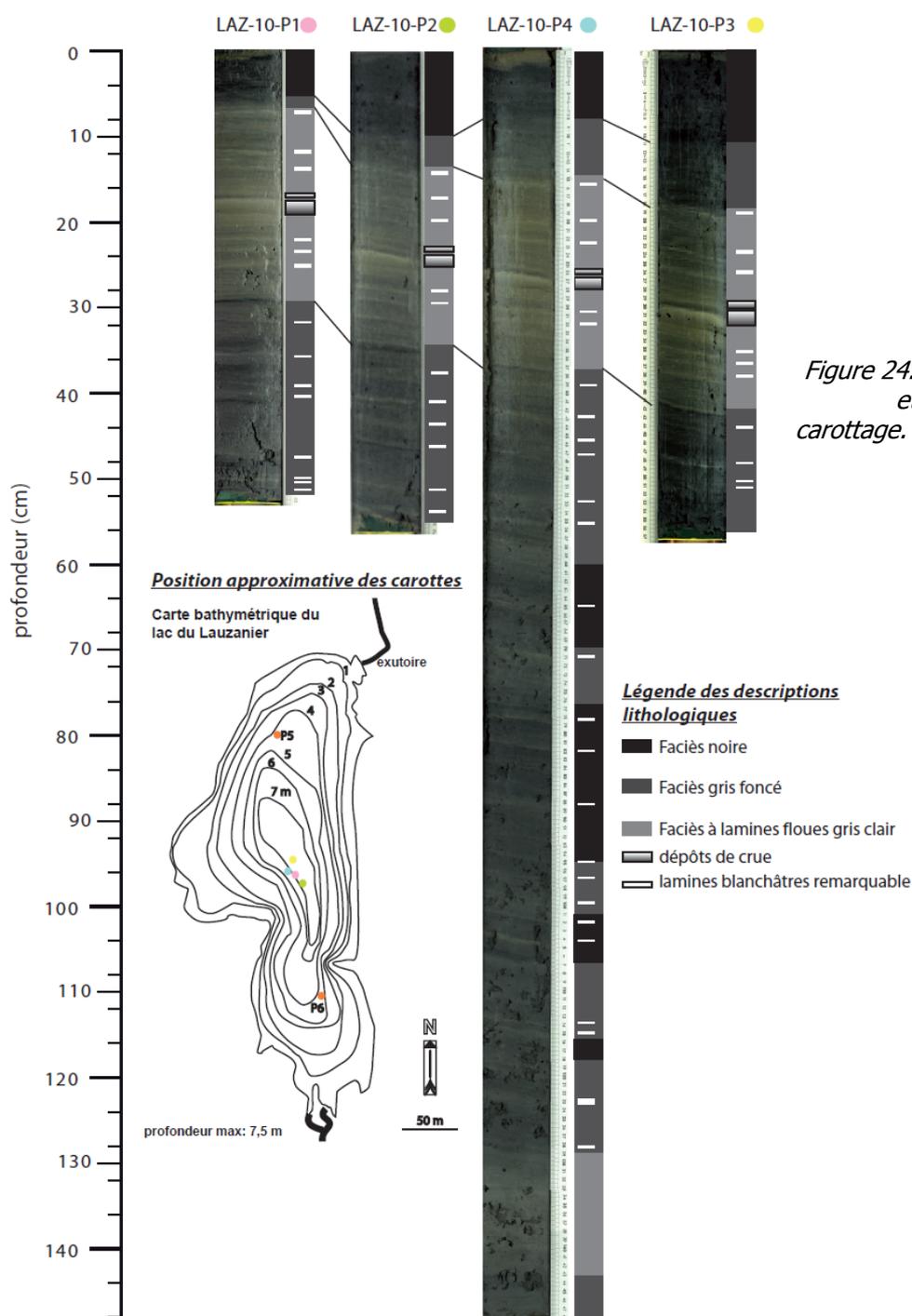


Figure 24. Carte bathymétrique et position des sites de carottage. Corrélations entre les différentes carottes.

### III.2. Sédimentologie et datation

Les corrélations présentées sur la figure 24 montrent que l'unité sédimentaire supérieure, plus sombre ne présentent pas la même épaisseur sur toutes les carottes. Les analyses de densité sèche du sédiment réalisées sur les carottes LAZ-10-P1 et P2 montrent que la teneur en eau explique une partie des différences mais pas la totalité. Dans cette

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

unité, 82 g et 115 g de sédiments se sont accumulés dans les carottes P1 et P2, respectivement. L'absence de niveaux remarquables dans cette unité limite les possibilités de corrélation et ne facilite pas la compréhension de cette différence de sédimentation. Les deux unités inférieures (l'une claire et l'autre sombre) sont quant à elles isopaques (de même épaisseur partout).

Les analyses de densité sèche et de couleur (réflectance,  $L^*$ ) réalisées sur la carotte LAZ-10-P1 mettent en évidence trois unités sédimentaires :

- ❖ de 0 à 7 cm (**unité 1**), une unité présentant des sédiments de faible densité et très sombre,
- ❖ de 7 à 29.5 cm (**unité 2**), une unité plus claire grise plus dense et présentant des lamines blanchâtres,
- ❖ et de 29.5 à 52 cm (**unité 3**), une unité de nouveau plus sombre et moins dense, mais pas autant que l'unité supérieure. Elle présente également des lamines blanchâtres.

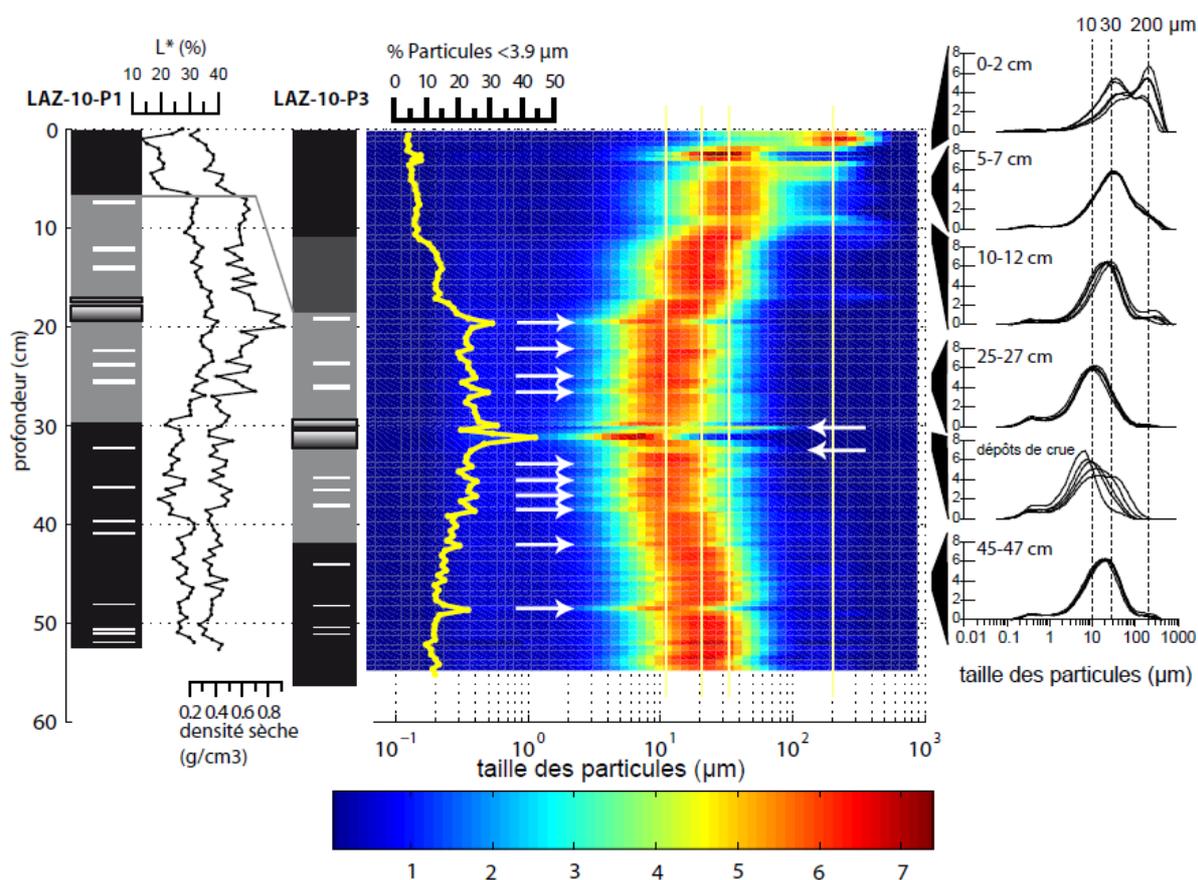


Figure 25. Descriptions lithologiques,  $L^*$ , densité et caractéristiques granulométriques des sédiments du Lac du Lauzanier.

Les analyses granulométriques réalisées sur la carotte LAZ-10-P3 mettent en évidence une sous-unité supplémentaire au sein de l'unité 1 : la sous-unité 1a entre 0-11 cm et 1b : entre 11 et 18.5 cm (figure 25). L'unité 1a est caractérisée par des sédiments grossiers avec

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

un mode autour de 30  $\mu\text{m}$  et même à 200  $\mu\text{m}$  au sommet. L'unité 1b présente un mode autour de 20  $\mu\text{m}$ . L'unité 2 est composée de 4 à 5 fois plus de particules argileuses (<3.9  $\mu\text{m}$ ) que l'unité 1a. Son mode oscille autour de 10  $\mu\text{m}$ . L'unité 3 présente les mêmes caractéristiques granulométriques que l'unité 1b. Deux dépôts successifs présentent une décroissance granulométrique de la base (30  $\mu\text{m}$ ) vers le sommet (6-7  $\mu\text{m}$ ) (figure 25). Ils sont associés à des crues.

Les observations au microscope pétrographiques montrent une composition similaire dans les unités 1b et 3 (figure 26). Elles présentent notamment des diatomées et de la matière organique amorphe brun-orangée. L'unité 2 se caractérise par la présence de matériel minéral, de matière organique amorphe brun-orangé et par la quasi absence de frustules de diatomées. L'unité 1a est composée essentiellement de diatomées, de matières organiques amorphes brun-orangées et noires.

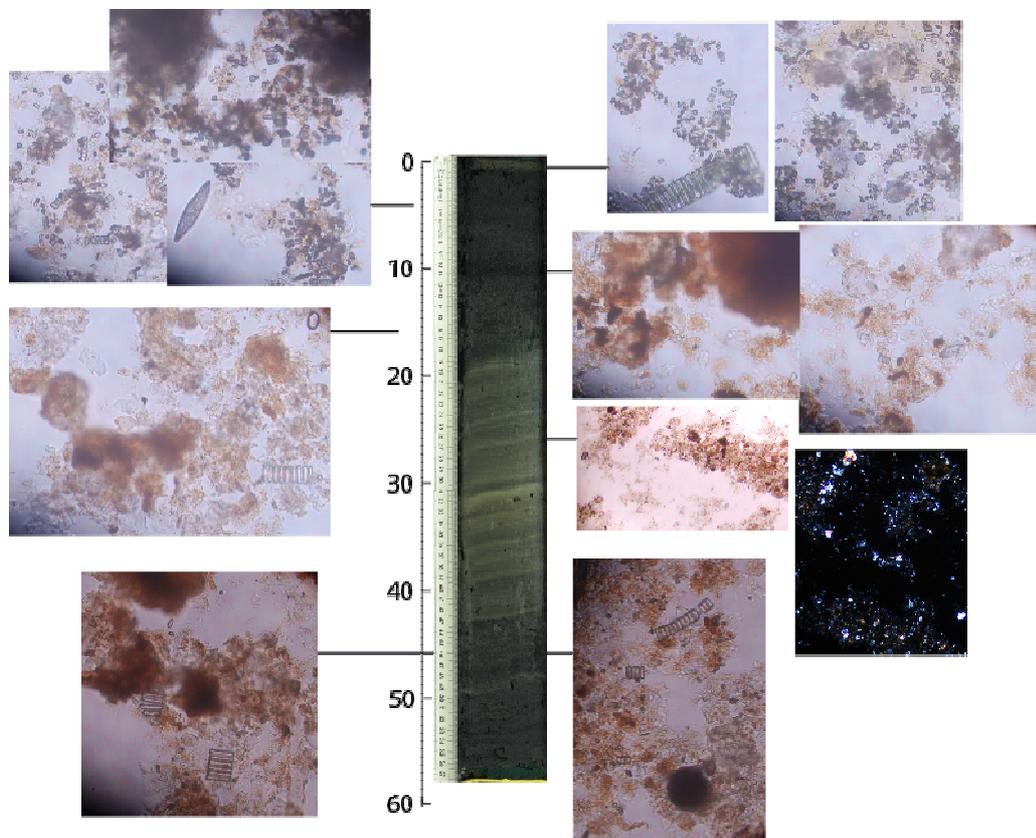


Figure 26. Frottis réalisés dans les différentes unités sédimentaires.

La datation par les radioéléments a été effectuée sur deux carottes (LAZ-10-P1 et LAZ-10-P2) en raison de la difficulté de corréler les carottes dans l'unité 1. Les résultats de la carotte P2 (figure en annexe) suggère que les sédiments déposés entre 1 et 7.5 cm correspondent à un événement instantané (6.5 cm). Entre ces deux profondeurs, le stock de Cs est très élevé et le profil de cet élément présente un pic très étalé. Le  $^{210}\text{Pb}$  est constant entre 1 et 5 cm, puis décroît légèrement entre 5 et 7.5 cm. Cet événement aurait eu lieu

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

dans les années 90. Après avoir enlevé ce dépôt, les profils de  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$  sont très similaires entre les deux carottes.

