

**Utilisation de la paléolimnologie
pour la détermination d'un état de référence
(au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau)
dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse**

Sandrine BUISSON

Travail piloté par Daniel GERDEAUX à l'INRA
Thomas PELTE et Joseph RIVAS à l'Agence de l'Eau RMC

Octobre 2004



TABLE DES MATIERES

I- PRESENTATION DES DONNEES PALEOLIMNOLOGIQUES ET HISTORIQUES SUR 14 LACS DES ALPES ET DU JURA	4
INTRODUCTION.....	4
1- LACS DU JURA.....	6
1- <i>Lac de l'Abbaye</i>	6
2- <i>Lac d'Aiguebelette</i>	6
3- <i>Lac du Bourget</i>	8
a) Données de paléolimnologie	8
b) Données historiques.....	13
c) Quand placer l'état de référence pour le lac du Bourget ?.....	15
4- <i>Lac de Chalain</i>	15
5- <i>Lac de Nantua</i>	16
a) Données de paléolimnologie	16
b) Données historiques.....	21
c) Quand placer l'état de référence pour le lac de Nantua ?	22
6- <i>Lac de Remoray</i>	23
7- <i>Lac des Rousses</i>	24
8- <i>Lac de Saint-Point</i>	24
2- LACS DES ALPES	26
1- <i>Lac d'Annecy</i>	26
a) Données de paléolimnologie	26
b) Données historiques.....	32
c) Quand placer l'état de référence pour le lac d'Annecy ?.....	34
2- <i>Grand lac de Laffrey</i>	35
3- <i>Lac Léman</i>	36
a) Données de paléolimnologie	36
b) Données historiques.....	41
c) Quand placer l'état de référence pour le lac Léman ?	43
4- <i>Lac de Paladru</i>	43
a) Données de paléolimnologie	43
b) Données historiques.....	45
c) Quand placer l'état de référence pour le lac de Paladru ?	46
5- <i>Lac de Petichet</i>	46
6- <i>Lac de Pierre-Châtel</i>	46
CONCLUSION.....	47
NATURE DES DONNEES DE PALEOLIMNOLOGIE ET REFERENCES DES DOCUMENTS SOURCES	48
BIBLIOGRAPHIE DES DOCUMENTS DE PALEOLIMNOLOGIE ET RESUMES	49
BIBLIOGRAPHIE DES DOCUMENTS HISTORIQUES.....	60
Liste des documents scannes triée par nom de PDF	63
Liste des documents scannes triée par lac.....	65
II- CAHIER DES CHARGES POUR LA REALISATION D'UNE ETUDE DE PALEOLIMNOLOGIE SUR 14 LACS DES ALPES ET DU JURA	67
INTRODUCTION.....	67
1- CHOIX DES INDICATEURS.....	68
1- <i>Les indicateurs biologiques</i>	68
a) Les diatomées.....	68
b) Les cyanobactéries	68
2- <i>Les indicateurs chimiques</i>	69
a) Les nutriments.....	69
b) Les métaux	69

2- PRELEVEMENT ET CONSERVATION DES CAROTTES	69
1- Taille des carottes	69
a) Longueur	69
b) Diamètre.....	69
2- Lieu de carottage.....	70
3- Méthode.....	70
a) Nombre de carottes à prélever sur chaque lac	70
b) Découpage sur le lieu de prélèvement ou conservation des carottes entières	70
4- Choix d'un carottier	71
5- Archivage des carottes	71
3- DATATION.....	72
4- ANALYSES.....	72
1- Chimie	73
a) Prise en charge et préparation des échantillons.....	73
b) Nutriments et silice	73
c) Métaux.....	74
2- Biologie	74
a) Diatomées.....	74
b) Pigments de cyanobactéries	75
5- SYNTHÈSE / EXPLOITATION DES DONNÉES	75
CONCLUSION	76
RESSOURCES	77
1- Ouvrages de référence.....	77
2- Articles	77
3- Sites internet.....	77
LISTE DES FICHIERS FOURNIS SUR CD-ROM	79

I- PRESENTATION DES DONNEES PALEOLIMNOLOGIQUES ET HISTORIQUES SUR 14 LACS DES ALPES ET DU JURA

Introduction

La Directive Cadre 2000/60/CE du 23 octobre 2000 préconise l'atteinte du « bon état » des différents milieux aquatiques, dont les plans d'eau, d'ici 2015. Cet objectif de « bon état » est défini par rapport à un état écologique de référence. Il est nécessaire de préciser concrètement ce qu'est cet état de référence.

Par ailleurs, différentes études scientifiques ont été menées sur certains lacs du bassin RMC, et en particulier les grands lacs des Alpes et du Jura, pour reconstituer l'histoire des lacs notamment par des approches de paléolimnologie (carottage des sédiments, analyse des diatomées, des pollens, de la matière organique, des pigments...).

L'exploitation de ces données est l'objet de cette première partie.

Les lacs étudiés sont définis précisément : il s'agit des 14 « lacs de moyenne montagne calcaire profonds à zone littorale » dont la superficie est supérieure à 50 hectares. Ces lacs sont tous situés dans les Alpes et le Jura français.

La collecte des données de paléolimnologie s'est faite auprès des personnes qui travaillent sur ce thème dans leur laboratoire de recherche : Marc Desmet au Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines de l'université de Chambéry ; Michel Magny au Laboratoire de Chrono-Ecologie de l'université de Besançon ; Jean-Claude Druart à l'INRA de Thonon ; Jean-Luc Loizeau à l'Institut Forel à l'université de Genève. Ce sont les seuls laboratoires, en France et en Suisse, à avoir publié des données de paléolimnologie sur les lacs du bassin RMC.

Toutes les données utilisables dans une perspective de détermination d'un état de référence, sont reportées dans cette partie. Les documents d'origine (articles de revues scientifiques) sont fournis en annexe.

En parallèle avec la collecte des données paléolimnologiques s'est faite celle des données historiques : sur chaque lac, dès la fin du 19^{ème} siècle, des naturalistes ont commencé à décrire les lacs et les événements qui les ont affectés. L'exploitation de ces données se révèle utile, notamment pour connaître les pressions subies par les lacs au cours de leur histoire récente. Les données paléolimnologiques et historiques se complètent donc de façon intéressante, et sont présentées ensemble dans cette première partie.

Notes concernant les données de paléolimnologie :

- Ces données, quand elles existent, sont présentées avec les données historiques pour chaque lac.
NB : les données de paléolimnologie ne concernent que 5 lacs sur les 14 étudiés.
- Une bibliographie des documents de paléolimnologie (essentiellement des articles) figure p.49. Elle est accompagnée de résumés.
- Les documents eux-mêmes figurent sur le CD dans le répertoire *PDF paléo et histo*.
- Dans la première partie, les données sont présentées sous la forme suivante :
 - o une liste des documents sources (se référer à la liste des documents scannés p.63)
 - o une reconstitution de l'histoire des pressions sur le lac
 - o une sélection des documents les plus significatifs choisis dans les sources citées en premier.

Notes concernant les données historiques :

- Une bibliographie des documents historiques figure p.60. Les références y sont présentées par ordre alphabétique d'auteur, et désignées par un numéro de référence entre crochets (exemple : [16])
 - Des extraits de quelques-uns de ces documents ont été scannés et figurent sur le CD dans le répertoire *PDF paléo et histo*.
 - Les données historiques sont présentées par lac, **dans l'ordre chronologique** des documents sources.
 - Les documents sources sont désignés par leur référence, entre crochets.
 - Pour chaque document source, ne figurent que les informations en rapport avec le lac considéré :
 - o des données brutes, s'il y en a et si elles présentent un intérêt pour la détermination de l'état de référence (données chimiques par exemple, comme la quantité d'oxygène dissous dans le lac, le pH, le phosphore, l'azote).
Les données de ce type sont précédées d'un losange noir ◆.
NB : quand cela est possible, les unités sont celles utilisées actuellement, mais ce n'est pas toujours le cas. De même, la nature des éléments dosés est mentionnée avec autant de précision que possible, mais l'information n'est pas toujours donnée dans le document source (exemple : on peut avoir un « dosage de phosphore » sans savoir de quel composé chimique il s'agit exactement). Par ailleurs, les méthodes utilisées peuvent être moins précises que les méthodes actuelles. Ainsi, des « traces de chlore » peuvent correspondre à une quantité que l'on considérerait aujourd'hui comme non négligeable.
 - o la nature des informations disponibles sur le lac considéré, mais sans les données brutes, si elles sont incomplètes ou ne présentent pas d'intérêt évident (par exemple « Liste de diatomées sans les quantités » ou encore « Température, transparence »). Ces informations sont tout de même mentionnées dans le but d'avoir une vue d'ensemble des données historiques disponibles sur chaque lac, avec la possibilité de s'y référer en cas de besoin.
 - o des informations non quantitatives, des appréciations personnelles de l'auteur, ou encore des éléments ponctuels ou historiques, parfois difficiles à vérifier car ne s'appuyant pas sur des données précises, mais pouvant présenter un intérêt pour la reconstitution de l'histoire récente du lac. Exemples : « Lac eutrophe », « Phytoplancton plutôt pauvre », « déversement des égouts dans le lac »...
- NB : toutes les informations figurant dans les « données historiques » sont retranscrites telles quelles, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'interprétation autre que celle de l'auteur du document source. Ainsi, un lac peut être dit « eutrophe » sans qu'aucune donnée ne vienne confirmer cette affirmation, ou même alors que certaines données la contredisent. Toutefois, dans le résumé figurant à la fin des données historiques pour chaque lac, seules les grandes lignes et les éléments les plus cohérents et dignes de foi sont rappelés.

1- Lacs du Jura

1- Lac de l'Abbaye

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac de l'Abbaye.

Données historiques

[14] 1892

Résidu sec, couleur, transparence.

[15] 1898

Chimie : résidu sec.

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie des zones de végétation.

[48] 1907

Liste de diatomées (sans les quantités). **La liste figure dans le document scanné 56.pdf.**

[19] 1914

Liste de cladocères.

[51] 1916

♦ Liste de plancton. *Asterionella* et *Melosira* notamment sont dominantes. Présence de *O. rubescens*, *F. crotonensis*, *T. fenestrata*, *Pediastrum*.

[50] 1919 Espèces de cladocères.

Résumé des données historiques utiles :

Ces éléments sont insuffisants pour mettre en évidence une évolution de l'état trophique du lac au cours du temps.

2- Lac d'Aiguebelette

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac d'Aiguebelette.

Données historiques

[7] 1896

Poissons : brochet, brème, gardon, perche, lavaret. Pêche surveillée « intelligemment ».

[9] 1898

Couleur, température.

♦ O₂ dissous en surface : 8,52 mg/L.

♦ Biologie : diatomées : *Asterionella*, *F. crotonensis*, *Dinobryon* (en hiver).

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, SO₃.

- ◆ Cl : 0,5 mg/L max. (août 1891)

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie des zones de végétation.

[48] 1907

Liste de diatomées sans les quantités. **La liste figure dans le document scanné 56.pdf.**

[36] 1913

L'installation de l'usine de la Bridoire vers 1912 (date exacte ?) entraîne des variations du niveau du lac plus importantes qu'avant.

[33] 1924

Lavaret introduit dans le lac (date ?).

[53] 1939

Liste de poissons.

Lac eutrophe, au moins en certains points.

La faible teneur en oxygène au fond du lac explique que l'omble-chevalier qui y a été introduit ne se soit pas développé. L'anguille était présente dans le lac mais a disparu suite à la construction du barrage de la Bridoire.

[29] 1943

- ◆ Au fond : oxygène : 0,07 mg/L, juillet 1937 ; azote nitreux : 7 µg/L, août 1936 ; phosphore : 20 µg/L, septembre 1937.

Lac eutrophe.

[30] 1947

Chimie : CO₂, CaO, silice, P et Fe au fond. Température, transparence.

- ◆ pH : de 7,5 (à 70 m, près du fond) à 8,25 (en surface) (mai 1936).
- ◆ O₂ : en surface on observe une sursaturation au printemps et en été (jusqu'à 118 % en juillet 1937), jusqu'à plus de 10 m de profondeur. On observe également une désoxygénation importante au fond du lac (entre 35 % et 70 % suivant les périodes, en 1936 et 1937) qui devient presque totale pendant l'été 1937 (1 % en juillet).
- ◆ Phosphore : une seule mesure en septembre 1937 donne des valeurs comprises entre 2 et 7 µg/L suivant la profondeur, avec un pic de 10 à 12,5 µg/L (à 10-20 m) et un autre de 20 µg/L (au fond, à 69,5 m).
- ◆ Azote nitrique :
 - en mai 1936, quelle que soit la profondeur : N₂O₅ : autour de 0,4 mg/L ; N₂ : autour de 1 mg/L.
 - en septembre 1937 : N₂O₅ : autour de 0,4 mg/L ; traces à la surface ; 0,1 mg/L au fond (69,50 m).
 - N₂ : autour de 0,1 mg/L ; traces à la surface ; 0,03 mg/L au fond.

Lac eutrophe, utilisé comme bassin d'alimentation d'une usine électrique (variations importantes du niveau de l'eau). Développement important des villes et du tourisme, contribuant à l'eutrophisation. Eaux profondes presque dépourvues d'oxygène dissous.

Biologie : liste d'espèces de plancton. Diatomées : *Asterionella formosa*.

Liste de poissons. Les variations du niveau du lac dues à l'usine de la Bridoire ont beaucoup affecté le développement de certaines espèces : l'anguille (disparue) le brochet, l'ablette, le goujon. Régression du lavaret et de la lotte (eutrophisation). Perche en expansion.

[1] 1958 Couleur, transparence, température.

Lac légèrement eutrophe.

Eaux pauvres en oxygène, riches en CO₂, en P, en N. Roselières développées. Phytoplancton abondant.

Poissons : l'omble-chevalier, souvent introduit, ne s'est pas développé. Le lavaret, introduit en 1860, s'est adapté. La truite vit facilement dans le lac. Il n'y a pas de pêcheurs professionnels.

Le lac présente des caractères intermédiaires entre un lac eutrophe et un lac oligotrophe.

Résumé des données historiques utiles :

L'eutrophie est signalée dès la fin des années 30. Mais on ne sait pas si le lac était déjà eutrophe avant cette époque ou non, et donc si l'eutrophie est naturelle ou d'origine anthropique.

3- Lac du Bourget

a) Données de paléolimnologie

- Sources

38.pdf, 39.pdf, 40.pdf, 47.pdf

- Historique de l'impact humain sur le lac

- Epoque romaine : déforestation pour construire des structures pour la pêche et la navigation, et pour développer l'agriculture.

- Déforestation pendant le Moyen-Age.

Crues historiques et aménagements majeurs

- Entre 1480 et 1902 : 60 crues importantes. Influence de l'intense déforestation puis des aménagements humains sur les cours d'eau (digues, ponts...)

- Leysse : premières digues en 1862

Aujourd'hui : des aménagements tout le long de la Leysse

1948-1953 : travaux de correction et de détournement de 30° vers l'est de l'embouchure de la Leysse. Renforcement entre 1964 et 1972.

Résultat : changement de la zone d'influence de la rivière dans le lac.

- Chautagne : premières digues en 1760.

- Principale crue du lac au 20^{ème} siècle : 1944. Elle correspond au début du faciès à rythmites.

A cette époque, le développement industriel et agricole est déjà important dans la région. Les eaux usées sont déversées dans le lac.

1942 : premiers indices d'eutrophisation du lac. Le maximum est atteint dans les années 80, avant le détournement des eaux usées vers le Rhône et la mise en place de stations d'épuration.

Contamination au plomb

- Elle existe au moins depuis le Moyen-Age.