Les profils des radioéléments mesurés dans la carotte LAZ-10-P1 sont présentés sur la figure 27. L'allure du profil de  $^{137}\text{Cs}$  suggère la présence de bioturbation (ou du moins de la circulation de l'eau interstitielle). Le  $^{210}\text{Pb}$  présente deux courbent de décroissance, ce qui est interprété comme l'existence de deux taux de sédimentation (0.45 mm/an au sommet et 1.25 mm/an au-dessous). Le changement s'opère à 2 cm, ce qui est cohérent avec une modification de la composition du sédiment, qui devient beaucoup plus organique (figure 27). La comparaison du modèle d'âge établie à partir du plomb apparaît un peu trop jeune par rapport aux pics de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$ . Nous supposons donc une perte d'une partie de la sédimentation la plus récente ( $\sim 7$  ans). L'enregistrement s'arrête alors en 2003. Cette perte a probablement été causée par la technique utilisée pour le conditionnement des carottes juste après le carottage et le fait que les sédiments sont gorgés d'une grande quantité d'eau.

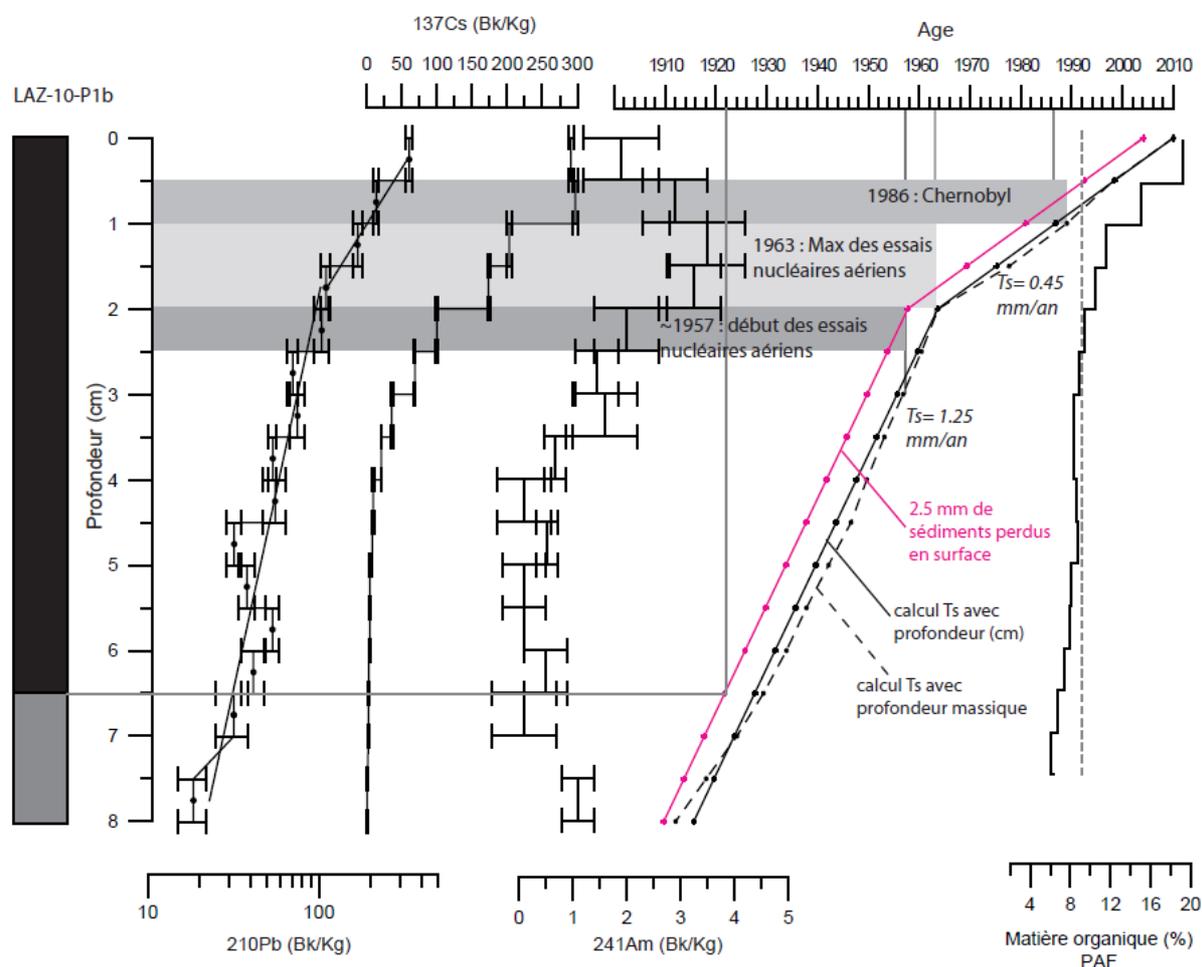


Figure 27 : Datation de la carotte LAZ-10-P1b à partir des radioéléments  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$ .

Le modèle obtenu permet de dater l'apparition de l'unité 1 dans les années 20 et le changement de taux de sédimentation à  $\sim 1958$ .

### III.3. géochimie minérale

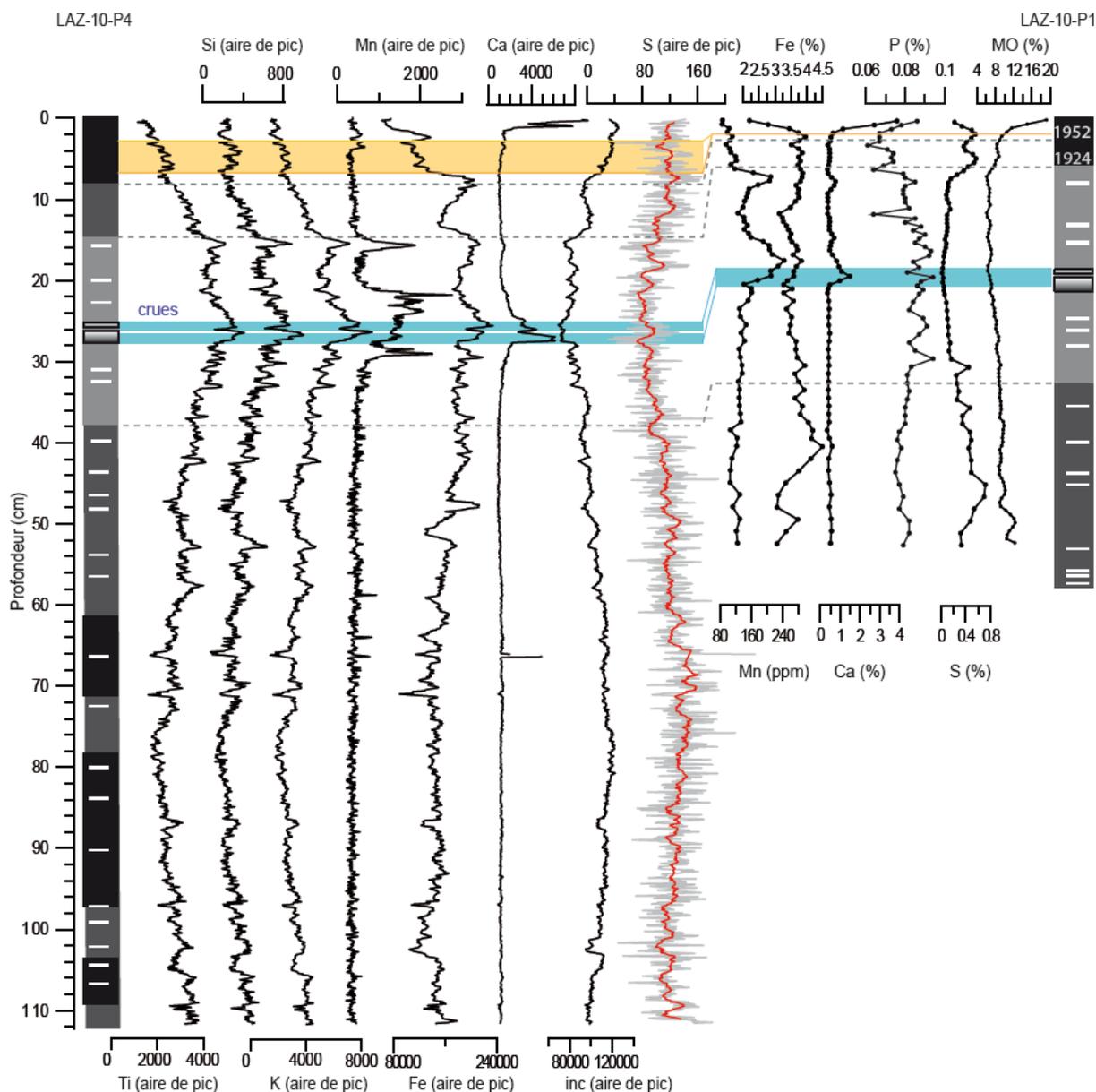


Figure 28. Géochimie minérale à partir des analyses au scanner de carotte itrax (LAZ-10-P4) et sur échantillons discrets (LAZ-10-P1). Les analyses de matière organique par PAF sont également présentées (LAZ-10-P1). Les rectangles bleus représentent les niveaux de crue. Le rectangle orange correspond à un niveau absent dans la carotte LAZ-10-P1.

Les analyses de géochimie minérale obtenues à partir des deux méthodes (scanner de carotte itrax, ICP-optique sur échantillons discrets) présentent des évolutions comparables sur les deux carottes, exceptées dans l'unité 1. En effet, dans cette unité un niveau de 4 cm d'épaisseur apparaît sur la carotte LAZ-10-P4 alors qu'il est absent sur l'autre carotte (LAZ-10-P1). Ce dépôt correspond à celui mis en évidence sur la carotte P2 à partir des comparaisons inter-carottes (P1 et P2) des analyses de radioéléments.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Les éléments Si, K et Ti sont corrélés et représentent les apports détritiques silicatés fins (figures 28 et 25). Le calcium reflète les apports détritiques de carbonate de calcium grossiers dans les deux niveaux de crue. Cet élément est peu abondant (entre 0.5 et 4 %). Ce sont les silicates qui dominent les apports clastiques. Ils proviennent de l'érosion des grès d'Annot et des sols installés dessus. Le pic vers 65 cm sur LAZ-10-P4 est associé à un pic de soufre (coupé sur la figure 28), ce qui suggère la présence de gypse. L'augmentation du calcium au sommet de la carotte, n'est cependant pas attribuée à des apports clastiques mais serait plutôt d'origine biogénique. Cette hypothèse pourra être vérifiée par la suite.

Les éléments Mg, Na et Co sont assez bien corrélés avec le K (tableau 9). Ils sont également d'origine détritique. Le Fe est également en parti contrôlé par les apports détritiques. Le coefficient de corrélation calculé entre le rapport Fe/Mg et le S ( $R= 0.8$ ) montre que le Fe est aussi présent sous forme de sulfures (tel que la pyrite). Il dépend donc aussi des processus d'oxydo-réduction : il précipite avec le soufre en conditions anoxiques.

Le Mn apparait en partie corrélé avec les éléments détritiques. Cependant, l'allure du profil suggère que le dépôt de Mn n'est pas uniquement contrôlé par les processus d'érosion. C'est également un élément rédox-dépendant qui précipite en conditions bien oxygénées.

Le P est bien corrélé au Mg si l'on excepte les trois points de mesures les plus récentes ( $R= 0.61$ ). Il est donc d'origine détritique durant la majeure partie de notre enregistrement. Les trois derniers points sont enrichis en phosphore par rapport aux apports détritiques.

	Ca	Co	Fe	Mg	Mn	Na	Ni	P	S	Sr	K	%MO	%TIC
Ca	1.00												
Co	-0.57	1.00											
Fe	-0.73	0.63	1.00										
Mg	-0.68	0.86	0.67	1.00									
Mn	-0.19	0.79	0.31	0.78	1.00								
Na	-0.39	0.66	0.66	0.62	0.56	1.00							
Ni	-0.63	0.89	0.69	0.97	0.82	0.69	1.00						
P	0.17	0.33	-0.24	0.39	0.66	0.18	0.39	1.00					
S	0.02	-0.41	0.22	-0.53	-0.71	-0.14	-0.51	-0.76	1.00				
Sr	0.83	-0.32	-0.38	-0.36	0.02	0.01	-0.33	0.27	0.07	1.00			
K	-0.39	0.50	0.56	0.61	0.36	0.56	0.57	0.18	-0.16	-0.02	1.00		
%MO	0.84	-0.79	-0.62	-0.90	-0.59	-0.50	-0.85	-0.20	0.46	0.63	-0.48	1.00	
%TIC	0.88	-0.44	-0.65	-0.62	-0.15	-0.44	-0.56	0.05	-0.01	0.60	-0.47	0.70	1.00

Tableau 9. Coefficient de corrélation entre les différents éléments.

L'unité 2 se distingue des autres unités par sa composition riche en éléments détritiques (Si, Ti, K, Fe, P), et en Mn. Les unités 1b et 3 présentent une composition similaire appauvrie en éléments détritiques et enrichie en S. L'unité 1a est encore plus appauvrie en éléments détritiques. C'est dans cette unité que le Ca et le phosphore non-détritiques augmentent fortement.

### **III.4. géochimie organique**

Le signal d'incohérence mesuré à l'itrax est corrélé à la matière organique mesurée en PAF (figure 28). Il peut donc être utilisé comme indicateur à haute résolution de la matière organique contenu dans les sédiments de ce lac. Les unités 1b et 3 présentent des concentrations en matière organique autour de 9 %. L'unité 3 est plus pauvre (~7 %). La concentration en matière organique explose dans l'unité 1a (de 10 à 20 %).

### **III.5. Interprétations : reconstitution de l'évolution de l'état écologique du lac**

#### III.5.1. Commentaire préalable

La méthode de datation par les radioéléments permet de dater uniquement les 100 dernières années (jusqu'à 1910), c'est-à-dire essentiellement l'unité 1. Le taux de sédimentation obtenu par cette méthode ne peut être ici extrapolé au reste de la carotte car un important changement lithologique intervient dans les années 20. Ce changement implique très probablement une modification du taux de sédimentation puisque la composition du sédiment et donc les processus à l'origine de leur dépôts sont différents. Le changement de taux de sédimentation ne peut être défini par le profil de 210Pb car une seule mesure a été réalisée sous la limite lithologique et de plus on est en limite de l'utilisation de la méthode. Cependant ce dernier point d'analyse pourrait suggérer un taux de sédimentation un peu plus faible dans l'unité 2, probablement en raison d'une teneur en eau et en matière organique plus faible.

#### III.5.2. Histoire de l'état écologique du lac

Sur les derniers 100 ans, deux changements majeurs dans la sédimentation ont été enregistrés : l'un au début des années 20 et l'autre au début des années 50. Le premier changement est marqué par une augmentation des apports en matière organique et ou une diminution des apports détritiques liés à l'érosion du bassin versant. L'augmentation du soufre (et la chute du Mn) au même moment est interprétée comme l'apparition de conditions plus contraignante du point de vu de l'oxygène ce qui permet la précipitation de sulfures. Cette dégradation de l'oxygénation est à mettre en relation avec l'augmentation de la matière organique dans le sédiment et traduit une dégradation de l'état écologique du lac. Cette augmentation de matière organique est interprétée comme le résultat d'une productivité lacustre plus importante.

Entre le début des années 50 et les années 2000, le teneur en matière organique augmente d'un facteur 2, alors que les éléments détritiques diminuent fortement. Le taux de sédimentation et la densité sèche diminuent également fortement peu après (1963). Ceci a pour conséquence une baisse des flux de matières organiques et minérales. Cependant, la chute du flux de matières minérales est beaucoup plus élevée. Cette période est toujours marquée par la présence de soufre et l'absence de Mn. Le fond du lac est donc toujours mal oxygéné. La sédimentation durant cette période est probablement quasiment uniquement composée de matières organiques issues de la production lacustre. La chute des apports détritiques contribue probablement à la mauvaise oxygénation du fond du lac et participe

alors à l'accumulation de la matière organique. Depuis 1950, l'origine du phosphore piégé dans les sédiments change. Il n'est plus lié aux apports détritiques. La forte augmentation de la matière organique à ce moment pourrait suggérer que ce phosphore se présente sous forme organique. Il proviendrait du bassin versant (matière fécales des troupeaux) et/ou de la productivité lacustre.

Il est intéressant de noter qu'une période avec des conditions similaires à celle de ~1924-1952 a déjà été enregistrée par le passé. La datation de cette autre période à partir d'analyse  $^{14}\text{C}$  permettra de mieux en comprendre l'origine, et notamment de déterminer si ces changements sont contrôlés par le climat ou plutôt par des fluctuations de la pression pastorale.

#### IV. Lac d'Allos (2230 m d'altitude, Parc du Mercantour)

##### IV.1. Sites de carottage

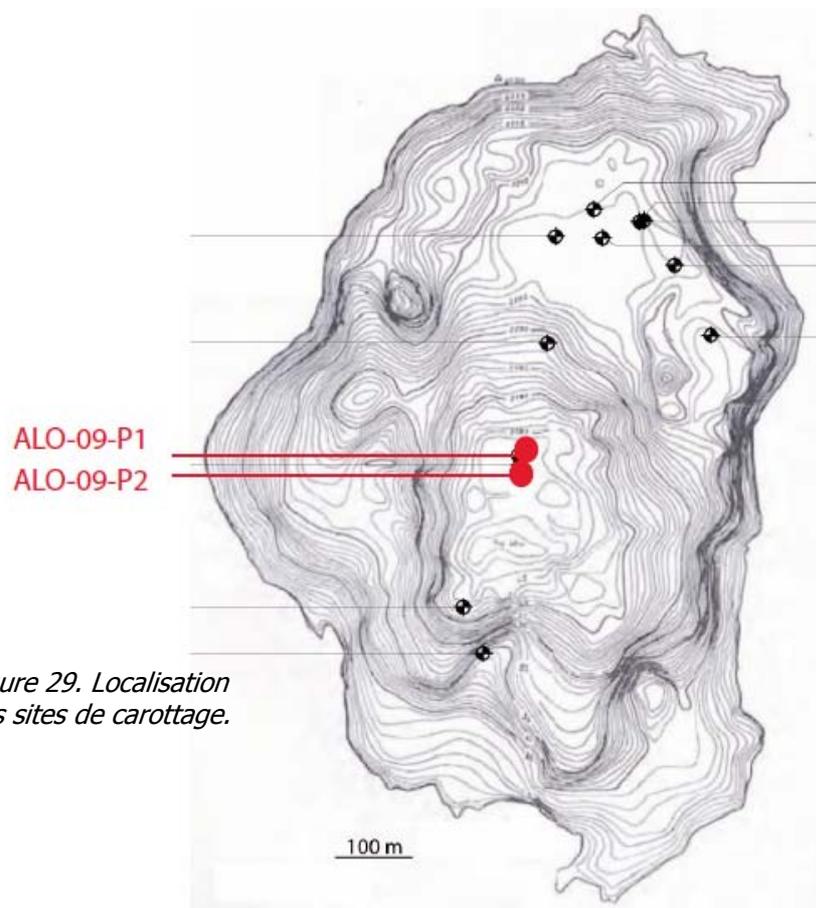


Figure 29. Localisation des sites de carottage.

Trois carottes de sédiments ont été utilisées pour cette étude (figure 29). Les analyses réalisées sont présentées dans le tableau 10. Les carottes ont été prélevées dans la zone la plus profonde du lac, c'est-à-dire dans le bassin sud à 40 m de fond.

nom des carottes	type d'analyse
ALO-09-P1	Pyrolyse Rock Eval scanner carotte itrax
ALO-09-P2	granulométrie
	densité
	radioéléments
	Pyrolyse Rock Eval
ALO-09-X	chironomes
	PCB

Tableau 10. Liste des analyses réalisées sur les carottes.

### IV.2. Sédimentologie et datation

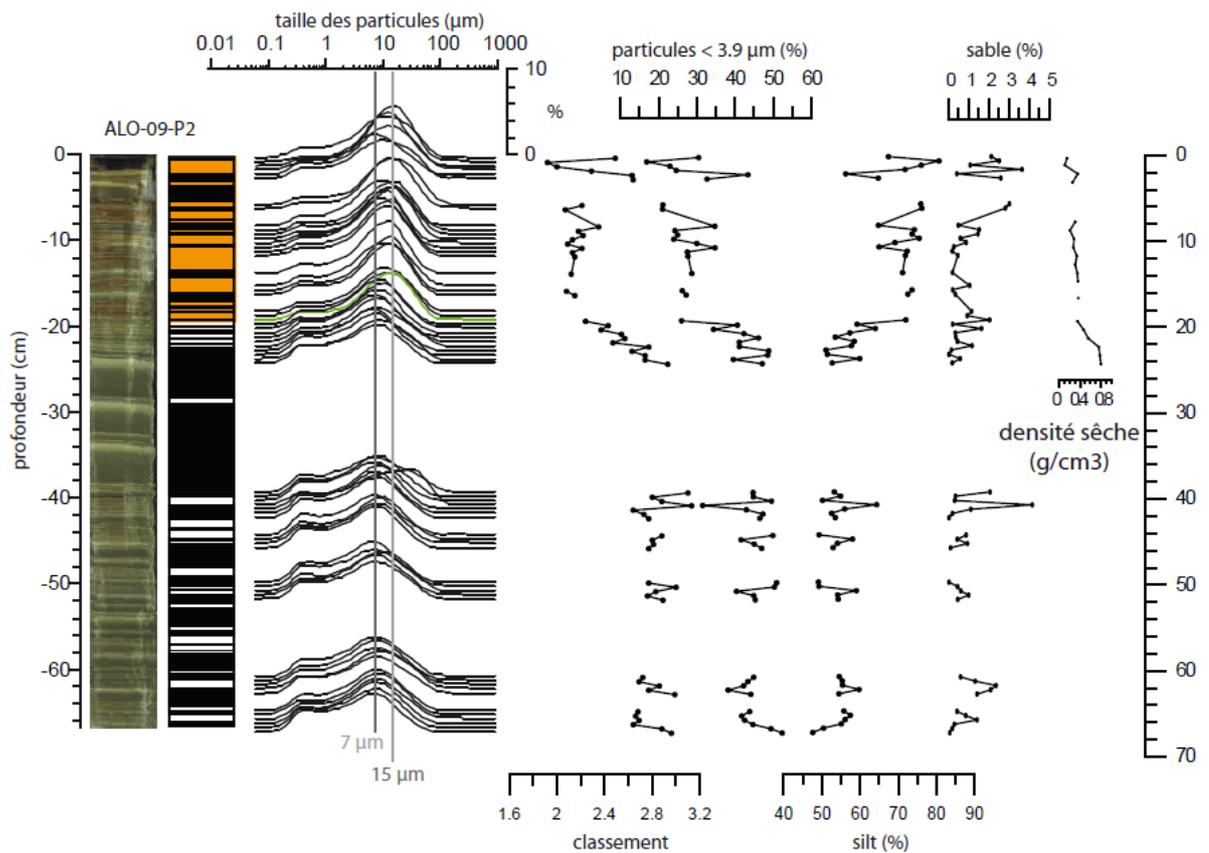


Figure 30 : caractéristiques granulométriques des sédiments laminés du Lac d'Allos (carotte ALO-09-P2).

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Les analyses de granulométrie et de densité permettent de distinguer deux unités :

- ❖ de 68 et 20 cm (unité 1) : les sédiments présentent des alternances de lamines sombres et claires qui sont essentiellement associés à des événements de crues. Les sédiments de cette unité (hors dépôts de crues >5mm) sont mal triés (classement élevé autour de 2.8), riche en matériel argileux (~45% de particules <3.9µm) et silts (~55%). Un mode à 7 µm domine les distributions granulométriques. Les quelques analyses de densité réalisées dans cette unité montrent une densité élevée (~0.8 g/cm<sup>3</sup>).
- ❖ de 20 à 0 cm (unité 2) : les sédiments sont noirs à l'ouverture de la carotte puis deviennent brun rougeâtre au bout de quelques jour en raison de l'oxydation notamment du fer. Les sédiments deviennent mieux triés et la proportion en argile diminue fortement (25-30%), tandis que celle des silts augmente (70-75%). Le mode dominant des distributions s'est déplacé vers 15µm. La densité sèche est divisée par 2 (~0.3-0.4 g/cm<sup>3</sup>).

Les analyses granulométrique mettent en évidence une phase de transition entre les deux unités entre 22 et 19 cm. Les dépôts de crues représentés en noir sur le log stratigraphique (figure 30) diminuent dans l'unité 1.

La carotte ALO-09-P2 a fait l'objet de datation par les radioéléments. La décroissance du <sup>210</sup>Pb donne un taux de sédimentation moyen de 1.4 mm/an (figure 31), qui est cohérent avec les pics de Tchernobyl et du maximum des essais nucléaires aériens. Le modèle d'âge a également pu être amélioré grâce à des crues historiques (juin 2005, septembre et novembre 1994, 1920, 1886 et en aout et octobre 1968) repérées dans les sédiments et datée approximativement par le <sup>210</sup>Pb. Le modèle amélioré par ces calages chronostratigraphique est présenté sur la figure 31. La position des pics des essais et de Tchernobyl est également présentée en comparaison. Ce modèle place le passage de l'unité 2 à l'unité 1 à ~1920 et la phase de transition entre 1900 et 1920.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

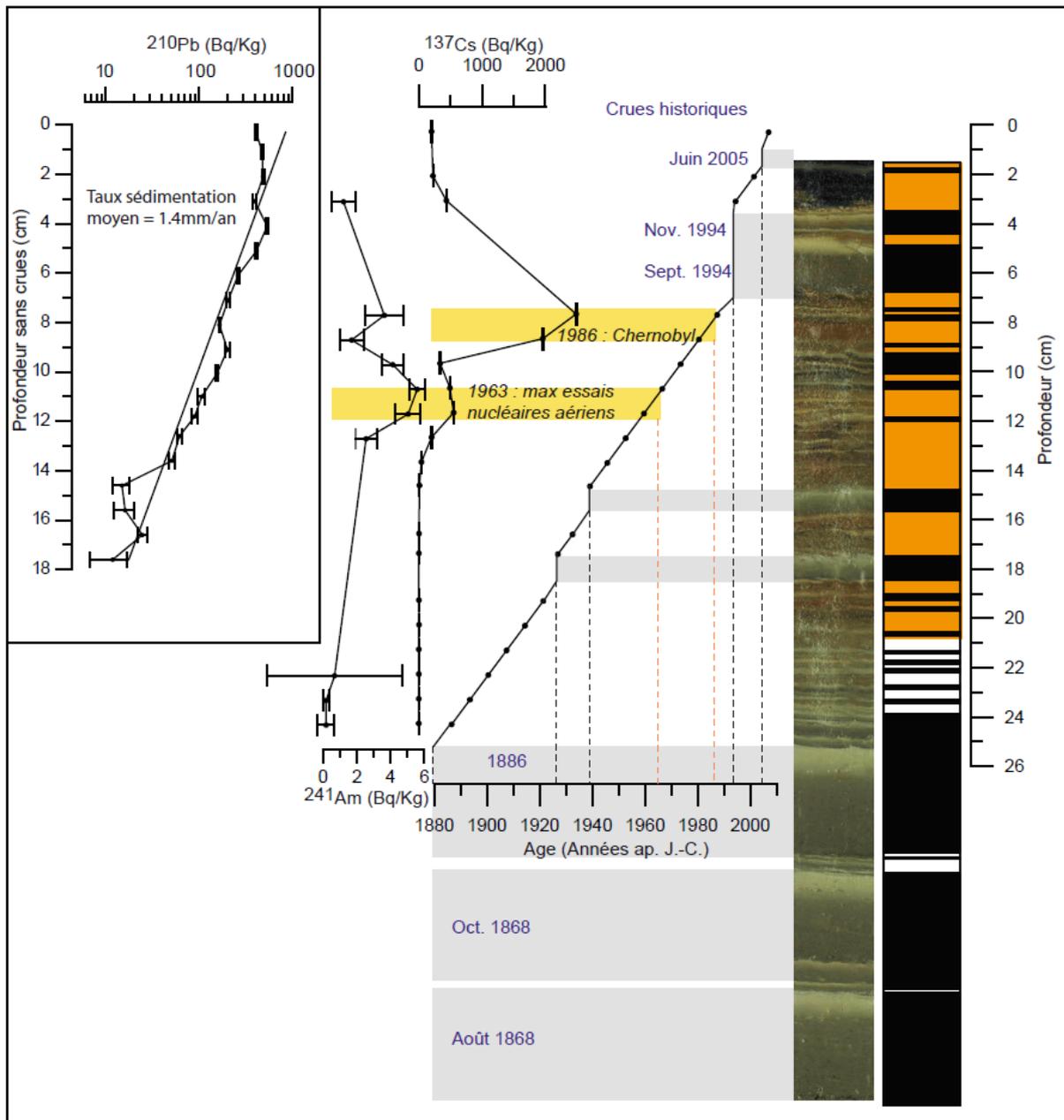


Figure 31. Datation de la carotte ALO-09-P2 par les radioéléments :  $^{210}\text{Pb}$  (A),  $^{241}\text{Am}$  et  $^{137}\text{Cs}$  (B). Comparaison du modèle obtenu avec les crues historiques.