- On n'observe pas d'augmentation significative au moment de la révolution industrielle au début du 19^{ème} siècle.

- En revanche, on note une augmentation importante au début du 20^{ème} siècle (visible dans toute l'Europe).

- Pic de contamination dans les années 20 puis augmentation régulière jusqu'à la crise pétrolière de 1973-1974.

- A ce moment, baisse importante et rapide, suivie d'une ré-augmentation rapide.
- Puis on note une baisse stable seulement à partir de 1985, quand apparaît la réglementation concernant l'essence plombée.
- Aujourd'hui le niveau de plomb reste assez élevé dans le lac du Bourget : il s'agit d'une contamination locale et régionale directe, et non plus d'une contamination atmosphérique globale. Mais on n'a pas retrouvé le niveau pré-industriel.

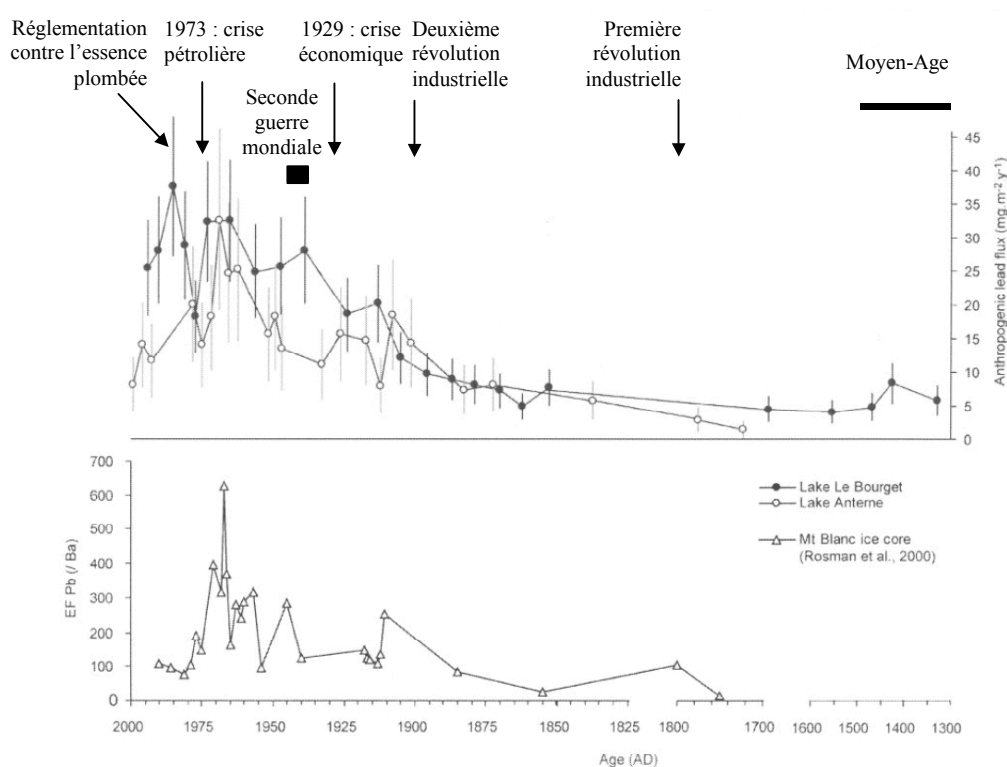
Origine du plomb :

- Jusqu'à 1960 : combustion du charbon
- De 1923 à 1991 : émission de plomb tétraéthyle (TEL) issu de l'essence plombée. Entre 1920 et 1930, début de la commercialisation de l'essence plombée aux Etats-Unis (1923) et en Europe (1931), puis forte augmentation de son utilisation jusqu'au début de la 2nde guerre mondiale. En 1945, toute l'essence vendue en Europe est plombée.

- Résultats

Il s'agit des données les plus significatives choisies parmi les résultats présentés dans les articles cités ci-dessus.

- Document 1 : plomb dans les sédiments depuis le Moyen-Age



Evolution des flux de plomb d'origine anthropique dans les lacs du Bourget (ronds noirs) et d'Anterne (ronds blancs) comparée au facteur d'enrichissement du plomb EF Pb (/Ba) enregistré dans une carotte de glace du Mont Blanc. Figurent aussi les dates des principaux événements et périodes industriels.

Source : Arnaud *et al.*, 2004 (40.pdf)

- Document 2 : matière organique depuis la fin du Moyen-Age

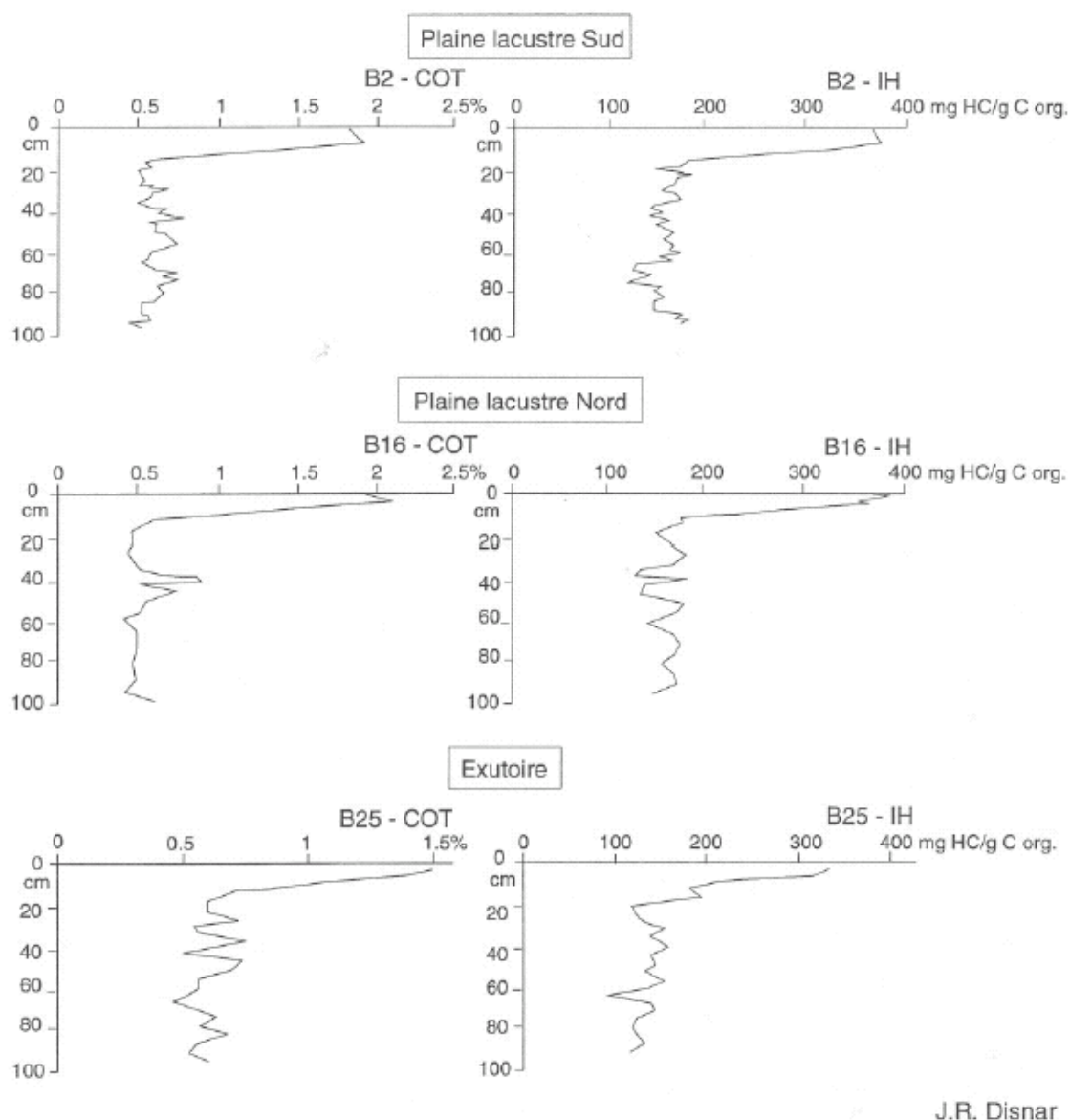


Fig. 106 - Evolution de la matière organique des sédiments du lac du Bourget. COT : carbone organique total en % de poids total de sédiments ; IH : indice d'hydrogène (mesures par pyrolyse Rock-Eval).

Pour la datation des sédiments, voir la figure suivante.

Source : Chapron, 1999 (47.pdf)

- Document 3 : datation des sédiments

Calcul de l'âge des horizons particuliers de la plaine lacustre

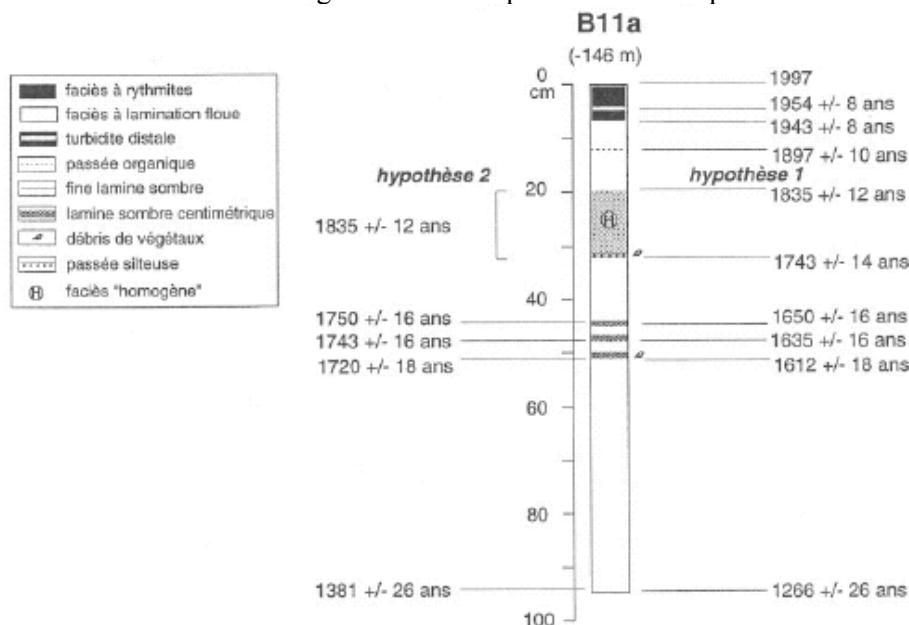


Fig. 111 – Datation des sédiments du lac du Bourget par le plomb-210. Le taux de sédimentation calculé par le plomb-210 est étalonné par les pics du Césium-137 de 1965 et de 1986. Le détail de la datation est présenté dans le texte. Deux hypothèses de calcul sont présentées pour la détermination de l'âge du faciès homogène et des niveaux de crues, dans la partie inférieure de la carotte. La signification de ces hypothèses est détaillée dans le texte.

Source : Chapron, 1999 (47.pdf)

- Document 4 : bilan des données climatiques depuis le Moyen-Age

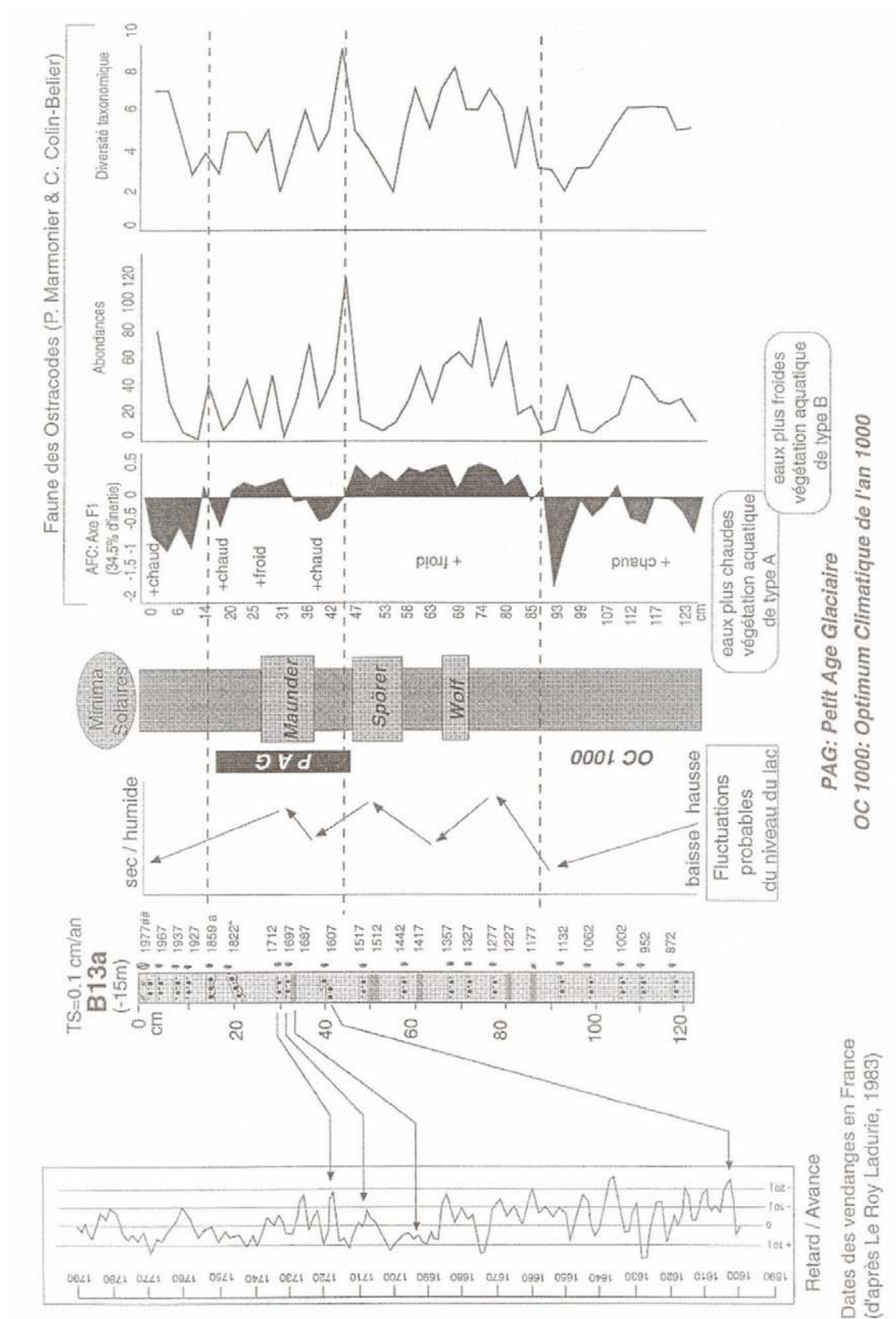


Fig. 116 – Enregistrements paléoclimatiques de la baie de Grésine.

Source : Chapron, 1999 (47.pdf)

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

b) Données historiques**[22] 1884**

Liste d'espèces

[14] 1892

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, H₂SO₄.

[9] 1898

Chimie : SiO₂, CaO, MgO.

Couleur, température.

- ◆ O₂ dissous : en surface : 9,57 mg/L ; à 25 m : 10,6 mg/L.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, SO₃, CO₂, Az₂O₅.

- ◆ Nitrates : HNO₃ : 1,48 mg/L, juin 1896.
- ◆ O₂ (août 1894) : 9,57 mg/L à la surface, 10,68 mg/L à 25 m et 9,95 mg/L à 130 m. Pas de désoxygénation au fond.
- ◆ Fe₂Al₂O₃ : 0,5 mg/L (mars 1894)
- ◆ Cl : 1,5 mg/L (mars 1894).

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie des zones de végétation.