### IV.3. Géochimie minérale

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

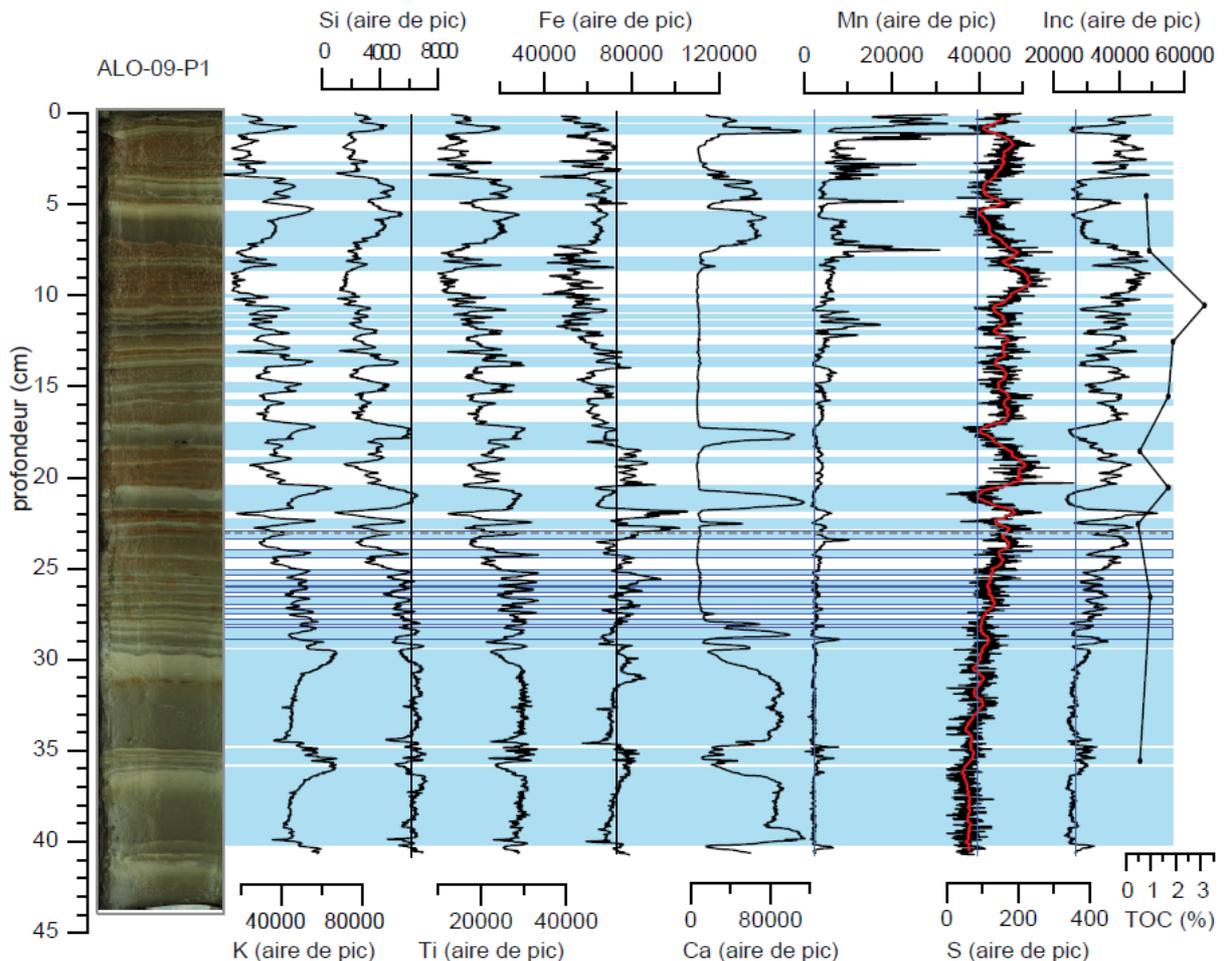


Figure 32. Géochimie minérale à partir des analyses au scanner de carotte itrax (ALO-09-P2). Les rectangles bleus correspondent à des niveaux de crues.

Quatre groupes d'éléments sont mis en évidence par les profils sur la figure 32 et le tableau 11 :

- ❖ K, Ti, Si, Al, et Rb qui représentent les apports détritiques. Le Fe est en parti corrélé à ces apports détritiques.
- ❖ Ca et Sr qui représentent les apports détritiques grossiers (dans les crues de forte intensité, tout comme à Anterne et au Lauzanier)
- ❖ Fe et S sont en parti corrélé. Le coefficient de corrélation entre Fe/Ti (Fe normalisé aux apports détritiques) et S est de 0.78. La présence de ces deux éléments est liée à la précipitation de sulfures en conditions anoxiques. Le S est aussi corrélé au Mo, qui est aussi un élément affecté par les conditions d'oxydo-réduction.
- ❖ Et le Mn qui est présent en forte concentration essentiellement sous les niveaux de crues (rectangles bleus, figure 32). Les plus fortes concentrations sont observées dans les niveaux de précipitation de sulfures, c'est-à-dire dans des périodes d'anoxie importante alors que le Mn est supposé être sous forme réduite et dissoute. Ce Mn pourrait avoir été piégée sous forme dissoute par les dépôts de crues : ces dépôts étant très denses auraient empêché la circulation de l'eau interstitielle et ainsi le relargage du Mn dissous dans la colonne d'eau.

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

L'on peut noter que dans les trois systèmes lacustres pour lesquels la géochimie a été étudiée (Anterne, Lauzanier et Allos), le Mn présente une dynamique différente qui n'est pas toujours simple à interpréter.

Le changement de faciès sédimentologique observé à 23 cm sur ALO-09-P1 (dans les années 20), correspond à une augmentation du soufre, du paramètre d'incohérence et de la concentration en Mn. Cette phase est associée à une chute des apports détritiques silicatés.

	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Rb	Sr	Mo	Cr inc
Al	1.00													
Si	0.93	1.00	1.00											
S	-0.67	-0.75	0.43	1.00										
K	0.93	0.84	-0.23	-0.65	1.00									
Ca	0.47	0.69	-0.49	-0.61	0.33	1.00								
Ti	0.85	0.94	-0.32	-0.69	0.81	0.61	1.00							
Mn	-0.53	-0.52	0.06	0.31	-0.53	-0.22	-0.57	1.00						
Fe	0.55	0.51	-0.08	-0.23	0.57	0.08	0.57	-0.46	1.00					
Co	0.52	0.49	-0.06	-0.23	0.52	0.11	0.54	-0.60	0.84	1.00				
Rb	0.73	0.60	-0.13	-0.49	0.87	0.05	0.63	-0.47	0.51	0.47	1.00			
Sr	0.36	0.58	-0.42	-0.49	0.25	0.88	0.58	-0.23	0.09	0.13	0.08	1.00		
Mo	-0.75	-0.84	0.43	0.73	-0.74	-0.70	-0.80	0.44	-0.38	-0.37	-0.52	-0.58	1.00	
inc	-0.78	-0.90	0.42	0.76	-0.75	-0.78	-0.91	0.47	-0.37	-0.37	-0.57	-0.73	0.84	1.00

Tableau 11. Coefficients de corrélation entre les différents éléments.

### IV.3. Géochimie organique : pyrolyse Rock Eval

Les analyses de pyrolyse Rock Eval réalisées correspondent à des échantillons prélevés dans des niveaux de crues d'une part et dans la « sédimentation continue » d'autre part. Les niveaux de crue présentent une signature entre 70 et 150 mg HC/g de COT (IH) et 250 et 400 mg O2/g COT (IO) (figure 33). Une partie des échantillons représentant la « sédimentation continue » se trouve dans ces gammes de valeur. La correspondance de signature avec les événements de crues qui apportent de la matière organique terrestre montre que la « sédimentation continue » est principalement composée de matière organique d'origine terrestre. Les autres échantillons sont enrichis en IH et appauvrit en IO. Cette signature traduit une augmentation de la contribution en matière organique lacustre.

Le COT et le paramètre d'incohérence sont relativement bien corrélés. Le COT augmente entre 17 et 9 cm de profondeur, c'est-à-dire entre ~1935 et 1985. Un premier pic est aussi enregistré à 20 cm (~1920). Le contenu en COT n'a pas encore été mesuré entre 0 et 4 cm.

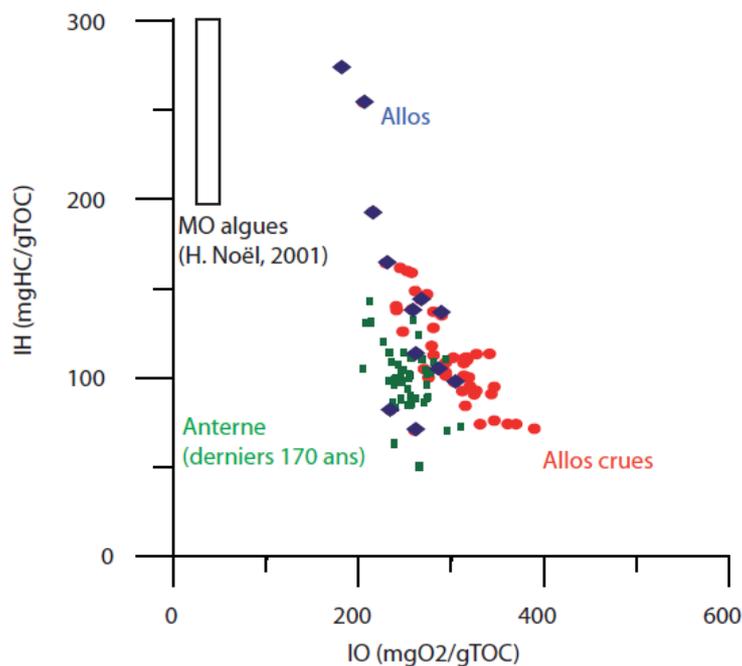


Figure 33. Diagramme IO/IH permettant de distinguer l'origine de la matière organique. Les ronds rouges et les losanges bleus correspondent aux analyses réalisées dans les niveaux de crues et au sein de la sédimentation continue respectivement. Les analyses réalisées sur les sédiments récents du Lac d'Anterne sont également présentées (rectangles verts), pour comparaison.

#### IV.5. Interprétations : reconstitution de l'évolution de l'état écologique du lac

Un premier changement lithologique est enregistré dès le début des années 20. Il correspond à une augmentation des sulfures, ce qui suggère l'apparition de conditions anoxique dans l'hypolimnion. L'augmentation de la matière organique intervient aussi dans les années 20 avec un premier pic, puis devient plus marquée à partir du milieu des années 30 (figure 34). Cette augmentation de la matière organique est due à l'augmentation de la matière organique lacustre. Ce changement pourrait être attribué au réchauffement du climat favorisant la productivité primaire par la diminution de la période d'englacement du lac. Cette augmentation de la productivité lacustre est probablement à l'origine de la dégradation des conditions d'oxygénation au fond du lac.

Cette période est aussi marquée par une chute des éléments détritiques et une baisse du taux de sédimentation et de la densité sèche. Par conséquent, le flux de sédiments d'origine détritique baisse. Cette chute des apports détritiques pourrait avoir contribué à une augmentation de la pénétration de la lumière dans l'eau (eau plus claire) et donc à une augmentation de la « zone d'eau libre ». Elle favorise également la désoxygénation de l'hypolimnion en limitant le brassage de la colonne d'eau.

Le maximum de concentration en matière organique lacustre dans le sédiment (entre 1800 et 1994) est enregistré entre ~1940 et 1980 (surtout entre 1965 et 80). Le niveau trophique atteint donc son maximum durant cette période. Il diminue entre 1980 et 1994. L'augmentation des teneurs en soufre après cette phase et jusqu'à aujourd'hui et les

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

valeurs élevées du paramètre d'incohérence indique que le niveau trophique ré-augmente. Ceci est cohérent avec l'état actuel du lac qualifié à partir de l'IBL.

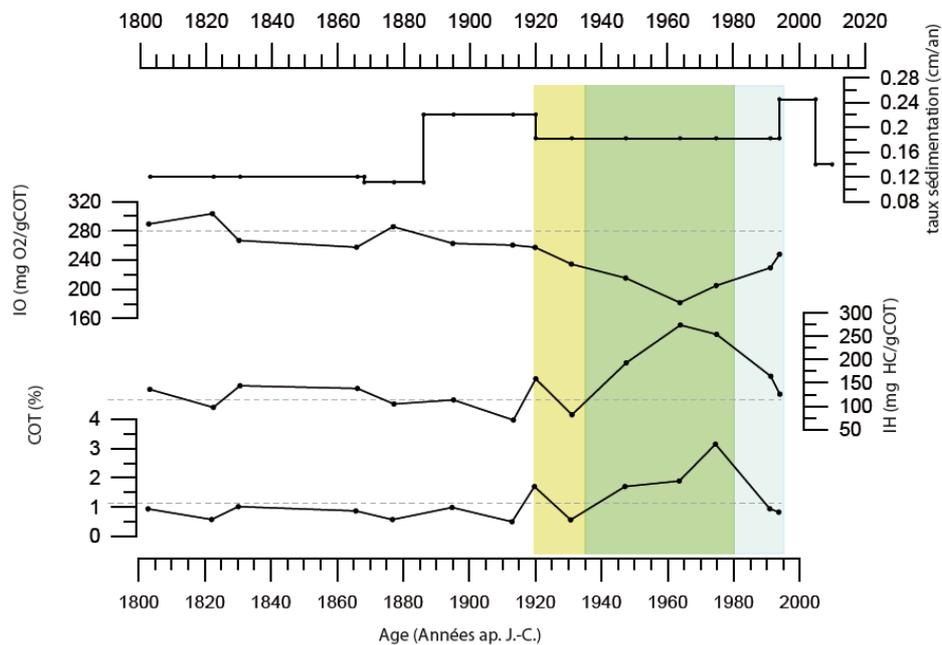


Figure 34. Evolution du taux de sédimentation (hors dépôts de crues > 5 mm et calé par les crues historiques), de la quantité et de la qualité de la matière organique au cours du temps (carotte ALO-09-P1).

# L'Approche de rétro-observation :

## Les indicateurs biotiques

## I. Reconstruction de l'histoire fonctionnelle récente par l'étude des peuplements chironomidiens sub-fossiles

### I.1. Remarque préliminaire : origine des capsules céphaliques de chironomes

L'origine des capsules céphaliques archivées dans les sédiments est une question primordiale pour l'interprétation de l'évolution temporelle de la composition des assemblages fossiles. Schématiquement, deux cas de figure peuvent être rencontrés :

- Dans les lacs peu profonds, non ou faiblement stratifiés, il a été démontré que sous l'influence de phénomènes de remise en suspension et de brassage des particules sédimentaires, les capsules céphaliques accumulées au point le plus profond proviennent de larves colonisant les différents habitats lacustres, depuis les zones littorales jusqu'à la zone profonde. L'assemblage sub-fossile fournit alors une estimation de la composition moyenne des communautés de Chironomidae pour l'ensemble du lac. La comparaison des données IBL et de la composition des assemblages fossiles du sédiment de surface montre que le Lac du Lauzanier (Prof. Max.=7.5 m) rentre dans cette première catégorie (Tableau 12). En effet, les assemblages fossiles de la zone profonde semblent plutôt fournir une image du peuplement larvaire moyen de l'ensemble du lac (zone littorale + 0,66 Zmax).

- Dans les lacs profonds, stratifiés, les capsules céphaliques accumulées dans les sédiments de la zone profonde proviennent majoritairement des larves colonisant la zone avec une influence faible -voire nulle- des phénomènes de remobilisation et d'érosion vers la zone profonde des capsules céphaliques des larves peuplant les zones littorales. Au lac d'Allos, la liste faunistique IBL ([données GREBE 2008 pour l'Agence de l'Eau RMC](#)) montre de très faibles densités larvaires à 0,66 Zmax avec la présence d'*Orthocladus* et de *Tanytarsus*. On peut supposer l'absence totale de larves de Chironomidae dans la zone profonde. L'échantillon de sédiment d'interface (0-1 cm) prélevé dans la zone profonde est marqué par un influx très faible de capsules céphaliques (4 capsules comptées pour 32 cm<sup>3</sup>) ce qui semble rendre compte fidèlement de l'état de la faune profonde du lac d'Allos (absente). Les rares capsules céphaliques retrouvées correspondent à des taxa comme *Paratanytarsus* et *Cricotopus* et sont d'origine littorale (retrouvée à -2m). D'autre part même si les densités dans la zone littorale de *Micropsectra* et de *Stictochironomus* sont élevées (165 et 1717 individus par m<sup>2</sup>, respectivement) aucune capsule céphalique de ces deux taxa n'a été retrouvée dans les sédiments d'interface en zone profonde.

Ainsi, dans les lacs profonds et stratifiés comme le lac d'Allos, l'analyse de la dynamique des influx en capsules céphaliques des différents taxa est importante et complète celle des abondances relatives dont la pertinence peut être remise en cause en cas de très faibles dénombrements (faible influx de capsules-faible densité larvaire). Même si l'on peut supposer que le lac d'Anterne rentre dans cette deuxième catégorie d'après ses caractéristiques (Prof. Max = 13,2 m), l'absence de donnée fossile postérieures à 2007 empêche toute comparaison avec des peuplements larvaires échantillonnés en 2010. De

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

plus, l'échantillonnage pratiqué (volume variable) ne permet pas de transformer les dénombrements de restes fossiles en influx.

	Littoral	0,66 Zmax	Moyen (Lit+ 0.66 Zmax)	Fossile 0-0,5 cm
Littoral	0	0,38094	0,18556	0,24759
0,66 Zmax		0	0,19713	0,27118
Moyen (Lit + 0.66 Zmax)				<b>0,17671</b>
Fossile 0-0,5 cm				0

Tableau 12 : Lac du Lauzanier : Chord distance calculée entre les assemblages fossiles de l'échantillon de surface et les communautés larvaires déterminées par le protocole IBL.

## I.2. Lac d'Anterne

### I.2.1. Résultats

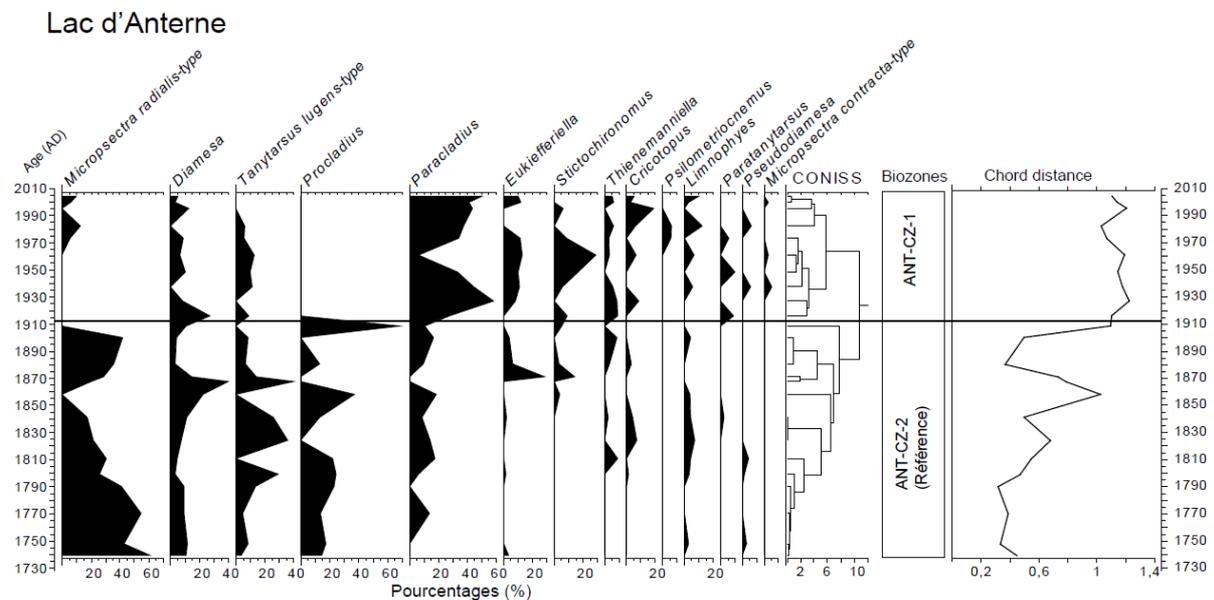


Figure 35. Assemblages de chironomes fossiles au Lac d'Anterne.

14 échantillons couvrent en continu les 110 dernières années à l'exception de la période 1993-1986 pour laquelle aucun niveau n'a été analysé (analyse complémentaire en cours). La résolution temporelle moyenne est de 7,4 années par échantillon. Cette première série a été complétée par l'analyse discontinue de 14 autres échantillons répartis entre 1884 et 1735 (4 à 10 années couvertes par chaque échantillon). L'analyse de cluster permet d'identifier 2 biozones successives (ANT-CZ-1 et ANT-CZ-2, Fig. 35). L'enregistrement débute par une première phase (ANT-CZ-2) qui se distingue de la suivante par de forte abondance

de *M. radialis-type* (jusqu'à 60 %), la présence de *Procladius* avec des pourcentages variables allant de quelques pourcents à plus de 60%, et des abondances relatives plus élevées de *Tanytarsus lugens-type*. Un changement important dans la composition des communautés s'opère vers 1910. Les assemblages de ANT-CZ-1 sont alors dominés par *Paracladius* accompagné de *Stictochironomus* tandis que *Procladius* disparaît et que *M. radialis-type* n'apparaît plus que très sporadiquement.

## 2.2. Interprétation : état de référence des communautés chironomidiennes, trajectoire récente et facteurs de perturbations

La communauté de « référence » du lac d'Anterne est mise en évidence par l'analyse de cluster, elle correspond à la biozone ANT-CZ-2. Elle est dominée par l'association *M. radialis-type*, *Procladius*, *Tanytarsus lugens-type* et *Paracladius*. Une étude précédente des assemblages de Chironomidae du lac d'Anterne (Millet et al., 2009) a montré la dominance continue de cette association au cours des 1800 dernières années. Cette faune chironomidienne est typique des lacs d'altitude avec une faible accumulation organique sédimentaire et des conditions d'oxygénation favorables. A partir de 1910, les communautés de Chironomidae d'Anterne s'écartent brutalement de la référence (Chord distance, Fig. 35).

La disparition totale de *Procladius* pourrait constituer la conséquence de l'introduction de l'Ombre chevalier dans le lac d'Anterne à partir du début du XXème siècle. En effet, les nymphes de *Procladius* sont de grandes tailles et sont souvent consommées par les Ombles, opportunistes.

La forte régression de *M. radialis-type* montre la mise en place de conditions, probablement d'oxygénation, trop contraignantes pour ce taxon. Le maintien de *Paracladius* taxon relativement oxyphile suggère cependant l'installation d'une hypoxie dans la zone profonde plutôt qu'une anoxie durable. La dégradation supposée des conditions d'oxygénation pourrait être la conséquence d'une augmentation même limitée de l'accumulation de MO dans le sédiment (Fig. COT Anterne). En effet, la surface du lac d'Anterne est gelée une grande partie de l'année. Dans ce contexte, même une faible accumulation de MO épuise rapidement la réserve en oxygène du système et conduit à une dégradation des conditions d'oxygénation de la zone profonde. Finalement, la perte de taxon dans la zone profonde révélée par l'enregistrement fossile confirme la définition grâce à l'IBL d'un état intermédiaire entre méso et dysfonctionnel avec un  $Df=0.6$  calculé entre la zone littorale et la profondeur maximale.

### ***1.3. Lac du Lauzanier***

#### 1.3.1. Résultats

26 échantillons ont été analysés en continu le long de l'enregistrement sédimentaire qui couvre les 150 dernières années environ. Il faut noter ici que les informations chronologiques dont nous disposons au moment de la rédaction de ce document ne permettent pas d'établir une chronologie précise au-delà de 8 cm (1915). Pour des

profondeurs supérieures, l'influx total en capsules céphaliques est calculé à partir d'une extrapolation du taux de sédimentation déterminé pour la période 1960-1915. Pour le dernier siècle, la résolution temporelle moyenne est de 11 années par échantillon entre 2005 et 1960 et de 4 années par échantillon entre 1960 et 1915. La classification hiérarchique montre deux biozones principales (LAUZ-CZ-1 et LAUZ-CZ-2) d'après les changements majeurs dans la composition des assemblages (Fig. 36). Lauz-CZ-2 est caractérisée par une co-dominance de *Paracladius* (15 à 40 %), *Tanytarsus lugens-type* (15 à 60 %) et dans une moindre mesure de *Stictochironomus* (jusqu'à 20 %). On note aussi l'occurrence régulière de *Micropsectra contracta-type* (de 0 à 10%), et d'*Eukiefferiella* (de 0 à 10 %). Pendant cette biozone, l'influx total est d'abord faible puis augmente (multiplié par 2-3) à partir de 1930. LAUZ-CZ-1 débute peu après 1950, elle est marquée par des assemblages beaucoup moins équilibrés avec une très forte dominance de *Tanytarsus lugens-type* dont les pourcentages ne descendent pas en dessous de 60%. Quelques taxa apparaissent et/ou se développent légèrement comme *Psectrocladius sordidellus-type*, *Procladius* et *Cricotopus* tandis que les abondances relatives de la plupart des autres Chironomidae diminuent fortement. Pendant LAUZ-CZ-1, l'influx total se maintient à des valeurs élevées.