[48] 1907

Liste de diatomées sans les quantités. **La liste figure dans le document scanné 56.pdf.**

[50] 1919

Espèce de cladocère.

[33] 1924

Omble introduit (date ?), corégones autochtones.

[44] 1937

Zooplancton.

[52] 1937

Lac oligotrophe.

- ◆ Liste d'espèces de zooplancton, phytoplancton. Principales diatomées : *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Tabellaria fenestrata*, *Synedra acus*.

[53] 1939

Liste de poissons.

Lac oligotrophe. Les corégones et l'omble-chevalier sont d'origine dans ce lac.

[29] 1943

- ◆ Présence de P dans les eaux du Sierroz (due aux rejets des abattoirs d'Aix-les-Bains) : 22 µg/L (mai 1937).
- ◆ Eaux profondes riches en oxygène dissous à toutes les époques de l'année : 9,1 mg/L à 105 m (septembre 1935).

Absence de fer et d'acide phosphorique dissous.

Lac nettement oligotrophe. Eaux peu polluées.

[30] 1947

Chimie : CO₂, alcalinité (CaCO₃), CaO, silice, P et Fe au fond.

Température, transparence.

- ◆ pH : en général il est compris entre 7,8 et 8. Minimum 7,7 en octobre et décembre 1933 ; maximum 8,2 en mai 1936.
- ◆ O₂ : on observe une sursaturation dans les dix premiers mètres (115 % à la surface en octobre 1935 et en août 1937). Il n'y a qu'une faible désoxygénation au fond.
- ◆ Azote nitrique : augmentation régulière de la surface vers le fond : de 0,4 à 0,6 ou 0,7 mgN₂O₅/L (décembre et août 1933) (0,1 à 0,16 ou 0,2 mgN₂/L). En mars 1934 on observe d'abord une diminution de 0,4 à 0,2 mgN₂O₅/L (0,1 à 0,05 mgN₂/L) puis une augmentation au fond (139,50 m) où la valeur d'azote atteint 0,5 mgN₂O₅/L (0,13 mgN₂/L). Ces valeurs sont semblables à celles du Grand Lac d'Annecy.
- ◆ Phosphore : aucune trace dans les eaux du lac.
- ◆ Une valeur de P (23 mg par tonne) dans le Sierroz en aval des abattoirs d'Aix-les-Bains.
- ◆ Biologie : liste d'espèces de plancton. Diatomées : *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa*, *Tabellaria fenestrata*.

Liste d'organismes de fond.

Liste de poissons. Poisson-chat introduit et devenu nuisible. Truite peu abondante. Omble-chevalier (indigène) en régression (pêche). Lavaret stable mais trop pêché. Perche en pleine expansion.

Lac « encore oligotrophe » grâce à la rive occidentale abrupte et donc inhabitée. Pas de P, peu de N, eaux riches en oxygène.

[6] 1953

Liste de phytoplancton avec la fréquence pour chaque espèce.

- ◆ *Asterionella formosa*, *Tabellaria fenestrata* et *Fragilaria crotonensis* sont présentes en grande quantité, ainsi que *Dinobryon sertularia*, *Ceratium hirundinella*. **La liste complète figure dans le document scanné 55.pdf.**

Lac oligotrophe, il y a toujours de l'oxygène dans les eaux profondes.

Le phytoplancton du lac est semblable à celui des lacs eutrophes voisins. *Peridinium volzii* présent dans tous les lacs eutrophes, est dominant dans le lac du Bourget : signe d'eutrophie ?

[1] 1958

Phytoplancton plutôt pauvre (peu d'espèces). En 1956 apparition d'*Oscillatoria rubescens*, signe d'eutrophisation. Avant cette date, elle n'était que sporadique.

Poissons : les salmonidés prédominent : corégone, omble, truite. Le lavaret est présent dans le lac au moins depuis le Moyen-Age.

Lac oligotrophe. Existence de pollutions récentes responsables d'une augmentation des nitrites et des phosphates, dans des zones localisées (débouché de la Leysse et rives habitées). Ailleurs dans le lac on trouve peu de sels chimiques et pas de matières organiques. Il y a beaucoup d'oxygène, peu de CO₂ et peu de P.

[35] 1966

En 1957, apparition de *Mougeotia* dans le lac ; cause inconnue.

[27] 1973

Températures.

[12] 1976

Lac très eutrophe.

[5]

[7]
[20]

Résumé des données historiques utiles :

Le lac est signalé comme étant oligotrophe jusqu'en 1958. Mais au cours des années 50 on observe l'apparition de signes caractéristiques de l'eutrophie. En 1976, le lac est « très eutrophe ». Le passage de l'état oligotrophe à l'état eutrophe se serait donc fait dans les années 60, et il est dû à l'urbanisation.

c) Quand placer l'état de référence pour le lac du Bourget ?

D'après les informations trouvées dans l'article 47.pdf, les premiers signes d'eutrophisation sont apparus en 1942.

Les données historiques signalent l'apparition de caractères d'eutrophie dans les années 50, et le passage de l'état oligotrophe à l'état eutrophe dans les années 60.

Ces données nous permettent de dire que l'état eutrophe n'est pas naturel dans le lac, qu'il est dû à l'urbanisation accrue de ses rives et de celles de ses affluents au cours du 20^{ème} siècle.

L'objectif d'oligotrophie, pour ce lac, est donc justifié.

En revanche, il est difficile d'identifier un état de référence, car il a pu exister des pollutions spécifiques (dues à des industries par exemple) dès la fin du 19^{ème} siècle. Ainsi le plomb apparaît en quantité inhabituelle à partir du début du 20^{ème} siècle.

4- Lac de Chalain

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac de Chalain.

Données historiques

[14] 1892

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, Cl (traces). Transparence, couleur.

[13] 1893

Diaptomus denticornis, *D. laciniatus*.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO.

♦ Cl : traces (avril 1892).

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie des zones de végétation.

[48] 1907

Liste de diatomées sans les quantités. **La liste figure dans le document scanné 56.pdf.**

[51] 1916

Liste de plancton.

- ◆ Parmi les espèces dominantes figurent *O. rubescens*, *Asterionella*, *Fragilaria*.

[34] 1937

Chimie :

- ◆ O₂ : Valeurs autour de 100 % à la surface (101 % en juin 1935). Vers 30 m (fond), les valeurs tournent autour de 80 %. Il n'y a donc pas de désoxygénation significative au fond du lac.
- ◆ pH : entre 7,7 et 8.

Flore : cartographie des zones de végétation (Magnin, 1904).

Faune : listes très sommaires, poissons.

Utilisation depuis 1904 de l'eau du lac pour l'industrie, provoquant de fortes variations de niveau (5 voire 10 m), à l'origine de la disparition d'une grande partie de la flore littorale et des poissons.

Résumé des données historiques utiles :

Il y a peu d'informations sur l'état trophique du lac au cours du temps (on sait seulement qu'en 1935 les eaux du fond étaient bien oxygénées), et aucune sur d'éventuelles pollutions d'origine anthropique.

5- Lac de Nantua

a) Données de paléolimnologie

- *Source*

30.pdf

- *Historique de l'impact humain sur le lac*

Variations de l'état trophique du lac de Nantua au cours des deux derniers siècles :

- Lac oligo-mésotrophe à l'origine.
- Augmentation du phosphore depuis ~1852 jusqu'à ~1912 puis baisse entre 1912 et 1933 (cause inconnue) puis nouvelle augmentation jusqu'en 1974 (date du détournement des égouts loin du lac).
- Passage à l'état eutrophe vers 1880.

Cause probable de l'eutrophisation : les activités industrielles au bord du lac ou sur le bassin versant :

- à partir de 1764 : usines textiles, filatures de soie, fabriques de coton et manufactures de laine
- à partir de 1808 : 20 tanneries
- à partir de 1810 : importantes industries du bois : papeteries, scieries

Les déchets sont rejetés directement dans le lac ou dans ses affluents.

La plupart de ces industries ont disparu dans les années 1950.

Hormis dans la concentration en P, on ne voit pas de signes de diminution de l'eutrophisation à la suite du détournement des égouts en 1974.

- *Résultats*

Il s'agit des données les plus représentatives choisies parmi les résultats présentés dans l'article cité ci-dessus.

- Divers paramètres sur les deux derniers siècles environ (notamment P, pigments, diatomées).
Source : Feuillade et al., 1995 (30.pdf)

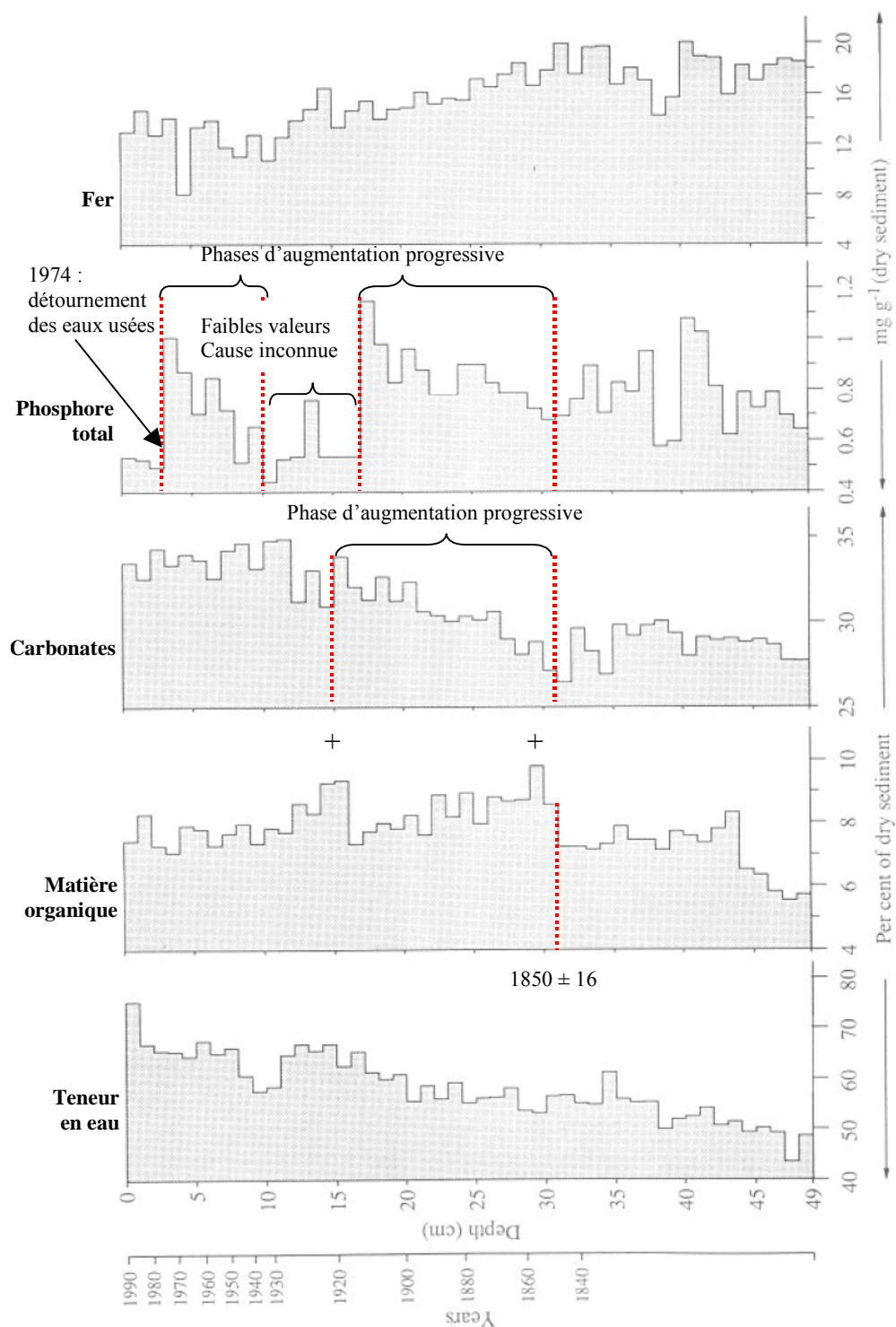


Fig. 3. Profils de teneur en eau, matière organique et carbonates totaux (exprimés en % de poids sec), phosphore total et fer (en mg.g⁻¹, poids sec). Voir la fig. 2 pour les erreurs dans l'échelle de temps.

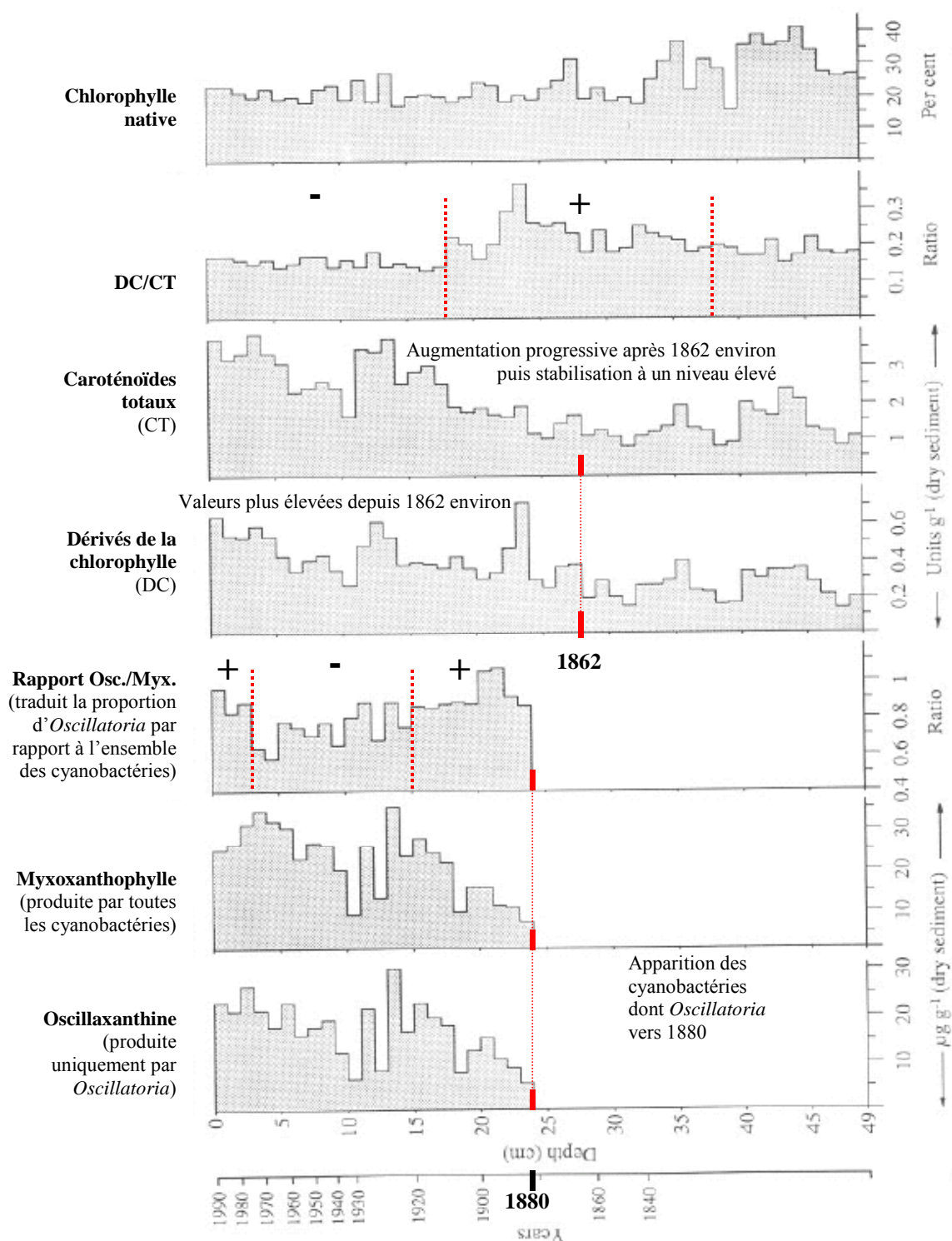


Fig. 5. Pigments dans une carotte du lac de Nantua. Oscillaxanthine, myxoxanthophylle et leur rapport, (DC) dérivés de la chlorophylle, (CT) caroténoïdes totaux et leur rapport, et pourcentage de chlorophylle native. Les concentrations de DC et CT sont données en unités arbitraires par gramme de poids sec de sédiment. Voir fig. 2 pour les erreurs dans l'échelle de temps.