### Lac du Lauzanier

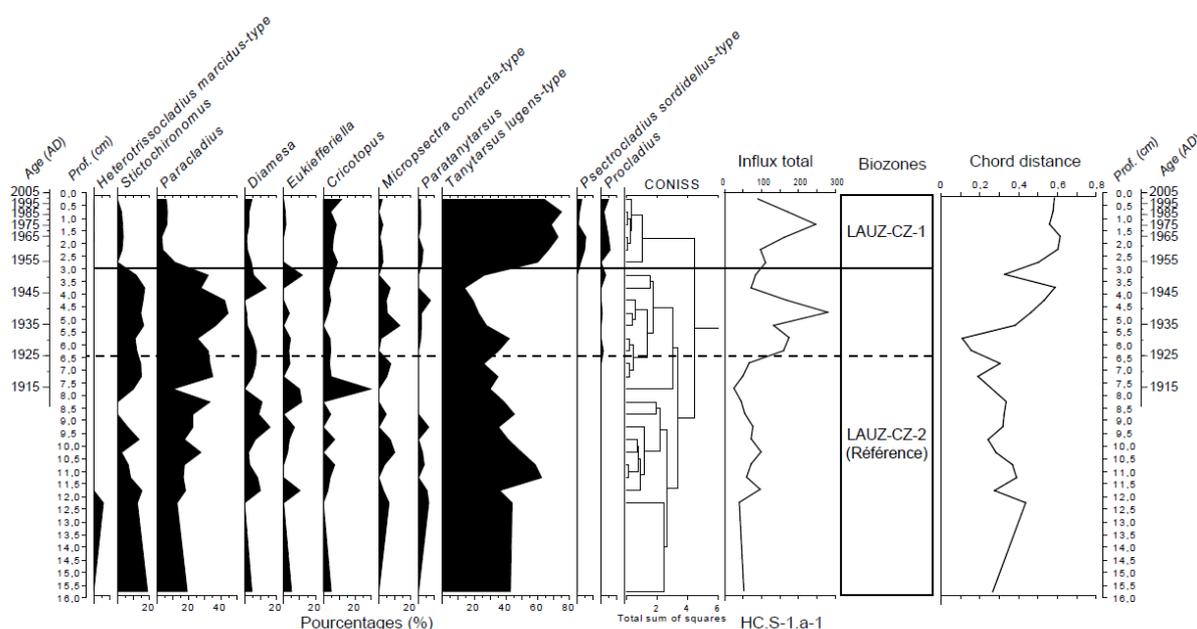


Figure 36. Assemblages de chironomes fossiles du Lac du Lauzanier.

### I.3.2. Interprétation : état de référence des communautés chironomidiennes, trajectoire récente et facteurs de perturbations

Comme nous l'avons développé plus largement (§1), les assemblages fossiles de la séquence du Lauzanier fournissent une image des peuplements larvaires de l'ensemble du lac (zone littoral + 0,66 Zmax). Les perturbations du fonctionnement trophique des systèmes lacustres affectent en premier lieu la zone profonde (accumulation organique, dégradation des conditions d'oxygénation) et ses communautés. Ainsi, la perception des changements fonctionnels à travers l'enregistrement fossile du Lauzanier sera limitée.

La communauté chironomienne « de référence » correspond à la biozone LAU-CZ-2, elle est essentiellement marquée par la co-dominance de *Paracladius*, *Tanytarsus lugens-type* et *Stictochironomus*. Une autre caractéristique de cette communauté de référence est un faible influx total. L'évolution des communautés par rapport à cet assemblage de référence est synthétisée par la courbe de Chord distance.

Le premier signe du changement des communautés est d'ordre quantitatif : à partir de 1925 environ les influxs en capsules céphaliques sont multipliés par un facteur 3-4. Pour mémoire, l'influx total en capsules céphaliques est de 15 à 20 fois supérieur à celui du Lac d'Allos pendant la biozone « référence ». C'est peu après 1950 que les assemblages se différencient plus nettement de la référence d'un point de vue qualitatif (Biozone LAU-CZ-1) avec la forte dominance d'un seul taxon et des assemblages globalement moins équilibrés.

L'enrichissement des sédiments en MO (Fig. COT Lauzanier) est très probablement à l'origine de cette dynamique des assemblages. Jusque vers 1930, l'apport de matières nutritives supplémentaires entraîne une augmentation des densités larvaires benthiques à l'échelle du système. C'est seulement vers 1950 que cet excès de MO entraîne une dégradation des conditions d'oxygénation qui vont devenir contraignantes dans la zone la plus profonde du système. Les taxa plus sténoèces régressent tandis que les plus tolérants colonisent les zones de faibles profondeurs en maintenant des densités élevées.

### I.4. Lac d'Allos

#### I.4.1. Résultats

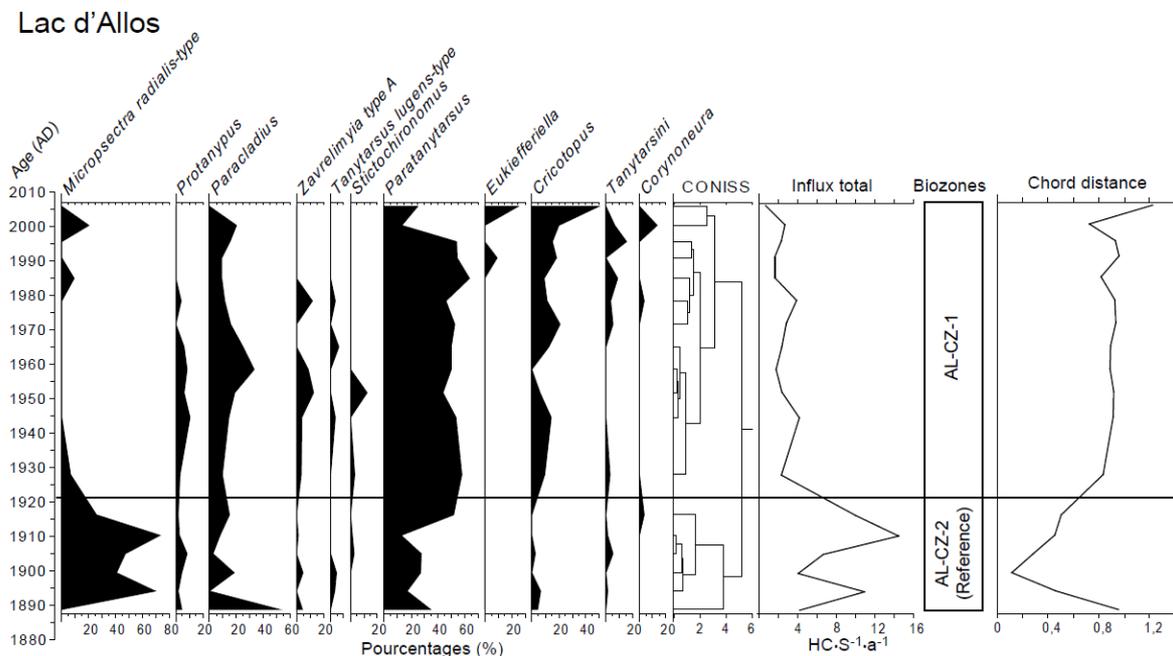


Figure 37. Assemblages de chironomes fossiles au Lac d'Allos.

18 échantillons ont été analysés en continu le long de l'enregistrement sédimentaire qui couvre les 130 dernières années environ. La résolution temporelle moyenne de l'étude est donc de 7,2 années par échantillon. La classification hiérarchique permet de mettre en évidence deux biozones principales (AL-CZ-1 et AL-CZ-2) d'après les changements majeurs dans la composition des assemblages (Fig. 37). La biozone AL-CZ-2 (la plus ancienne) est principalement caractérisée par de fortes abondances relatives de *Micropsectra radialis-type* (jusqu'à 70 %) ainsi que par un influx élevé de capsules céphaliques. Vers 1920, on constate une chute brutale des abondances relative de *M. radialis-type* et de l'influx en capsules céphaliques. La biozone AL-CZ-1 est alors marquée par la dominance de *Paratanytarsus* (jusqu'à 60 %) accompagné de *Cricotopus* (autour de 10-20 %) et de *Paracladius* (vers 20 %). Il faut souligner les pourcentages de cette seconde zone se rapportent à des comptages très faibles (<20) malgré une grande quantité de sédiment traité (environ 32 cm<sup>3</sup> par échantillon).

#### 4.2. Interprétation : état de référence des communautés chironomidiennes, trajectoire récente et facteurs de perturbations

Au lac d'Allos, les assemblages fossiles fournissent une image pertinente des communautés chironomidiennes de la zone profonde. Un état dit « de référence » pour cette communauté est défini aisément d'après le diagramme stratigraphique des pourcentages et la courbe d'influx total ; il correspond à la biozone AL-CZ-2 et est caractérisé principalement par la présence effective de *M. radialis-type* accompagné de *Paracladius* et de *Protanypus* dans la zone profonde du lac. Le développement dans la zone profonde de ces taxa sensibles à la contrainte oxygène indique l'existence de conditions d'oxygénation hypolimnétique favorables. Comme le montrent l'analyse de cluster et la Chord distance, la disparition brutale de cette communauté chironomidienne de la zone profonde vers 1920 suggère une dégradation rapide et importante des conditions d'oxygénation hypolimnétiques qui deviennent alors trop contraignantes. Ces conditions défavorables perdurent jusqu'à nos jours voir même s'accroissent comme le suggèrent les valeurs extrêmement basses de l'influx ainsi que l'augmentation de la Chord distance dans l'échantillon le plus récent. La couche anoxique remonte probablement et gagne des profondeurs plus faibles. Une accumulation organique sédimentaire semble être le facteur le plus probable pour expliquer cette dégradation brutale et continue des conditions d'oxygénation de la zone profonde d'Allos. La courbe du COT montre en effet une augmentation rapide de la MO dans le sédiment à partir de 1920. Ces interprétations du signal fossile confirme la perception de l'état fonctionnel à travers l'IBL et notamment le Df faible qui montre que la perte de taxons entre -2m et la zone profonde (Df) est peu conforme à la perte prédite par le modèle de régression faunistique.

## **II. Le zooplancton du Lac du Lauzanier**

La diversité spécifique des cladocères est faible, ce qui est assez typique pour un lac d'altitude, > 2000 m. Les cladocères sont dominés par les espèces littorales/benthiques, ce qui est cohérent avec un lac relativement clair et peu profond, avec peu d'eau 'libre'. Les différences temporelles se font donc essentiellement en terme d'abondance totale des cladocères et de ratio espèces planctoniques(*Bosmina*)/littorales(les autres).

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

Les périodes où les abondances totales augmentent, sans qu'il n'y ait de *Bosmina* (Z5 et Z3 de 1925 à 1954, figure 38) suggèrent des périodes plus chaudes, sans particulièrement d'apports en nutriments. Cet effet climatique serait lié à une diminution de la durée de l'englacement du lac en hiver.

L'apparition de *Bosmina* à partir du début des années 50 (Z2 et Z1 figure 38) indique une augmentation de la zone d'eau libre et une productivité primaire accrue, qui fait notamment diminuer les zones littorales au profit de la zone pélagique. Ceci pourrait traduire une augmentation des apports en nutriments. Etant donné la forte baisse des apports détritiques, ces nutriments ne peuvent provenir de l'érosion des roches et sols du bassin versant. Les hypothèses apports d'azote atmosphérique et/ou activité pastorale sont alors privilégiées.

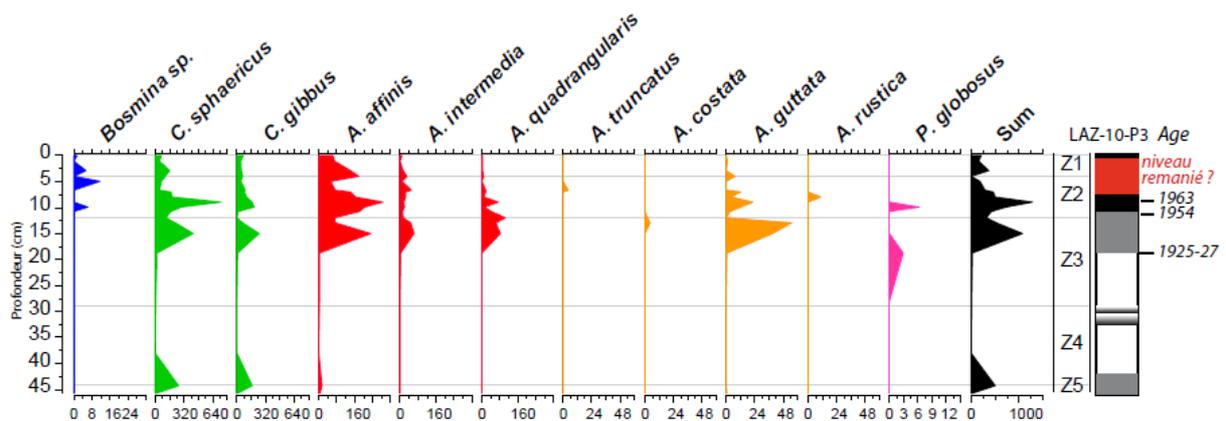


Figure 38. Assemblages fossiles de zooplancton du lac du Lauzanier (LAZ-10-P3).

## L'Approche de rétro-observation :

### Les PCB

### I. Le Lac d'Anterne

Avant 1950, les concentrations en PCB sont très faibles (<0.2 ng/g), ce qui confirme notre datation (figure 39). La période 1950-1980 correspond au pic de production des PCB. Elle est caractérisée par la présence majoritaire de PCB lourds (6 et 7 Cl), ce qui traduit un transport de courte/moyenne distance. Entre 1980 et 1997 (période d'interdiction d'utilisation des PCB dans les appareils), les PCB présents sont de types légers et lourds. Ce résultats est interprété comme des apports locaux et lointains (Motelay-Massei et al., 2004). A partir de 1997, on observe la présence majoritaire de PCBs légers (3Cl) ce qui suggère un transport longue distance (sources lointaines, Motelay-Massei et al., 2004). Ces apports sont liés à la revolatilisation à partir de sites contaminés.

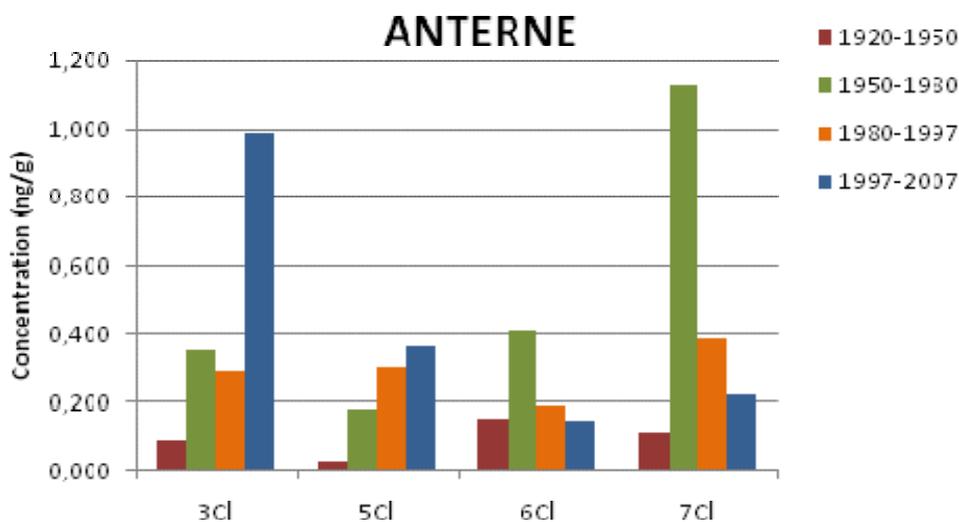


Figure 39. Concentration en PCB légers et lourds enregistrés dans les sédiments du Lac d'Anterne durant les différentes périodes de temps.

### II. Le Lac du Lauzanier

Avant 1950, les concentrations en PCB sont très faibles (<0.2 ng/g), ce qui confirme notre modèle d'âge (figure 40). La période 1980-1997 présente le pic maximal de concentration en PCB alors leur utilisation a été interdite. L'échantillonnage pour les analyses a été réalisé avant que la présence d'un événement instantané ait été mise en évidence. Cet échantillon ainsi que celui associé à la période 1950-80 contiennent un doublement de séquence sédimentaire et correspondent essentiellement à un mélange de sédiments plus anciens que les périodes définies au préalable. La somme des PCB durant ces deux périodes est dominée par les PCB légers, ce qui suggère surtout des apports de longue distance. Quelques apports de PCB lourds sont également enregistrés, dans une moindre mesure. Ils proviennent de sources plus locales. (Motelay-Massei et al., 2004). Les valeurs élevées de la période 1980-97 sont liées en partie au redoublement de séquence sédimentaire.

Entre 1997 et 2007, il n'y a plus de production de PCB, ce qui explique la très faible concentration dans les sédiments. Les PCB légers (3Cl) sont les PCB majoritaires de cette

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

période. Seul des sources très lointaines (revolatilisation à partir de sites contaminés) parviennent jusqu'au lac du Lauzanier (Motelay-Massei *et al.*, 2004).

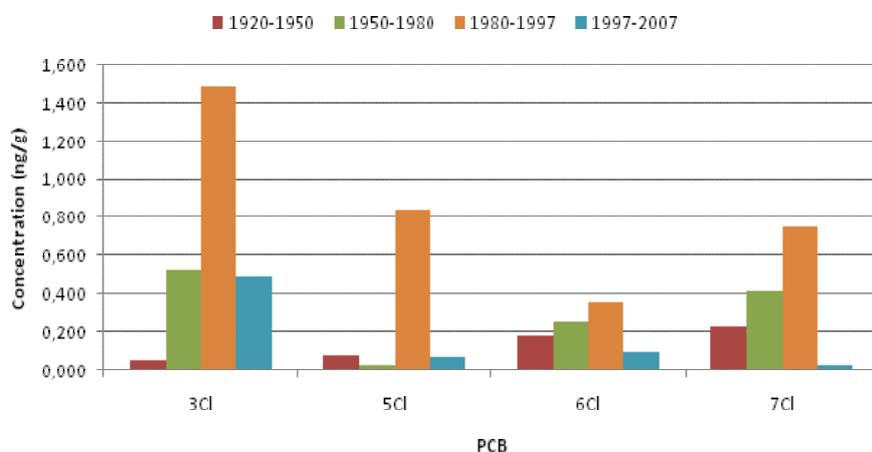


Figure 40. Concentration en PCB légers et lourds enregistrés dans les sédiments du Lac du Lauzanier durant les différentes périodes de temps.

### III. Le Lac d'Allos

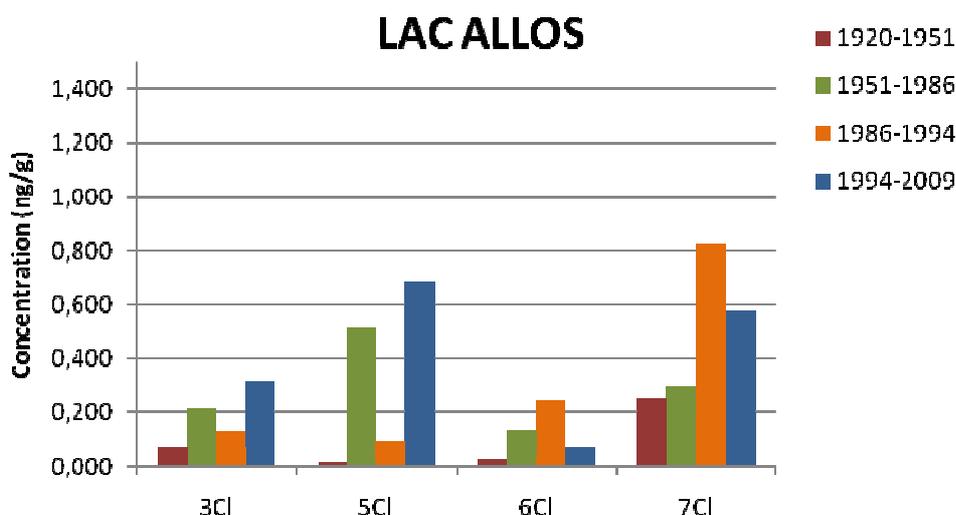


Figure 41. Concentration en PCB légers et lourds enregistrés dans les sédiments du Lac d'Allos durant les différentes périodes de temps.

Avant 1950, les concentrations en PCB sont très faibles (<0.2 ng/g), ce qui confirme une fois de plus notre modèle d'âge (figure 41). La période 1951-1986 qui correspond au pic de production des PCB, est caractérisée par la présence majoritaire de PCB légers (5 Cl), ce qui traduit un transport de longue distance. Entre 1986 et 1994 (période d'interdiction d'utilisation des PCB dans les appareils), les PCB présents sont de types lourds (7 Cl). Ce résultats est interprété comme des apports de courte distance donc locaux (Motelay-Massei

et al., 2004). A partir de 1997, on observe aussi la présence de PCB légers (5 Cl) que de lourds (7 Cl) ce qui suggère un transport de courte et longue distance (sources proches et lointaines, Motelay-Massei et al., 2004). Ces apports sont liés à la revolatilisation à partir de sites contaminés proches et lointains.

L'on peut noter que les concentrations sont plus élevées après la période de production et consommation des PCB (PCB lourds). Dans le cas du Lac d'Anterne les concentrations étaient environ aussi élevées pendant la phase de production et après, cependant durant la première phase il s'agissait de PCB lourds tandis que durant la seconde les PCB étaient surtout légers.

## Conclusion et perspectives

Les analyses d'IBL soulignent des dysfonctionnements trophiques plus ou moins importants dans les différents lacs (Anterne, Lauzanier et Allos). Ces résultats sont cohérents avec les études paléolimnologiques basées sur des analyses sédimentologiques, géochimiques et biotiques. Dans tous les lacs (La Thuile, Anterne, Lauzanier et Allos), les périodes de dégradation de l'état écologique sont marquées par :

- ❖ Une augmentation de la taille des particules, liée à la matière organique et dans certains cas à la présence de diatomées (sauf dans le cas d'Anterne)
- ❖ Une diminution de la densité sèche des sédiments et de la teneur en eau.
- ❖ L'augmentation de la matière organique (lacustre, lorsque celle-ci a été mesurée)
- ❖ L'augmentation du soufre marquant des conditions anoxiques
- ❖ Des changements d'assemblage de chironomes fossiles avec la perte des taxons sensibles aux conditions d'oxygénation
- ❖ Des changements d'assemblages zooplanctoniques

Sur les derniers 90 ans, le lac de La Thuile présente une dégradation de son état trophique depuis ~1970. Le niveau trophique augmente probablement dans les années 2000. Des analyses supplémentaires géochimiques minérales et organiques seront nécessaires afin d'affiner ces interprétations. L'origine de ces changements n'est pour l'instant pas déterminée.

Le Lac d'Anterne présente plusieurs fluctuations de son état écologique. La première en 1910 serait liée à l'introduction de poissons (Omble chevalier) dans le lac qui expliquerait la disparition totale de *Procladius* (chironome). Entre la fin des années 30 et 1980 les conditions d'oxygénation au fond du lac se dégradent. Ceci est marqué à la fois par les analyses géochimiques et de chironomes. Entre 90 et 2000, ces conditions se dégradent à nouveau et selon les analyses d'IBL le lac aujourd'hui présente un léger dysfonctionnement trophique liés à des apports excédentaires de nutriments et/ou de matière organique.

Sur les 200 dernières années, dans les deux lacs des Alpes du sud (Allos et Lauzanier) un changement d'état écologique est enregistré à partir du début des années 20. et serait attribué au réchauffement climatique. L'histoire de leur évolution trophique diverge ensuite : au Lauzanier, l'état écologique et même trophique se dégrade fortement à partir des années 50 et jusqu'à aujourd'hui, alors qu'à Allos une dégradation de l'état écologique semble avoir lieu entre ~1965 et 80 puis une nouvelle depuis ~les années 2000. Ces divergences d'histoires suggèrent des effets de pressions locales sur l'évolution écologique de ces deux lacs (pression pastorale, fréquentation et gestion des eaux usées du refuge à Allos, alevinage).

Au Lauzanier comme à Allos (Wilhelm com. pers.), une période d'enrichissement en matière organique a déjà été enregistrée par le passé. A Allos, cette période correspond à l'optimum médiéval, ce qui confirme un effet du climat sur l'état écologique de ces lacs d'altitude. L'analyse de macrorestes de végétaux terrestres au  $^{14}\text{C}$  permettra de dater la période au Lac du Lauzanier et ainsi de mieux comprendre l'origine des changements

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

---

observés. Ces deux périodes plus anciennes offrent également la possibilité d'étudier la résilience de ces systèmes.

Afin de mieux évaluer les effets de l'activité pastorale sur les systèmes lacustres, il serait nécessaire d'approfondir notre étude par l'analyse de marqueurs spécifiques tels que les champignons coprophiles, l'ADN de bactéries associées aux matières fécales des troupeaux ou aux troupeaux eux-mêmes, le coprostanol. Il faudrait également récolter les informations disponibles sur l'histoire de cette activité dans les différents sites, ainsi que celle de l'alevinage.

Des analyses de C, H, N et d'isotopes de l'azote seront réalisées au cours du deuxième volet du projet afin (i) d'évaluer la qualité de la matière organique dans les lac où ce type d'information n'a pas encore été déterminé et (ii) de tenter de déterminer l'origine de l'azote des sédiments (bassin versant, pollutions anthropiques atmosphérique).

Les analyses de zooplancton sur le Lac d'Allos sont en cours de traitement. Elles seront également réalisées sur le Lac d'Anterne, si suffisamment de restes sont bien préservés. Les diatomées seront aussi étudiées au cours du second volet du projet.

Les analyses de PCB sur le Lac de La Thuile et les autres lacs (le Pontet et Eychauda dans les Ecrins, Petit dans le Mercantour, et Blanc en Belledonne) seront réalisés lors du second volet du projet.

## Références bibliographiques

Arnaud F, Lignier V, Revel M, Desmet M, Beck C, Pourchet M et al. (2002) Flood and earthquake disturbance of <sup>210</sup>Pb geochronology (Lake Anterne, North French Alps). *Terra Nova* 14: 225–232.

Arnaud F, Revel-Rolland M, Bosch D, Winiarski T, Chapron E, Desmet M et al. (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.

Beck, C., 2009. "Late Quaternary lacustrine paleo-seismic archives in north-western Alps: Examples of earthquake-origin assessment of sedimentary disturbances". *Earth-Science Reviews* 96, 327–344.

Croudace IW, Rindby A and Rothwell G (2006) ITRAX: Description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner. In: Rothwell RG (ed.) *New Techniques in Sediment Core Analysis*. Geological Society of London Special Publication, 51–63.

Disnar JR, Guillet B, Keravis D, Di-Giovanni C and Sebag D (2003) Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: Scope and limitations. *Organic Geochemistry* 34: 327–343.

Giguet-Covex, C., Arnaud, F., Poulenard, J., Disnar, J-R., Delhon, C., Francus, P., David, F., Enters, D., Rey, P-J., Delannoy, J-J., 2011. Changes in erosion patterns during the Holocene in a currently treeless subalpine catchment inferred from lake sediment geochemistry (Lake Anterne, 2063 m a.s.l., NW French Alps): The role of climate and human activities. *The Holocene* 12, 651-665. DOI: 10.1177/0959683610391320

Hausmann S, Loter AF, van Leeuwen JFN, Ohlendorf C, Lemcke G, Grönlund E et al. (2002). Interactions of climate and land-use documented in the varved sediments of Seeburgsee in the Swiss Alps. *The Holocene* 12: 279–289.