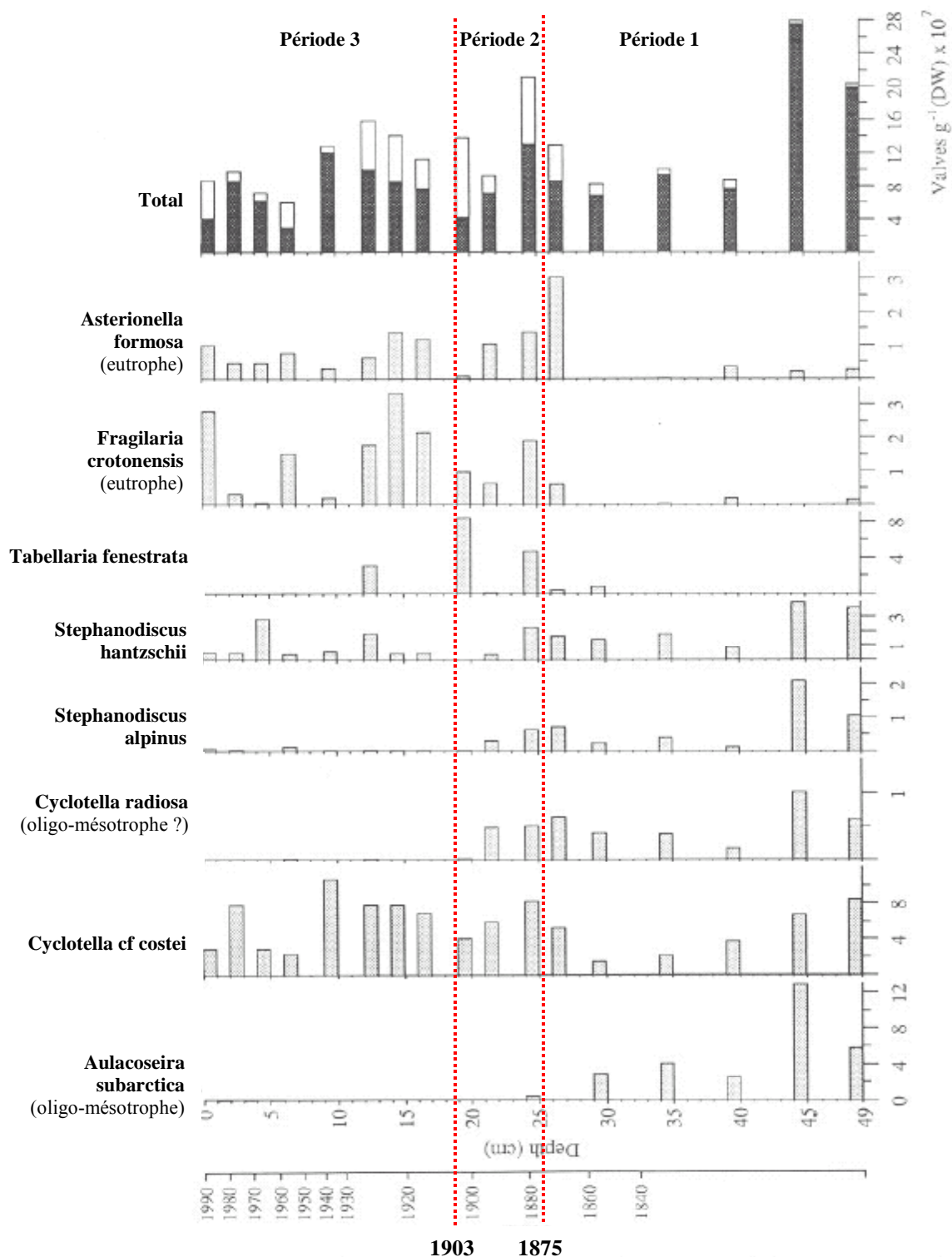


Fig. 6. Concentration des frustules de diatomées dans la carotte de sédiment. *Aulacoseira subarctica* (= *Melosira subarctica*), *Cyclotella* cf. *costei* et *radiosa*, *Stephanodiscus alpinus* et *hantzschii*, *Tabellaria fenestrata*, *Fragilaria crotonensis* et *Asterionella formosa* et le total : centriques (en gris foncé) et pennées (en blanc). Voir fig. 2 pour les erreurs dans l'échelle de temps.

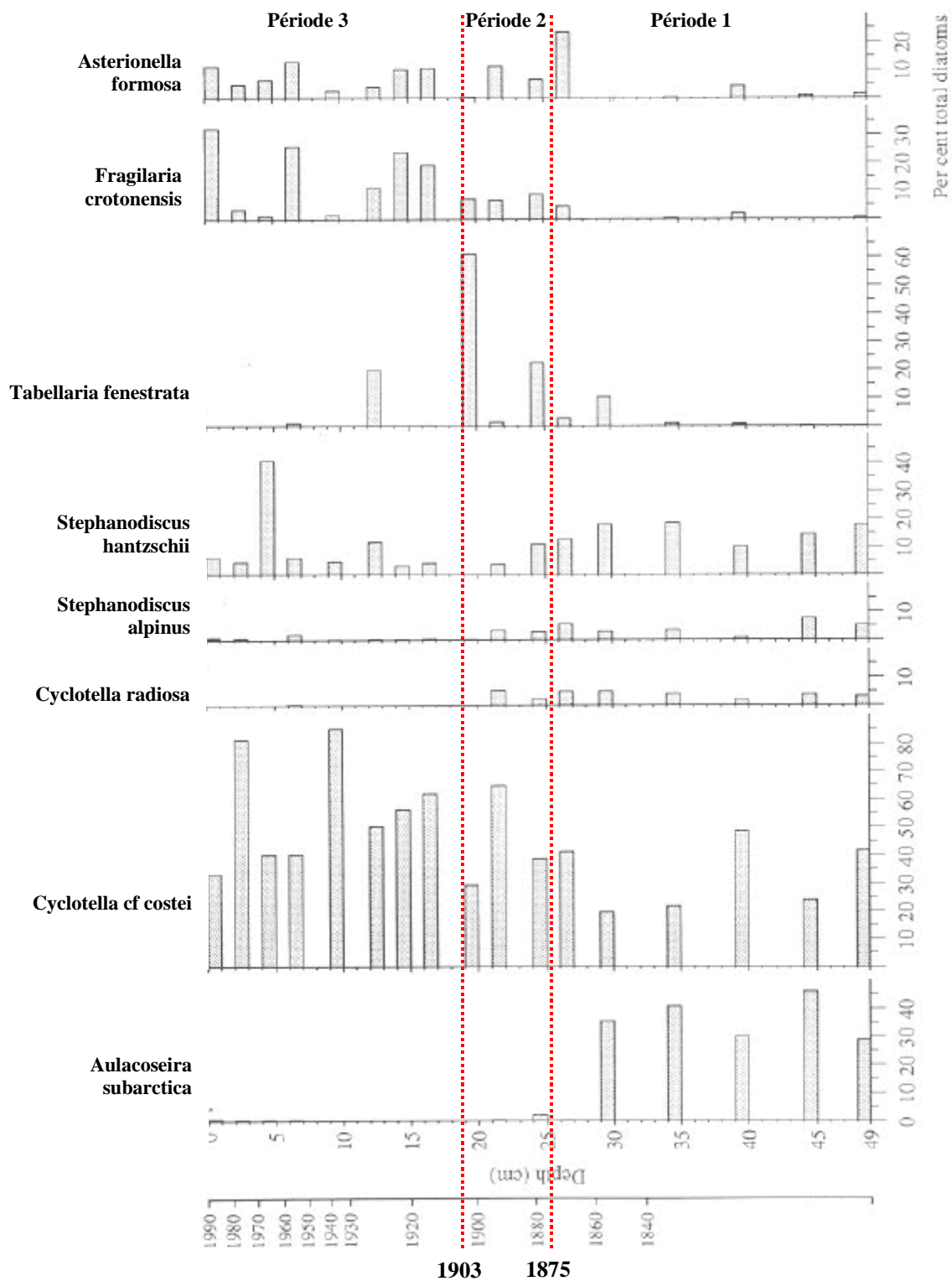


Fig. 7. Profils de l'abondance relative des espèces de diatomées, en % du nombre total. Voir la fig. 2 pour les erreurs dans l'échelle de temps.

b) Données historiques**[9] 1898**

Chimie : matière organique, couleur, température.

- ◆ O₂ dissous : en surface : 11,03 mg/L ; à 20 m : 8,40 mg/L.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, SO₃, CO₂.

- ◆ O₂ (août 1894) : 11,03 mg/L à la surface, 10,15 mg/L à 10 m, 8,40 mg/L à 20 m, 7,49 mg/L à 30 m et 2,56 mg/L à 40 m. On observe une désoxygénation au fond.
- ◆ Cl : traces (février 1892)
- ◆ Fe₂Al₂O₃ : 1,2 mg/L (octobre 1893) ; 0,5 mg/L (décembre 1893).

[24] 1903

Listes de poissons.

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie sommaire des zones de végétation.

[48] 1907

Liste de diatomées sans les quantités. **La liste figure dans le document scanné 56.pdf.**

[19] 1914

Liste de cladocères.

[26] 1923

Listes de plancton et de poissons.

- ◆ Plancton : les espèces les plus courantes sont *Oscillatoria rubescens*, *Asterionella gracillima*, *Tabellaria fenestrata*, *Diatoma elongatum*, *Ceratium hirundinella*, *Cyclops strenuus*, *Daphnia hyalina*.

Poisson : Introduction récente de l'ablette et de la tanche.

[10] 1925

- ◆ pH 7,4 à 7,5.
- ◆ Liste de plancton, notamment : *Botryococcus braunii*, *Dinobryon*, *Ceratium hirundinella*, *Cyclotella comta*, *Asterionella gracillima*, *Synedra longissima*, *Fragilaria crotonensis*, *Tabellaria fenestrata*, *Melosira*, *Pediastrum*.

[37] 1928

Quelques caractères chimiques (Delebecque).

- ◆ Oxygène : la valeur trouvée par Delebecque [15] à 40 m semble très faible à Léger, qui refait l'analyse et trouve une valeur plus élevée à la même profondeur. Les valeurs de Léger (8 cm³/L à la surface, 7 cm³/L à 20 m, 5 cm³/L à 40 m, juin 1925) sont plus fortes que celles de Delebecque (7,71 cm³/L à la surface, 5,87 cm³/L à 20 m, 1,79 cm³/L à 40 m, août 1894) mais indiquent tout de même une désoxygénation en profondeur.
- ◆ Liste d'espèces de plancton. Présence d'*Oscillatoria rubescens*. Diatomées : *Asterionella*, *Tabellaria*, *Diatoma*, *Synedra*.

Flore. Carte des zones de végétation. Faune.

Liste de poissons et description des espèces.

Lac eutrophe.

[29] 1943

- ◆ A 41,25 m : oxygène : 0,4 mg/L ; azote ammoniacal : 1,2 mg/L ; azote nitrique : 0.

Présence d'*Oscillatoria rubescens*.

Lac eutrophe. Très forte pollution des eaux due au voisinage de la ville.

[30] 1947

Chimie : CO₂. Température, transparence.

- ◆ pH : de 6,8 à 7,7 (septembre 1937).
- ◆ O₂ : forte sursaturation en surface (117,4 %) ; désoxygénation importante au fond (3,3 % à 41,25 m, 9 % à 35 m) (septembre 1937).
- ◆ Azote :
 - NH₃ : rien de la surface à 30 m, 0,5 mg/L à 35 m, 1,2 mg/L à 41,25 m (au fond).
 - Azote nitreux : traces au fond.
 - Azote nitrique : de 0 à 0,4 mgN₂O₅/L suivant la profondeur (0 à 0,1 mgN₂/L).

Lac eutrophe. Peu ou pas d'oxygène dissous en profondeur. Les égouts se déversent dans le lac sans épuration.

Biologie : liste de poissons.

[21] 1985

Début des travaux de traitement et de protection du lac en 1970 : 1) installation d'un réseau d'égouts reliés à une station d'épuration et 2) expérience d'oxygénation des eaux profondes.

Résultats : à partir de 1973, diminution importante de la teneur en P minéral soluble, entraînant une disparition des oscillaires des couches superficielles et leur développement dans les couches plus profondes. Le nombre global ne diminue pas. On a donc un enfoncement des oscillaires à partir de 1974.

Quelques renseignements sur l'histoire du lac : eaux anciennement très pures, polluées par les rejets des eaux usées des tanneries dans les affluents du lac. Cette pollution se traduit notamment dans la teneur élevée en métaux lourds dans les sédiments : 0,16 mg Hg, 3,6 mg Cd et 38 mg Pb par kg de sédiment sec. *O. rubescens* serait apparue à cette époque, et se serait maintenue suite à l'amélioration du niveau de vie des populations du bassin versant.

Résumé des données historiques utiles :

Dès 1923 le lac est signalé comme étant eutrophe. En 1894 déjà, des signes d'eutrophie sont observés (désoxygénation au fond). Le passage de l'état oligotrophe à l'état eutrophe (s'il a eu lieu) s'est donc produit antérieurement. Sur la base de ces seules informations, on ne peut conclure au caractère naturel ou anthropique de l'état eutrophe.

La baisse de la teneur en P induite par l'installation d'égouts autour du lac, va dans le sens d'une pollution due à l'homme ; cependant malgré cela le lac reste très eutrophe, et il est donc difficile de trancher cette question.

c) Quand placer l'état de référence pour le lac de Nantua ?

Les différentes données de paléolimnologie, notamment les pigments de cyanobactéries, indiquent un changement marqué de l'état trophique du lac de Nantua vers 1880 : on passe en quelques années d'un lac oligo-mésotrophe à un lac eutrophe. Ce changement est attribué à une augmentation de la quantité de nutriments dans l'eau du lac, due aux rejets des industries qui se sont installées sur les rives du lac et le bassin versant à partir de la fin du 18^{ème} siècle. Par la suite, l'état eutrophe a été maintenu du fait de l'amélioration des conditions de vie des habitants¹.

¹ *Caractérisation et essais de restauration d'un écosystème dégradé : le lac de Nantua*. INRA, 1985.

Cet ouvrage indique également des teneurs en métaux lourds dans les sédiments (sans indication de date), caractéristiques d'une pollution ancienne par les rejets des tanneries : 0,16 mg Hg, 3,6 mg Cd et 38 mg Pb par kg de sédiment sec.

Par la suite, les valeurs des différents paramètres restent caractéristiques d'un lac eutrophe, jusqu'en 1990, fin de la période étudiée.

Ces éléments incitent à placer l'état de référence du lac avant 1880. Dans ce cas, le retour à l'état de référence implique de faire disparaître totalement les cyanobactéries du lac.

Des tentatives de restauration ont déjà été faites, notamment en 1974 lorsque les eaux usées ont été détournées loin du lac.

Seul le profil de phosphore présente une modification suite à cette mesure. En effet, la quantité de phosphore dans le lac diminue significativement, contrairement aux autres indicateurs de l'eutrophisation, comme les cyanobactéries, qui restent présentes en grande quantité. D'autres données, historiques, indiquent que le seul changement observé pour ces dernières est un déplacement vers le fond du lac, où les cyanobactéries trouvent les nutriments qui leur font défaut ailleurs.

Si l'on prend en compte le profil de phosphore, le retour à un niveau caractéristique d'un lac oligotrophe est donc réalisé (niveau plus faible même qu'avant 1850, c'est-à-dire avant la période industrielle). Suivant ce critère, on peut donc considérer que le lac a d'ores et déjà retrouvé un bon état, et que l'état de référence est l'état actuel.

Les données historiques, dont les plus anciennes datent de 1898, ne couvrent pas le passage du lac à l'état eutrophe. On observe seulement qu'à toutes les occasions où une description de l'état trophique a été faite (la plus ancienne remonte à 1928), le lac a été décrit comme eutrophe, ce qui indique qu'un éventuel changement de l'état trophique n'a pu avoir lieu qu'avant cette date.

Les données paléolimnologiques et historiques permettent de suivre assez précisément l'évolution de l'état trophique du lac. En revanche, il n'existe pas de mesures de métaux lourds sur le lac de Nantua, qui auraient pu mettre en évidence des pollutions peut-être antérieures à l'eutrophisation.

Il est donc encore difficile de définir précisément sur un état de référence, même si on peut le situer vers 1850 du point de vue de l'état trophique.

6- Lac de Remoray

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac de Remoray.

Données historiques

[13] 1893

- ◆ *Diaptomus laciniatus*.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, SO₃.

- ◆ Cl : traces (octobre 1893).

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie des zones de végétation.

[51] 1916

- ◆ Liste de plancton. *O. rubescens* fait partie des espèces dominantes.

Résumé des données historiques utiles :

Il n'y a que très peu d'informations sur l'état trophique du lac. *O. rubescens* y est signalée en 1916, et c'est une espèce plutôt caractéristique de lacs eutrophes, quand elle est présente en grande quantité. Il n'y a aucune donnée concernant d'éventuelles pollutions par des métaux.

Ces éléments sont insuffisants pour identifier un état de référence pour le lac de Remoray.

7- Lac des Rousses

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac des Rousses.

Données historiques

[47] 1897

- ◆ *Merismopedia elegans*, *Fragilaria crotonensis*, *Cyclotella comta*, *Pediastrum boryanum* (dominant), *Cosmarium scenedesmus*, *Dinobryon divergens*, *Ceratium hirundinella*, *Peridinium tabulatum*.

[42] 1904

Liste de végétaux uniquement (pas de plancton). Cartographie des zones de végétation.

[48] 1907

Liste de diatomées sans les quantités. **La liste figure dans le document scanné 56.pdf.**

[19] 1914

Liste de cladocères.

[51] 1916

- ◆ Liste de plancton, notamment de diatomées (*Fragilaria* et *Asterionella* sont parmi les espèces dominantes). Présence d'*O. rubescens*, mais elle n'est pas signalée en quantité particulièrement importante.

[50] 1919 Espèces de cladocères.

Résumé des données historiques utiles :

Il y a très peu de données sur le lac des Rousses. Elles ne permettent pas de proposer un état de référence pour ce lac.

8- Lac de Saint-Point

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac de Saint-Point.

Données historiques

[13] 1893

- ◆ *Bythotrephes longimanus*, *Heterocope saliens*, *Diaptomus laciniatus*.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO.

- ◆ Fe₂Al₂O₃ : 0,7 mg/L (octobre 1893).
- ◆ Cl : traces (octobre 1893).

[42] 1904

Végétaux uniquement (pas de plancton)

[51] 1916

Liste de plancton. Forte ressemblance avec le lac de Remoray.

- ◆ Présence d'*O. rubescens*, de diatomées (*T. fenestrata*, *Asterionella*, *F. crotonensis*), de *Pediastrum*. Quantités inconnues.

[50] 1919

Espèces de cladocères, d'hydrachnides, de turbellariés.

[34] 1937

Chimie : reprise des valeurs de Delebecque.

- ◆ pH : de 7,6 à 8.
- ◆ O₂ : de 75 % (novembre 1933) à 91 % (août 1933) à la surface ; 21 % à 39,7 m (une seule mesure en février 1933) ; de 40 % (juin 1934) à 77 % (novembre 1933) à 39 m.
- ◆ Plancton : quelques espèces. Diatomées : *Asterionella*.

Plancton assez abondant.

Flore : cartographie des zones de végétation (Magnin, 1904).

Faune : quelques espèces. Poissons.

Construction et mise en service d'un barrage dès 1919. Variations du niveau de l'eau allant jusqu'à 3 m. Effets : éboulement des berges et disparition de certaines plantes.

[54] 1957

Aucun corégone dans le lac jusqu'en 1948, date de l'introduction de la palée et de son acclimatation.

Lac eutrophe.

[28] 1958

Peu d'oxygène au fond, ce qui peut compromettre les projets d'introduction d'omble-chevalier.

Introduction de palées en 1948 : bonne acclimatation.

Lac eutrophe.

Existence d'un barrage depuis 1922, cause d'une destruction partielle de la flore littorale, disparition du vairon, diminution du brochet et du gardon (Kreitmann, 1937).

Doubs non pollué et considéré comme inoffensif pour le lac du point de vue de l'eutrophisation par pollution.

Résumé des données historiques utiles :

On sait que le lac était eutrophe en 1957, mais il n'y a pas d'informations sur une éventuelle évolution de l'état trophique au cours du temps, ou pollution causée par les activités humaines.

Ces informations sont insuffisantes pour proposer un état de référence pour ce lac.

2- Lacs des Alpes

1- Lac d'Annecy

a) Données de paléolimnologie

- *Sources*

10.pdf, 32.pdf, 36.pdf, 49.pdf, 53.pdf

- *Historique de l'impact humain sur le lac*

BC : av. J.-C.

AD : ap. J.-C.

Vers 1200 BC : apparition des hommes sur les rives du lac.

160 BC - 300 AD : période romaine

Déforestation (limitée)

Pas d'agriculture intensive

Economie pastorale plutôt.

A partir de 200 AD : déclin de l'autorité romaine.

300 - 1000 AD : Haut Moyen-Age

Développement des cultures et de la déforestation mais pas d'agriculture intensive.

1000 - 1400 AD : Moyen-Age

[~900-1200 AD : petit optimum climatique médiéval]

Installation de monastères cistercien et bénédictin, expansion de la population.

Conséquences : très forte augmentation de l'agriculture (céréales et fourrages) et des pâturages, donc déforestation très importante.

Culture du noyer et du châtaignier.

Fin du Moyen-Age - milieu du 19^{ème} siècle

[Petit Age Glaciaire]

Dans un premier temps : réduction des activités agricoles, progression de la forêt, ralentissement de l'érosion du sol.

A partir du 17^{ème} siècle : développement d'activités proto-industrielles entraînant une déforestation importante dans les principales vallées fluviales.

Dans un second temps : déforestation très importante (maximale au 18^{ème} siècle ; à la fin du 18^{ème} et au début du 19^{ème}, il disparaît jusqu'à 10% de la forêt par an) et extension des cultures. Ces éléments conduisent à une accentuation de l'érosion.

Fin du 19^{ème} – 20^{ème} siècle

La forêt regagne du terrain et les sols se stabilisent.

Périodes de crues importantes dues à la construction de digues, à l'urbanisation et à l'agriculture intensive au 20^{ème} siècle.

L'eutrophisation du lac commence en 1940, puis augmente jusqu'en 1963 (lac méso-eutrophe) et se stabilise.

1975 : mise en place d'un collecteur des eaux usées domestiques tout autour du lac. Depuis, le lac est revenu à un état oligotrophe.

Il n'y a sur le lac qu'une station d'épuration qui se déverse en aval du lac.

- Résultats

Il s'agit des données les plus représentatives choisies parmi les résultats présentés dans les articles cités ci-dessus.

- Document 1 : divers paramètres sur les 2 derniers millénaires (pollen, propriétés magnétiques, K)

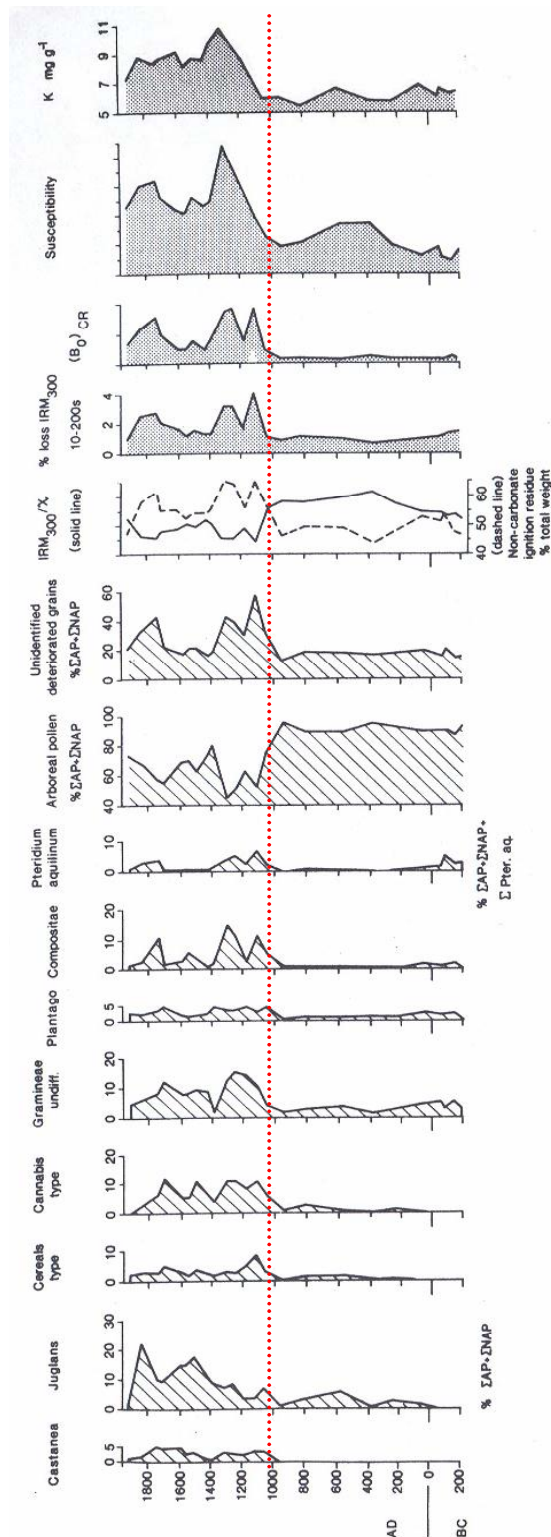


Figure 10 Carotte APL 6. Récapitulation des principaux éléments indiquant un changement environnemental récent dans le Petit Lac. Les données palynologiques, géochimiques et magnétiques sont indiquées en correspondance avec une datation approximative des sédiments en années BP.

Source : Higgitt *et al.*, 1991 (49.pdf)

- Document 2 : diatomées sur le dernier millénaire, et notamment les 100 dernières années

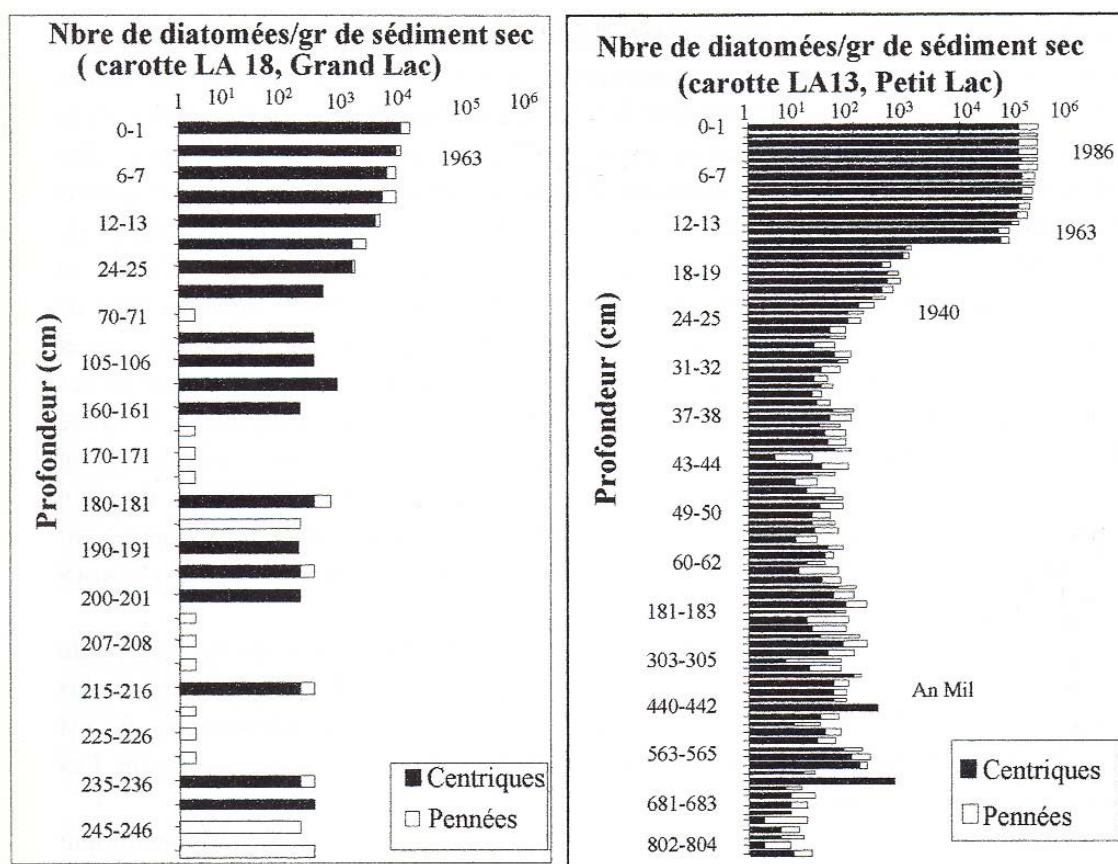


Fig. 2. Représentation des diatomées centriques et pennées (benthiques et planctoniques) dans les sondages LA 18 (à gauche) et LA 13 (à droite).

Source : Druart & Pelletier, 1998 (32.pdf)

Les principales espèces rencontrées, dans le Grand Lac comme dans le Petit Lac, sont les suivantes :

- diatomées centriques : *Cyclotella cyclopuncta*
- diatomées pennées : *Fragilaria crotonensis* et *Synedra acus* var. *angustissima*.

Dans les deux sondages, on constate une évolution progressive du développement des diatomées à partir de -25 cm (1940 environ) jusqu'en haut de la carotte, avec un pic vers -15 cm (1963).

On constate aussi une petite augmentation vers -3,5 m (période approximative de l'an Mil).