Jacob J, Disnar J-R, Boussafir M, Sifeddine A, Turcq B and Albuquerque ALS (2004) Major environmental changes recorded by lacustrine sedimentary organic matter since the Last Glacial Maximum near the Equator (Lagoa do Caço, NE Brazil). *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 205: 183–197.

Jorda Maurice. La région du Lac d'Allos (Alpes-de-Haute-Provence). Carte géomorphologique 1/20 000e. In: Méditerranée, Deuxième série, Tome 26, 3-1976. pp. 49-62. doi 10.3406/medit.1976.1676

Koinig KA, Shotyk W, Lotter AF, Ohlendorf C and Sturm M (2003) 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake-the role of climate, vegetation, and land-use history. *Journal of Paleolimnology* 30: 307–320.

Lafargue E, Marquis F and Pillot D (1998) Rock-Eval 6 applications in Hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Revue de l'institut français du pétrole* 53: 422–437.

Meyers PA and Lallier-Vergès E (1999) Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *Journal of Paleolimnology* 21: 345–372.

Motelay-Massei et al., 2004

Noël H., Caractérisation et calibration des flux organiques sédimentaires dérivant du bassin versant et de la production aquatique (Annecy, Le Petit Lac). Rôles respectifs de l'Homme et du Climat sur l'évolution des flux organiques au cours des 6000 dernières années, Univ. d'Orléans (2001)

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

---

Talbot MR (2001) Nitrogen isotopes in paleolimnology. In: Last WM, Smol JP (eds) Tracking environmental change using Lake Sediments volume 2: physical and geochemical methods. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 401–439

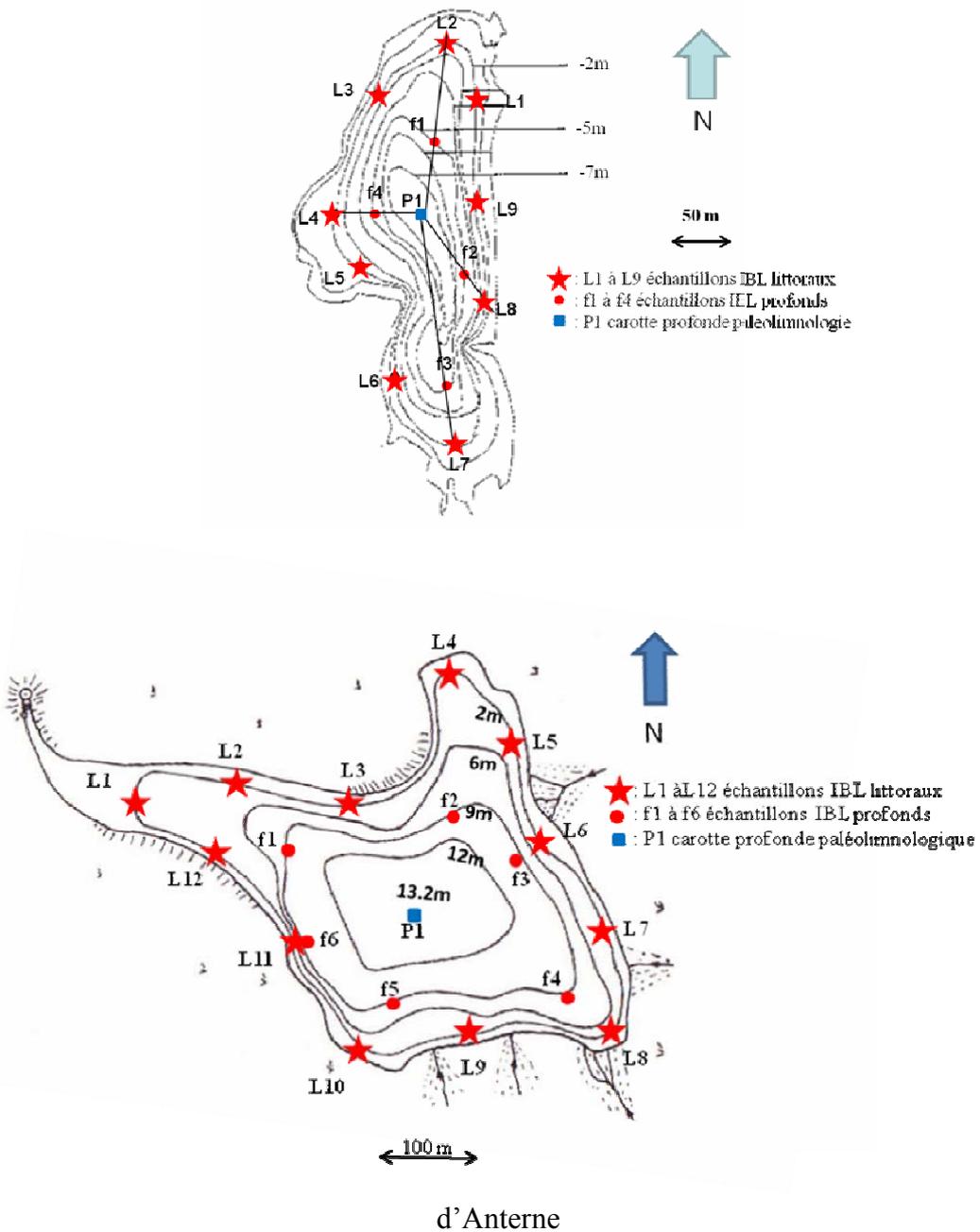


## ANNEXES

ANNEXE 1 : Localisation des points d'échantillonnage IBL et paléolimnologiques  
Lac de Lauzanier

# Z A B R

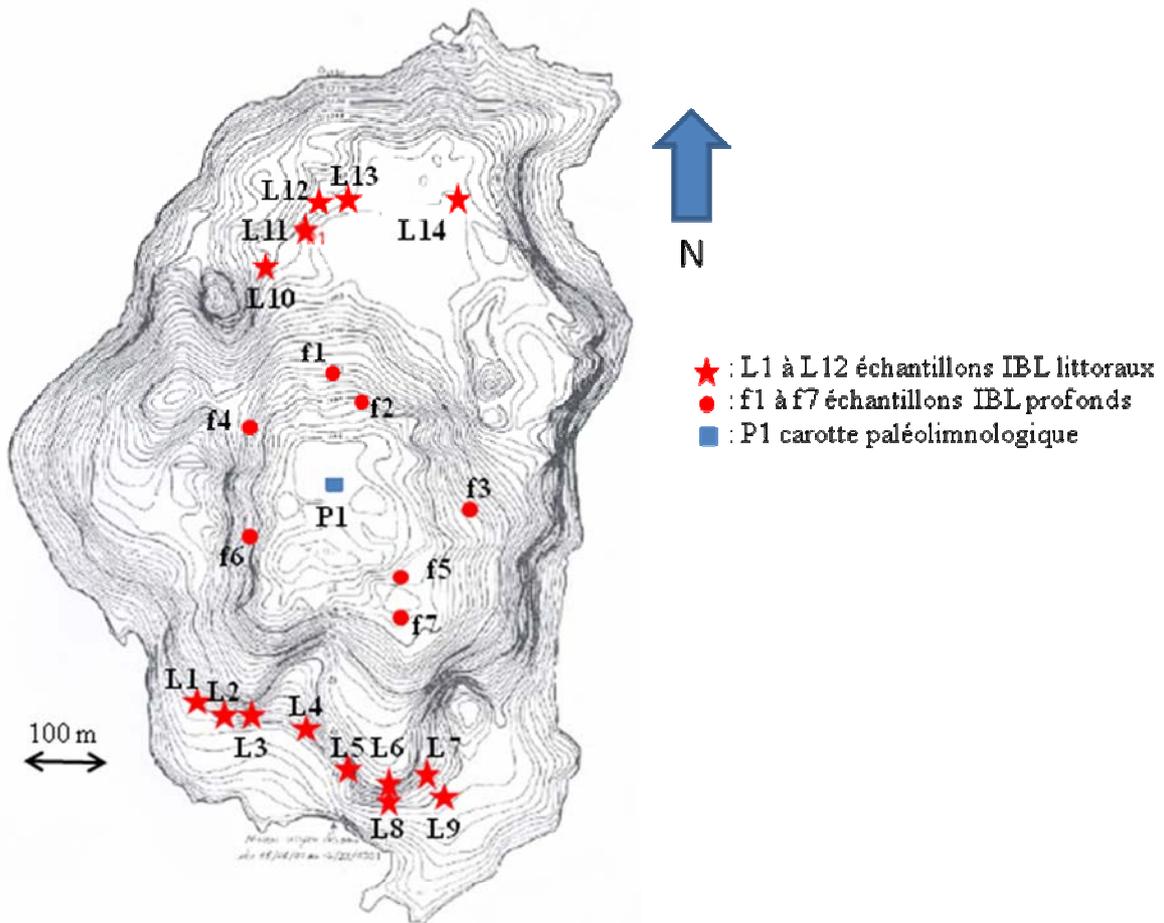
## Zone Atelier Bassin du Rhône



Lac

d'Anterne

Lac d'Allos (d'après GREBE, 2008)



### ANNEXE 2 : listes faunistiques IBL

Liste faunistique lac d'ANTERNE, IBL 2010

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

			Littoral		0,66 Zmax	Zmax	
			dl ind.m <sup>-2</sup>	occ (%)	df ind.m <sup>-2</sup>	dZmax ind.m <sup>-2</sup>	
<b>INSECTES</b>							
<b>DIPTERES</b>	<b>Ceratopogonidae</b>	<i>Ceratopogoninae</i>	8	30			
	<b>Chironomidae</b> Chironomini	indeterminés		18	60	24	
		<i>Chironomus</i>				44	
		<i>Dicrotendipes</i>		10	10		
		<i>Einfeldia</i>		16	10	704	780
		<i>Stictochironomus</i>				2432	60
	Tanytarsini	<i>Paratanytarsus</i>		8	20		
		<i>Tanytarsus</i>		6	30	32	
	Orthocladinae	<i>Chaetocladius</i>		12	40	4	
		<i>Corynoneura</i>		2	10		
		<i>Cricotopus</i>		16	40		
		<i>Heterotrissocladius</i>		4	20	220	
		<b>Paracladius</b>		1324	<b>90</b>	1768	40
		<i>Parakiefferiella</i>		94	10		
	Tanytopodinae	<i>Smitia</i>		2	10		
		<i>Krenopelopia</i>		10	40		
		<i>Procladius</i>				4	
Prodiamesinae	<i>Prodiamesa</i>		8	20			
<b>Limoniidae</b>	<i>Eriopterini</i>		2	10			
	<i>Pediciini</i>		4	10			
<b>HETEROPTERES</b>	<b>Notonectidae</b>	<i>Notonecta</i>			4	10	
<b>MOLLUSQUES</b>							
<b>BIVALVES</b>	<b>Sphaeriidae</b>	<i>Pisidium</i>	12	30	236	10	
<b>PLATHELMINTHES</b>							
<b>TRICLADES</b>	<b>Dugesiiidae</b>	<i>Dugesia</i>	2	10			
<b>ANNELIDES</b>							
<b>OLIGOCHETES</b>	<b>Autres que Tubificinae</b>	indeterminés	682	100	624	30	
	<b>Tubificinae</b>	à soies capillaires	4	10	424	30	
		sans soies capillaires	2	10			
<b>NEMATHELMINTHES</b>							
<b>NEMATODES</b>			48	60	84		
<b>HYDRACARIENS</b>							
		indéterminés	16	40			
			densité ind.m <sup>-2</sup>		<b>6604</b>	<b>960</b>	
			richesse taxonomique	<b>24</b>	<b>14</b>	<b>7</b>	

Liste faunistique lac de LAUZANIER, IBL 2010

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

		Littoral		0,66 Zmax	Zmax
		dl ind.m <sup>-2</sup>	occ (%)	df ind.m <sup>-2</sup>	dZmax ind.m <sup>-2</sup>
<b>INSECTES</b>					
DIPTERES	<b>Chironomidae</b> Chironomini	<i>Chironomus</i>	52	44,4	77
		<i>Einfeldia</i>	6	11,1	
		<i>Endochironomus</i>	11	11,1	
		<i>Glyptotendipes</i>			6
		<i>Phaenopsectra flavipes</i>	6	22,2	6
		<i>Tanytarsini</i>			
	Tanytarsini	<i>Cladotanytarsus</i>	13	33,3	
		<i>Micropsectra insignilobus</i>	29	33,3	
		<i>Paratanytarsus</i>	288	66,7	6
		<i>Tanytarsus lugens</i>	1686	88,9	1683
		<i>Tanytarsus pallidicornis</i>			6
		<i>Tanytarsini ind</i>	16	33,3	12
	Orthoclaadiinae	<i>Chaetocladus</i>	3	11,1	
		<i>Corynoneura artica type</i>	3	11,1	
		<i>Cricotopus</i>	549	77,8	12
		<b>Paracladius</b>	44	<b>55,6</b>	
		<i>Psectrocladius</i>	177	77,8	365
	Tanypodinae	<i>Procladius Holotanypus</i>	298	100,0	48
	Prodiamesinae	<i>Prodiamesa olivacea</i>	8	22,2	
	TRICHOPTERES	<b>Limnephilidae</b>	larvule indéterminée	3	11,1
<b>MOLLUSQUES</b>					
BIVALVES	<b>Sphaeriidae</b>	<i>Pisidium</i>	621	77,8	224
<b>ANLLIDES</b>					
OLIGOCHETES	<b>autres que Tubificinae</b>		824	55,6	
		<b>Tubificinae</b>			
		sans soies capillaires			
	avec soies capillaires	239	33,3	12	
<b>NEMATHELMINTHES</b>					
NEMATODES	<b>Indéterminé</b>		3	11,1	6
		densité ind. m <sup>-2</sup>	<b>4879</b>		<b>2463</b>
		richesse taxonomique	<b>20</b>		<b>11</b>
					<b>5,8</b>
					<b>1</b>

# Z A B R

## Zone Atelier Bassin du Rhône