- Document 3 : diverses données sur les 200 dernières années (population, terres cultivées, forêt, charge sédimentaire, débit) dans le Petit Lac

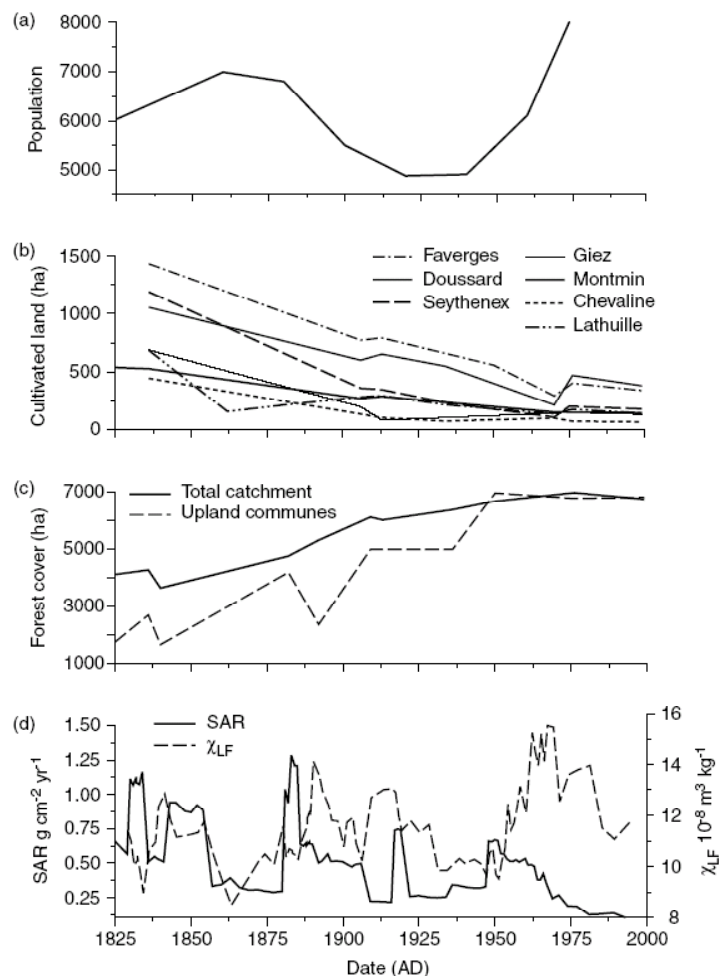
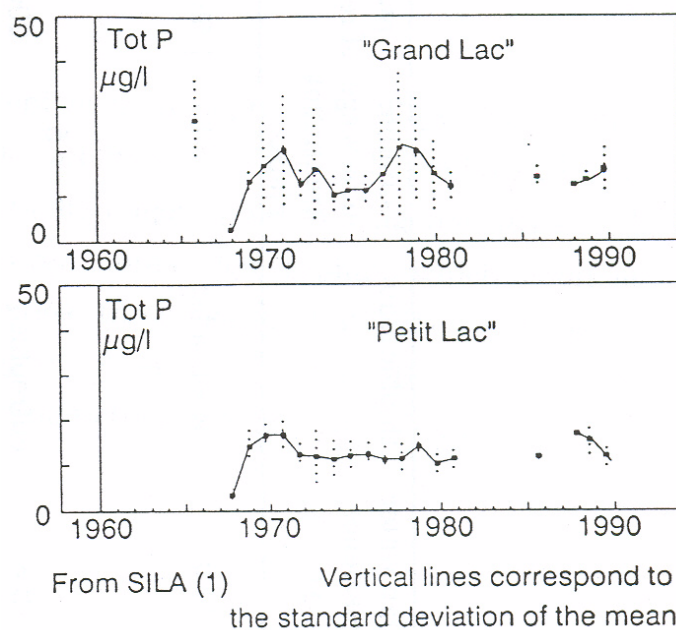


Figure 9. Enregistrements documentaires et données hydrologiques sur le bassin versant du Petit Lac, 1825-1999 : (a) population totale (jusqu'en 1975); (b) terres cultivées dans sept communes (voir Figure 1); (c) couvert forestier pour le bassin versant entier et les communes hautes; (d) débit (χ_{LF}) et charge sédimentaire (SAR) dans la carotte LA13

Source : Foster *et al.*, 2003 (36.pdf)

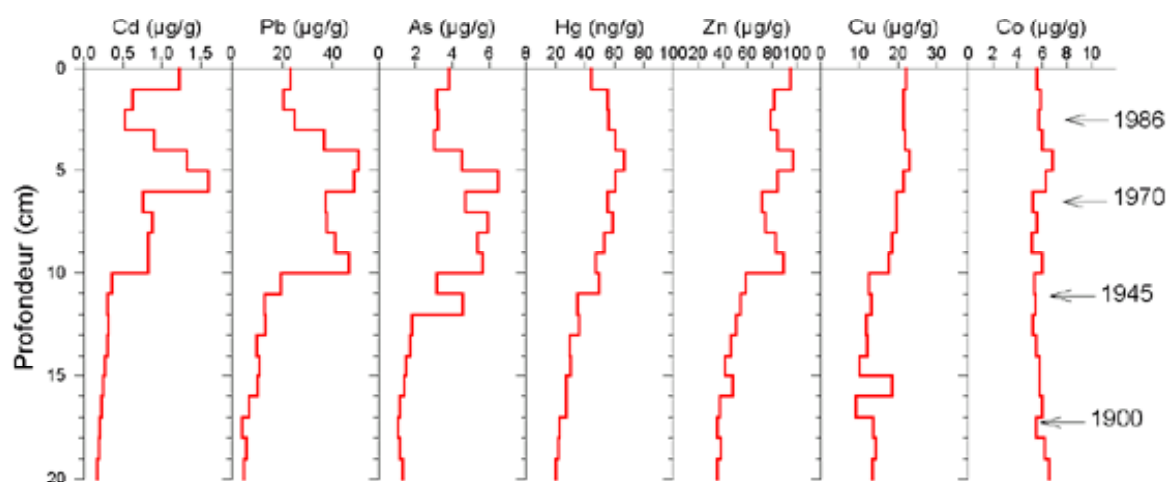
- Document 4 : phosphore dans l'eau du lac au cours des dernières décennies (données historiques)



Evolution temporelle des concentrations moyennes de phosphore total dans la colonne d'eau du lac d'Annecy

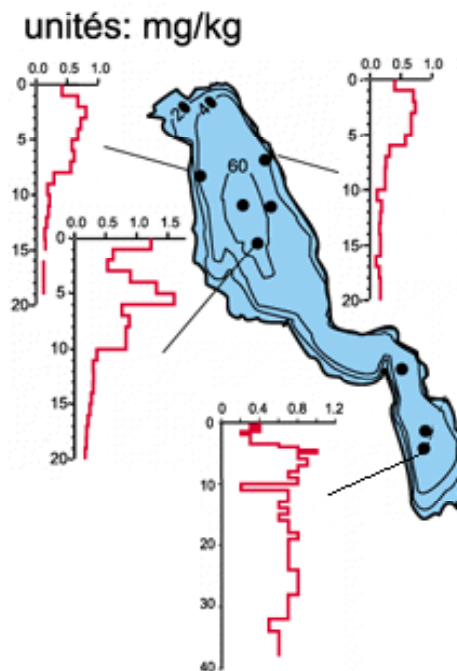
Source : Balvay *et al.*, 1993 (53.pdf)

- Document 5 : évolution temporelle des métaux au centre du grand lac (extrait du CD Climasilac)



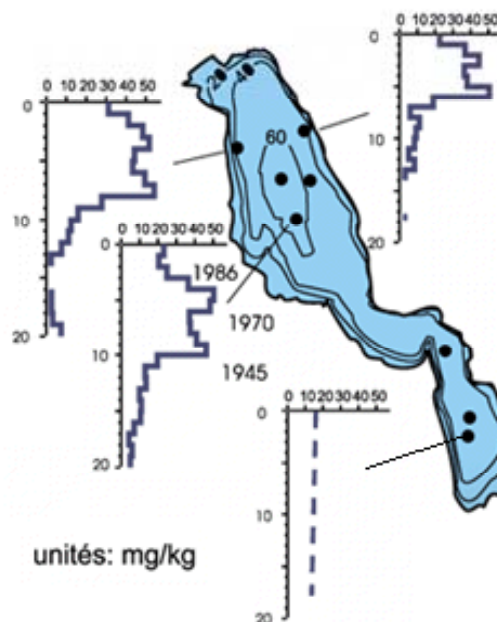
- Document 6 : évolution de la concentration en cadmium (extrait du CD Climasilac)

Les variations des teneurs en Cd suivent de près celles en Pb (sauf dans le Petit Lac), avec une augmentation après 1945 et une diminution dans les années 80. Par contre, contrairement aux teneurs en Pb et aux autres métaux lourds, les concentrations absolues sont élevées ($> 1,5$ mg/g). Les sources possibles sont les peintures, les teintures (textile), les batteries, la pétrochimie. De tous les métaux lourds, c'est certainement l'élément à surveiller de manière régulière.

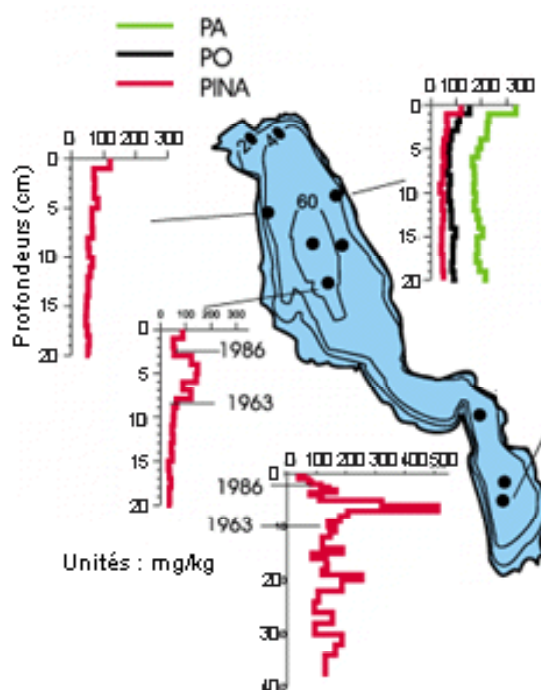


- Document 7 : évolution de la concentration en plomb (extrait du CD Climasilac)

Les concentrations en Pb montre dans les sédiments du Grand Lac des profils très semblables tant sur l'évolution temporelle qu'en valeurs absolues. Malgré un facteur de contamination d'au moins 10 (rapport entre les teneurs les plus élevées et les teneurs naturelles, représentées par les sédiments les plus anciens), il n'y a probablement pas de risque au niveau toxicité. La source de ce Pb est très probablement ponctuelle car il n'y a pas de Pb dans les sédiments du Petit Lac, et les variations de concentrations sont très rapides. Ce plomb provient probablement d'une source éloignée du lac, et transite par exemple par le Laudon, attaché sur particules fines, ce qui permet une répartition dans tout le Grand Lac.



- Document 8 : évolution de la teneur en phosphore (extrait du CD Climasilac)



b) Données historiques

[22] 1884

Liste d'espèces.

[38] 1892

Liste d'espèces (zooplancton et faune lacustre).

[16] 1894

Température, couleur, transparence.

Chimie : résidu sec, CO₂, SiO₂, CaCO₃, MgCO₃.

- ◆ Fe₂Al₂O₃ : traces (novembre 1890)
- ◆ H₂SO₄ : traces (novembre 1890)
- ◆ HNO₃ : traces (novembre 1890)
- ◆ Cl : 1 mg/L (novembre 1890)

[7] 1896

Température.

Liste sommaire de poissons. Suite à la diminution du nombre de poissons, tentatives de repeuplement à partir de 1886.

[9] 1898

Chimie : SiO₂, CaO, MgO. Couleur, température.

- ◆ O₂ dissous en surface : 11,05 mg/L.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, SO₃, Az₂O₅.

- ◆ Nitrates : HNO₃ : 0,74 mg/L (juin 1896)
- ◆ Cl : 1 mg/L (novembre 1890).

[39] 1899

Température, couleur, transparence.

Biologie : zones de végétation (pas de cartographie).

[40] 1907

- ◆ Phytoplancton : on trouve notamment *O. rubescens*, *Ceratium hirundinella*, *Dinobryon*, *Asterionella gracillima*, *Cyclotella comta*, *Tabellaria fenestrata*, *Synedra delicatissima*, *Botryococcus braunii*, *Pediastrum boryanum*, *Mougeotia gracillima*. Répartition suivant les saisons.

Listes d'espèces végétales et animales.

[41] 1907

- ◆ Phytoplancton : les espèces dominantes sont *Anaboena circinalis*, *Gomphosphoeria lacustris*, *Ceratium hirundinella*, *Dinobryon divergens*, *D. cylindricum*, *Asterionella gracillima*, *Fragilaria crotonensis*, *Cyclotella comta*, *Botryococcus braunii*, *Sphoerocystis schroeteri*, *Gloeocystis lacustris*.

Liste de zooplancton.

Liste de faune profonde.

Description des zones de végétation sur le pourtour du lac (pas de cartographie).

[44] 1937

Zooplancton.

[53] 1939

Liste de poissons. Les corégones et l'omble-chevalier ont été importés dans le lac. Le brochet a disparu du lac depuis un siècle.

Lac oligotrophe.

[29] 1943

- ◆ O₂ dissous : 0,6 mg/L (à 63,50 m ?).
- ◆ Phosphore au fond : 9,5 µg/L (P₂O₅ ?).

Le lac, depuis peu, n'est plus considéré comme oligotrophe.

[30] 1947

Chimie : CO₂, silice, CaO, résistivité. Température, transparence.

- ◆ pH : de 7,75 à 8,25 (mai 1937).
- ◆ O₂ : on observe une sursaturation de 0 à 10 m. En surface : 110 % en mai 1937, 105 % en octobre. A la fin de l'été on observe une désoxygénation presque totale du fond du lac : 4,2 % en octobre (contre 64 % en mai).
- ◆ Phosphore : de la surface à 30 m, les valeurs varient de 3 à 8 µgP₂O₅/L ; de 40 à 60 m, il n'y a pas de P₂O₅ ou seulement des traces ; au fond (63,50 m), la teneur en P₂O₅ atteint 9,5 µg/L (automne 1937).
- ◆ Azote :
 - NH₃ : uniquement au fond : 0,4 mg/L (octobre 1937).
 - N nitreux : uniquement au fond : traces (octobre 1937).
 - N nitrique : en mai 1937 : de 0,1 à 0,3 mgN₂O₅/L (0,03 à 0,08 mgN₂/L) ; en octobre : de 0 (au fond) à 0,8 mgN₂O₅/L (à 10 m) (0 à 0,2 mgN₂/L).

Les valeurs de pH, O₂, P et N présentées ci-dessus ont été trouvées dans le Grand Lac.

- ◆ O₂ dans le Petit Lac (août 1938) : 6,4 mg/L en surface ; baisse progressive de 8 à 5,2 mg/L entre 5 m et 50 m ; 2,9 mg/L au fond (54,50 m). On a donc une désoxygénation au fond.

Biologie : liste d'espèces de plancton. Liste de poissons. Omble-chevalier introduit en 1890, répandu mais en régression (pêche et pollution). Corégones du lac de Constance introduits en 1888. Truite bien développée (indigène). Brochet disparu au début du 19^{ème} siècle et réintroduit en 1934 avec succès. Dominantes : corégone, omble-chevalier, perche, gardon, lotte.

Lac « passant-eutrophe », état confirmé par l'étude biologique (présence d'*Oscillatoria* notamment). Eutrophisation due au développement du tourisme essentiellement.

Le Petit lac est eutrophe.

[6] 1953

- ◆ Liste de phytoplancton avec la fréquence pour chaque espèce. Les plus courantes sont *Dinobryon sertularia*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Ceratium hirundinella*. **La liste complète figure dans le document scanné 55.pdf.**

Anabaena flos aquae, espèce présente dans le lac, est signe d'eutrophie.

Lac devenu eutrophe sous l'influence humaine (cultures + eaux usées).

[18] 1954

Faune et zooplancton dans le Boubioz.

[49] 1954

Le lac devient eutrophe ; certaines espèces de poissons disparaissent à cause du manque d'oxygène au fond du lac.

Impact humain important : rejets d'eaux usées dans le lac (hôtels, tourisme).

[31] 1958

Le lac, oligotrophe jusqu'ici, peut à ce moment être considéré comme un lac eutrophe. Cette évolution est due à l'affluence touristique accrue sur les rives.

[35] 1966

Observation de l'écrevisse américaine en 1958. L'apparition de cette espèce est due au relâchement d'individus dans le lac par un restaurant en 1953.

Résumé des données historiques utiles :

Jusqu'en 1939, le lac d'Annecy est oligotrophe. Dans les années 40 et 50 des signes d'eutrophie apparaissent : le lac est « passant-eutrophe » (le Petit Lac est eutrophe). A partir de 1958 il est considéré comme eutrophe.

Suite à la mise en place en 1975 d'un collecteur d'eaux usées tout autour du lac, celui-ci redevient oligo-mésotrophe dans les années 80.

L'eutrophisation du lac d'Annecy est clairement due à l'urbanisation et à l'affluence touristique sur les rives du lac, responsables d'importants apports de nutriments.

c) Quand placer l'état de référence pour le lac d'Annecy ?

Les données de paléolimnologie mettent en évidence deux événements majeurs dans l'histoire du lac.

- Les enregistrements sédimentaires présentés dans le document 1 font ressortir un changement important vers l'an Mil, dû à une augmentation importante de la population sur le bassin versant accompagnée d'un accroissement des cultures et de la déforestation. Ces données nous informent donc surtout sur l'utilisation du sol dans le bassin versant, mais rien n'indique que l'état du lac ait été modifié de façon significative à ce moment-là.

Le document 2, en revanche, montre qu'à la même période la quantité de diatomées dans le lac a augmenté sensiblement.

- Les documents 2 et 8 montrent un autre changement majeur, récent : l'eutrophisation rapide du lac entre 1940 et 1963, due à l'urbanisation massive et au développement du tourisme après la fin de la guerre sur les rives du lac et des cours d'eau qui s'y jettent.

Des mesures ont été prises pour que le lac retrouve son état d'avant 1940 : en 1975 un collecteur a été mis en place tout autour du lac pour récupérer les eaux usées domestiques. Cette mesure a été efficace puisque l'état trophique s'est amélioré au point que le lac est redevenu oligotrophe à partir de 1986.

Remarque : cette amélioration n'est pas visible dans le profil de diatomées (document 2), ce qui est dû à l'adaptation des organismes à la baisse de la quantité de nutriments. Un certain temps peut être nécessaire pour que la baisse de nutriments ait un effet sur le fonctionnement du lac (32.pdf).

Ces éléments conduisent à rechercher l'état de référence au minimum en 1940.

Les profils de métaux lourds apportent des informations complémentaires : pour tous les métaux dosés, et notamment le cadmium, le plomb et l'arsenic, on observe une forte augmentation des concentrations à partir de 1945 environ. Cependant une tendance à la hausse existait déjà dès le début du 20^{ème} siècle (document 5). D'après ces données, l'état de référence se situerait donc plutôt vers la fin du 19^{ème} siècle.

Les données historiques vont dans le sens des données de paléolimnologie en ce qui concerne l'apparition de l'état eutrophe : jusqu'à la fin des années 30 le lac est nettement oligotrophe, mais le développement du tourisme provoque l'eutrophisation dans les années 40 et 50. A la fin des années 50, le lac est eutrophe.

Il y a peu d'informations sur les périodes plus anciennes.

Les données historiques et paléolimnologiques permettent de dire que l'objectif d'oligotrophie est réaliste pour ce lac, même si la période de référence reste à préciser à l'aide des métaux (il faudrait pouvoir remonter au moins jusqu'en 1850 pour pouvoir fixer de façon certaine un état de référence).

2- Grand lac de Laffrey

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le grand lac de Laffrey.

Données historiques

[14] 1892

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, Cl (traces). Transparence, couleur.

[7] 1896

Introduction de la truite vers 1885. Dans le grand lac et dans les lacs de Petichet et de Pierre-Châtel : perches, tanches, vérons. Essais de repeuplement et surveillance de la pêche.

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, CO₂.

♦ Cl : traces (mai 1892).

[32] 1907

Liste de cladocères dans les lacs du plateau de Laffrey.

[45] 1913

Pas de truite dans le lac avant son introduction à partir de 1890. Omble-chevalier introduit en 1890. Tanche et carpe introduites en 1895. Perche, gardon blanc et rouge, brochet très abondants.

[53] 1939

Lac oligotrophe.

Résumé des données historiques utiles :

Le lac était oligotrophe en 1939. Il y a trop peu de données pour connaître l'évolution de l'état trophique au cours du temps, ou l'existence de pollutions spécifiques liées à l'industrialisation.

3- Lac Léman

a) Données de paléolimnologie

- Sources

31.pdf, 46.pdf, 53.pdf, 57.pdf

- Historique de l'impact humain sur le lac

BP : av. J.-C.

Préhistoire

- Atlantique récent / Subboréal : peu de signes de l'influence humaine.
- Subboréal : idem.
- Phases de déforestation et donc de fort ruissellement observées au Néolithique (5800-3800 BP) et à l'Age du Bronze (3800-2700 BP).
- Fin de l'Age du Bronze (~2800 BP) : augmentation du niveau du lac (causes climatiques) et déplacement des populations vers l'intérieur, plus haut sur les rives.
- Subatlantique ancien : anthropisation de la végétation (charmes, noyers, châtaigniers, chênes...).

Histoire

- Subatlantique récent : variations très importantes du couvert végétal (de 1300 BP à nos jours) : forte anthropisation de la végétation : expansion du noyer, du châtaignier, des céréales, du chanvre ; recul de la hêtraie-sapinière.
- Epoque romaine et Moyen-Age : augmentation démographique importante.
- Au cours du 20^{ème} siècle : reboisement des résineux, plantation d'arbres exotiques, apparition de la mauvaise herbe *Ambrosia* vers 1950 et de l'algue *Pediastrum* suite à l'eutrophisation du lac.
- L'eutrophisation est maximale dans les années 1975-1980.
- Les principales stations d'épuration sont construites entre 1972 et 1976.

Flux et origine du plomb

Il y a une augmentation de la pollution par le plomb dans le Léman tout au long du 20^{ème} siècle, et cette augmentation devient brutale vers les années 60 pour atteindre un pic à la fin des années 70 puis redescendre suite à la réglementation suisse sur le plomb dans l'essence.

Dans les années 20, le plomb vient des industries et de la combustion du charbon, et plus tard des industries et de l'utilisation domestique.

- Résultats

Il s'agit des données les plus représentatives choisies parmi les résultats présentés dans les articles cités ci-dessus.

- Document 1 : données biologiques et physico-chimiques depuis 6000 ans

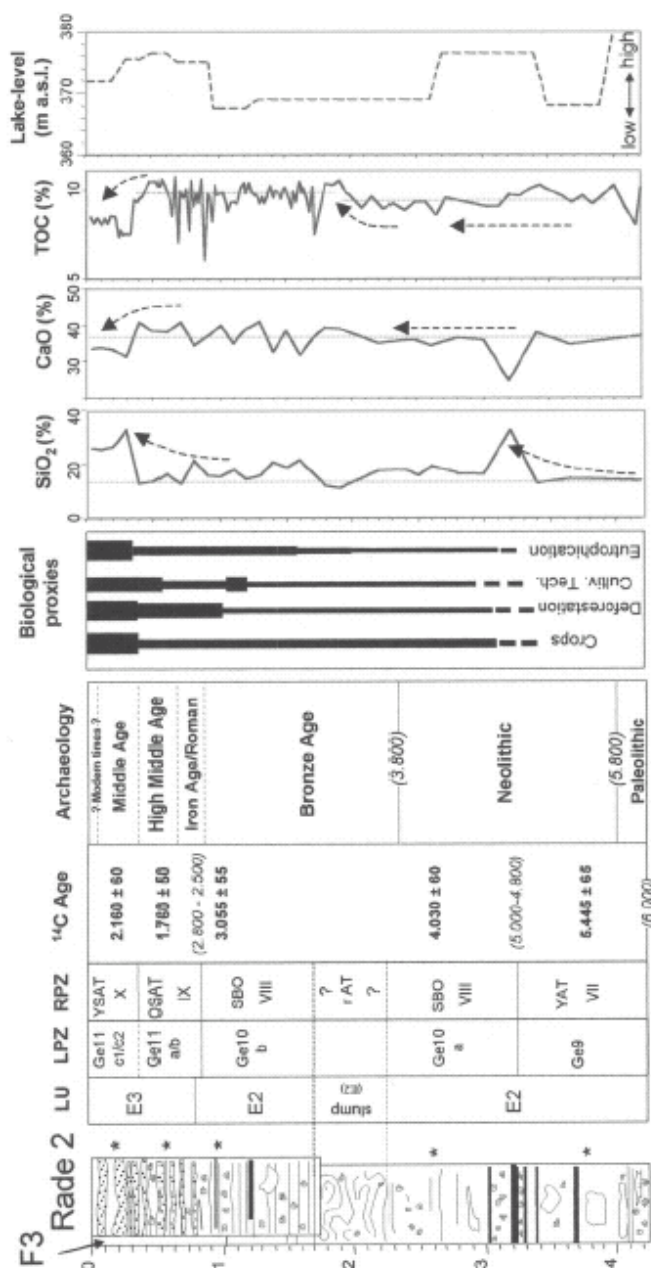
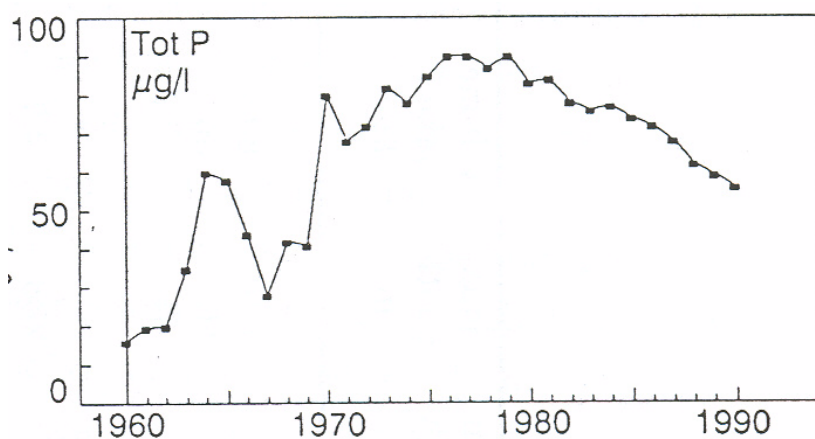


Fig. 2 : Evolution paléoenvironnementale de la baie de Genève (lac Léman) d'après différents types de données issues de sédiments lacustres accumulés pendant les 6000 dernières années. Les marqueurs biologiques sont le pollen, les amibes à thèque et les diatomées. La teneur en SiO_2 est reliée à la fraction minérale et est interprétée comme un marqueur des apports détritiques dans le lac. La courbe simplifiée des fluctuations du niveau du lac est construite à partir de plusieurs sources répertoriées dans Moscardello, 1996. Voir la figure 1 pour la légende.

Source : Moscardello *et al.* (31.pdf)

- Document 2 : phosphore dans l'eau du lac au cours des dernières décennies (données historiques)



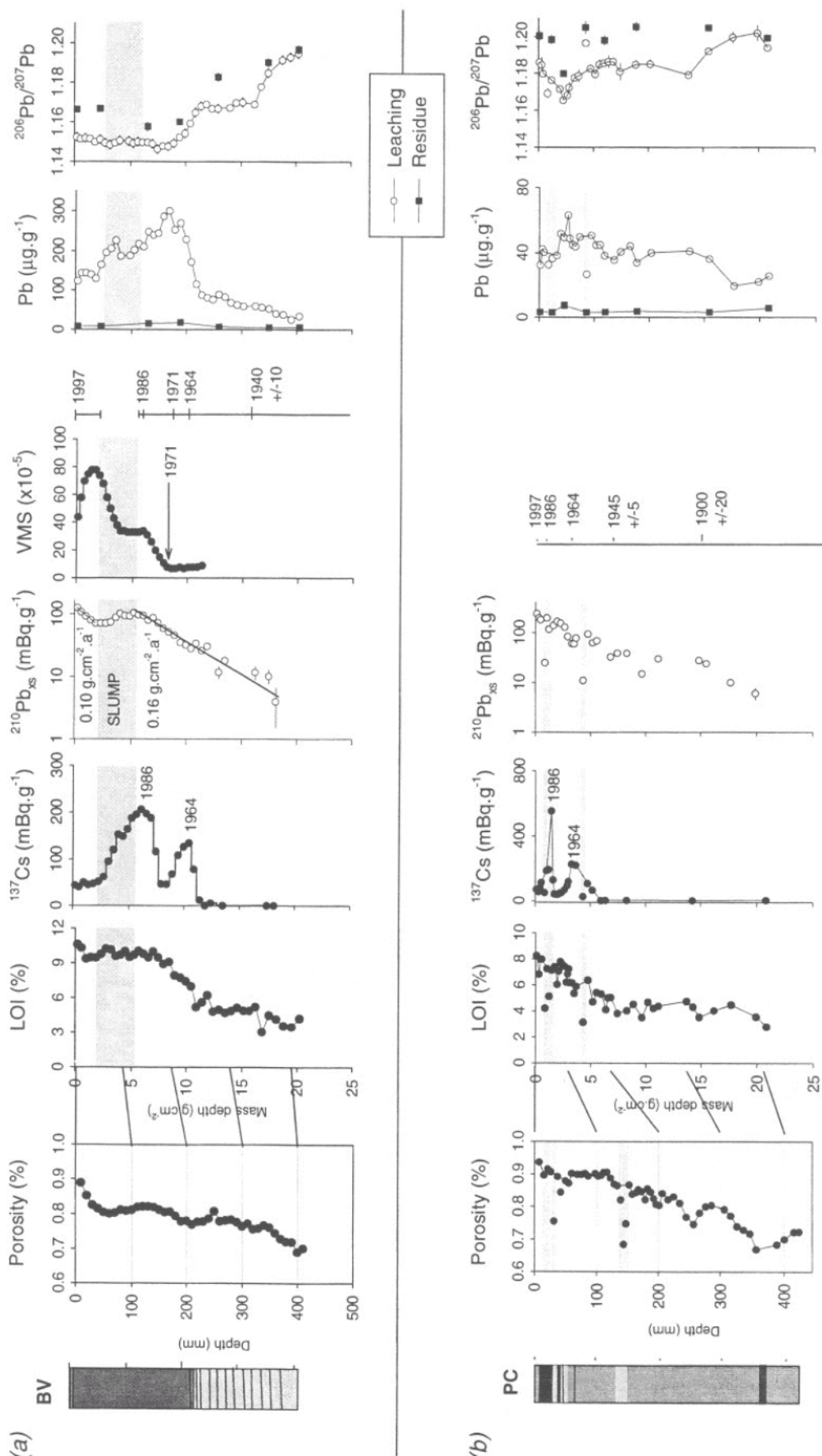
Evolution temporelle des concentrations moyennes de phosphore total dans la colonne d'eau du lac Léman

Source : Rapport annuel CIPEL

- Document 3 (page suivante) : données physico-chimiques depuis le début du 20^{ème} siècle

Légende :

Figure 3 : Profils de porosité, perte au feu, ^{137}Cs , ^{210}Pb , susceptibilité magnétique volumique (VMS), quantité de Pb, et rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ dans les carottes BV (Baie de Vidy, a) et PC (partie centrale du lac, b).



Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

- Document 4 : plomb depuis le début du 20^{ème} siècle

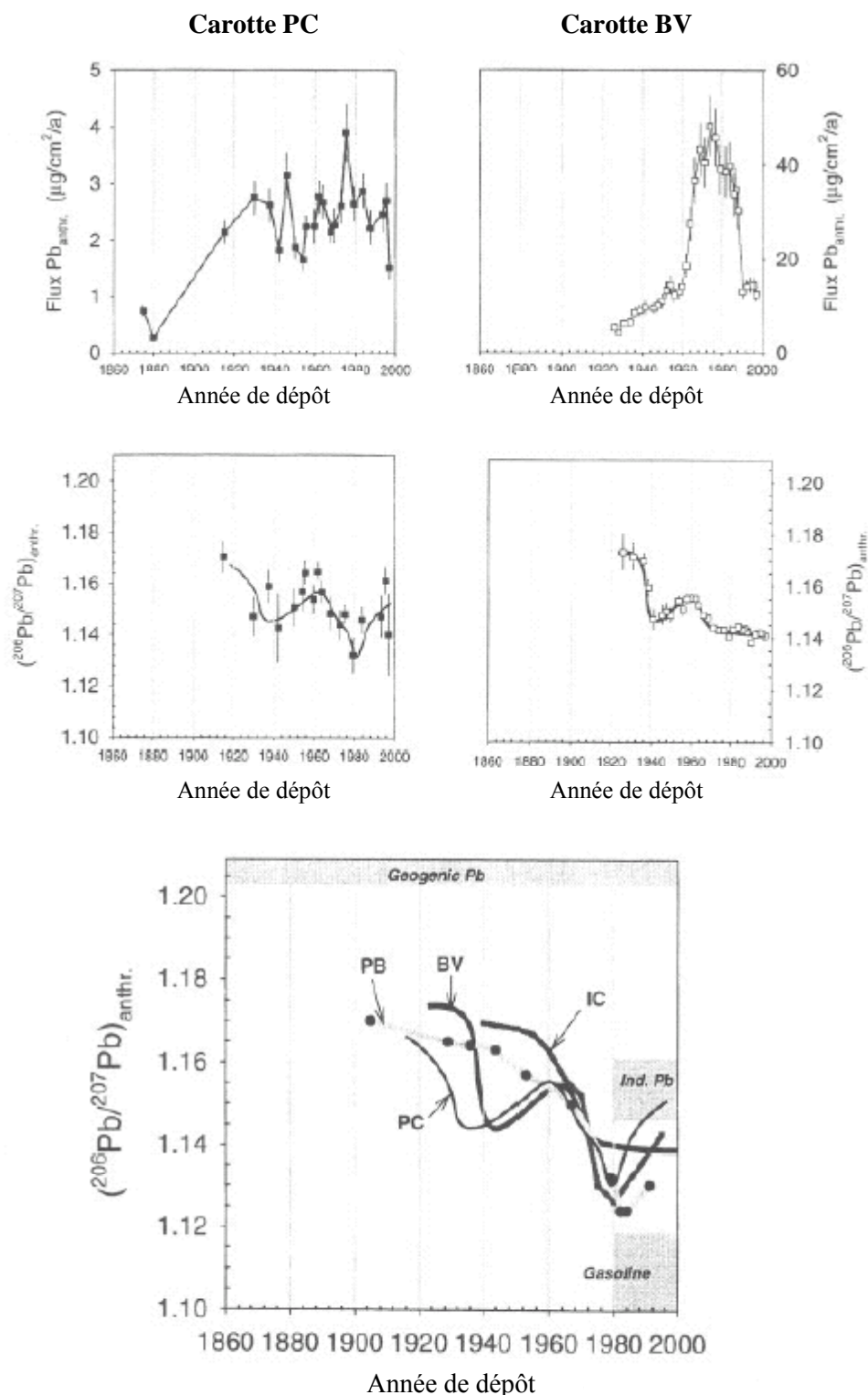


Figure 4. Flux de Pb, exprimé en $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, et rapports $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ des sources anthropiques au cours du siècle dernier, aux sites PC (carrés blancs) et BV (carrés noirs). Pour comparaison figurent aussi les isotopes du Pb enregistrés dans une carotte de glace issue d'un haut lac alpin (IC) et dans une tourbière du Jura (PB).

b) Données historiques**[8] 1884**

- ◆ Première observation d'*Oscillatoria nigra*. Présence de *Asterionella formosa*, *Synedra crotonensis* (= *Fragilaria pecten*), *Cyclotella comta*, *C. operculata* entre autres.

[14] 1892

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, H₂SO₄, KOH, NaOH.

- ◆ Cl : 1,2 mg/L (décembre 1889) ; 1,1 mg/L (mars 1891).
- ◆ Fe₂Al₂O₃ : 0,5 mg/L (décembre 1889).

[4] 1895

Liste de plancton.

[23] 1895

Quelques analyses chimiques, matière organique (mais résultats variables suivant les auteurs et les méthodes employées). Gaz dissous : oxygène, azote, CO₂.

- ◆ Biologie : liste détaillée de diatomées (auteur : J. Brun, 1900) avec la fréquence pour chaque espèce. On trouve notamment en grande quantité des *Asterionella*, des *Cyclotella*, des *Cymbella*, des *Fragilaria* (dont *F. crotonensis*), des *Gomphonema*, des *Navicula*, des *Nitzschia*, des *Synedra*.

Poissons : début de la pisciculture au milieu du 19^{ème} siècle.

Histoire : apparition du premier bateau à vapeur en 1823.

[7] 1896

Observation d'une baisse du nombre de poissons capturés. Cause proposée : le rejet des cendres des bateaux à vapeur empêcherait le développement des insectes et crustacés du lac, perturbant l'alimentation des poissons.

[46] 1897

- ◆ Liste d'espèces végétales (« espèces souvent rencontrées »), parmi lesquelles *Anaboena flos aquae*, *Melosira catenata*, *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella gracillima*, *Synedra delicatissima*, *Tabellaria fenestrata*, *Cyclotella comta*, *Navicula*, *Pediastrum boryanum*, *Dinobryon divergens*, *Ceratium hirundinella*, *Daphnia hyalina*, *Bythotrephes longimanus*.

[9] 1898

Chimie : SiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, SO₃, matière organique, couleur, température.

- ◆ O₂ dissous : en surface : 9,59 mg/L ; à 20 m : 11,4 mg/L.
- ◆ Biologie : diatomées : *Asterionella*, *F. crotonensis* (en hiver).

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂, CaO, MgO, SO₃, K₂O, Na₂O, CO₂, Az₂O₅, Cl, Fe₂Al₂O₃.

- ◆ Nitrates (HNO₃) : 0,81 mg/L, juin 1896.
- ◆ O₂ (août 1894) : 9,59 mg/L à la surface, 11,41 mg/L à 25 m, 10,86 mg/L à 100 m. Pas de désoxygénation au fond (du moins à la profondeur de 100 m).

[25] 1912

Rotifères.

[2] 1919

Température.

Liste de plancton avec les quantités pour les différentes espèces.

[33] 1924

Corégones autochtones, omble toujours présent mais en baisse.

[3] 1925

Le Léman, qui était un lac à Salmonidés, devient un lac à Cyprinidés et à Percidés (dégradation).

[11] 1927

Deux nouvelles algues vertes : *Pandorina* et *Willea*.

[44] 1937

Zooplancton.

[53] 1939

Liste de poissons. Les corégones et l'omble-chevalier sont d'origine dans le lac.
Lac oligotrophe.

[30] 1947

Chimie : CO₂, CaO. Température, transparence.

- ◆ pH : de 7,7 à 8,28 suivant la profondeur (juillet et septembre 1936).
- ◆ O₂ : à la surface : de 102,5 % (octobre 1937) à 112 % (juin 1937). Au fond : de 66,5 % (en mai) à 84 % (en octobre, à 293,50 m). Cette dernière valeur est probablement due à la présence d'eau du Rhône à cet endroit, puisqu'à 280 m on n'a que 62 %.
- ◆ Phosphore (P₂O₅) : en général on ne trouve pas de P₂O₅, ou seulement des traces, entre la surface et 180 m environ. De 200 à 260 m, les valeurs vont de 2 à 11 µg/L suivant l'époque de la mesure. Près du fond, le minimum observé est de 6 µg/L (juillet 1936) et le maximum de 19 µg/L (octobre 1937).
- ◆ Azote nitrique : les valeurs vont de 0,2 à 0,4 mgN₂O₅/L (0,05 à 0,1 mgN₂/L) (juillet 1936). En octobre 1937 : 0,5 mgN₂O₅/L au fond (0,13 mgN₂/L).
- ◆ Pas de N ammoniacal ni de N nitreux.

Biologie : liste de poissons. Développement important (nuisible) de la perche.

Lac oligotrophe. Eaux bien oxygénées.

[17] 1948

Liste de plancton.

- ◆ Prédominance de *T. fenestrata*. *F. crotonensis* est abondante. *Melosira* se développe beaucoup.

[31] 1958

Peu de matière organique, beaucoup d'oxygène jusqu'au fond (bien qu'on observe une diminution depuis 50 ans).

Population de lac oligotrophe.

[35] 1966

Apparition de *Dreissena polymorpha Pallas* (mollusque) en 1962. Origine inconnue (Bourget ?).

Importance de *Fragilaria crotonensis* ; en 1947 c'est *Tabellaria fenestrata* qui dominait. *Mougeotia* a progressé d'une manière constante ; elle domine *F. crotonensis*. Cette progression correspond à l'augmentation des nutriments dans l'eau (N, P), c'est-à-dire à l'eutrophisation.

[43] 1968

Apparition d'*O. rubescens* à l'automne 1967 (elle était probablement présente avant en petites quantités). En parallèle avec la prolifération de *Mougeotia sp.*. Cause : probablement l'eutrophisation.

Résumé des données historiques utiles :

En 1947 le Léman est encore signalé comme oligotrophe. C'est dans les années 60 qu'il commence à acquérir des caractères d'eutrophie. Il devient réellement eutrophe dans les années 70-80, puis revient à un état mésotrophe à la suite des mesures prises pour réduire l'apport de nutriments. L'eutrophisation du Léman, comme pour les autres lacs du même type, est due à l'urbanisation et au développement du tourisme sur les rives du lac et le bassin versant.

c) Quand placer l'état de référence pour le lac Léman ?

Les données polliniques et de plomb sont à peu près les seules disponibles en paléolimnologie sur le lac Léman.

Le pollen indique que l'eutrophisation du lac a commencé vers 1950 (46.pdf).

Des stations d'épuration sont construites entre 1972 et 1976. Elles se déversent dans la partie supérieure du Rhône ou directement dans le lac.

L'amélioration du traitement des eaux usées et l'interdiction en 1986 du P dans les lessives en Suisse ont entraîné un retour progressif de l'état eutrophe vers l'état mésotrophe. Cette tendance est observée depuis 1980.

Le profil de plomb montre l'existence d'une pollution qui a augmenté tout au long du 20^{ème} siècle pour atteindre un pic à la fin des années 70. Puis cette pollution a diminué grâce à la réglementation concernant le plomb dans l'essence en Suisse.

Le manque d'informations sur la période industrielle (150 dernières années) rend difficile la détermination d'un état de référence pour le lac Léman, sur la base des seules données de paléolimnologie disponibles.

Les données historiques, quant à elles, ne remontent pas aussi loin dans le temps, et permettent seulement de dire que le lac était oligotrophe jusqu'aux années 50 et que les premiers caractères d'eutrophie sont apparus dans les années 60.

L'étude des données historiques et paléolimnologiques met en évidence l'origine anthropique récente de l'eutrophisation du Léman, et justifie donc, en théorie, l'objectif d'oligotrophie pour ce lac. En pratique, la taille du lac fait que les actions entreprises pour la restauration de la propreté des eaux ne pourront probablement pas faire disparaître totalement les apports de nutriments au lac ; il n'est en effet pas possible de rejeter toutes les eaux traitées en aval du lac, comme cela se fait à Annecy par exemple. Il y a donc là un problème de moyens qui risque de rendre difficile l'atteinte de l'objectif prévu.

4- Lac de Paladru

a) Données de paléolimnologie

- *Source*

34.pdf

- *Historique de l'impact humain sur le lac*

- Abaissement du niveau du lac autour de l'an Mil et installation des hommes sur le site de Colletière-Charavines.
- Traces d'occupation humaine des berges du lac continue depuis cette époque.

- Résultats

Il s'agit des données les plus significatives choisies parmi les résultats présentés dans l'article cité ci-dessus.

- Diatomées dans les sédiments du lac (pas de datation).

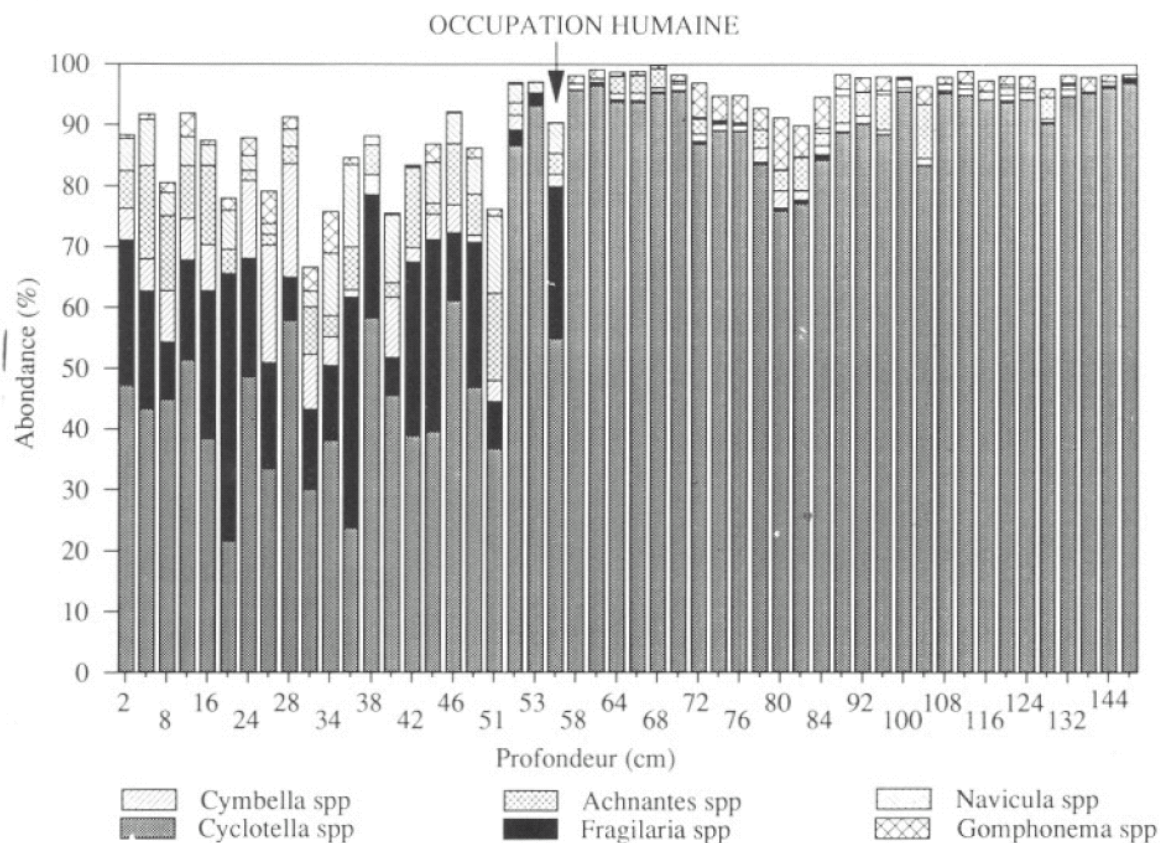


Fig. B : Variation de l'abondance des principales espèces de diatomées en pourcentage du peuplement total dans la carotte 1210 de Colletière-Charavines.

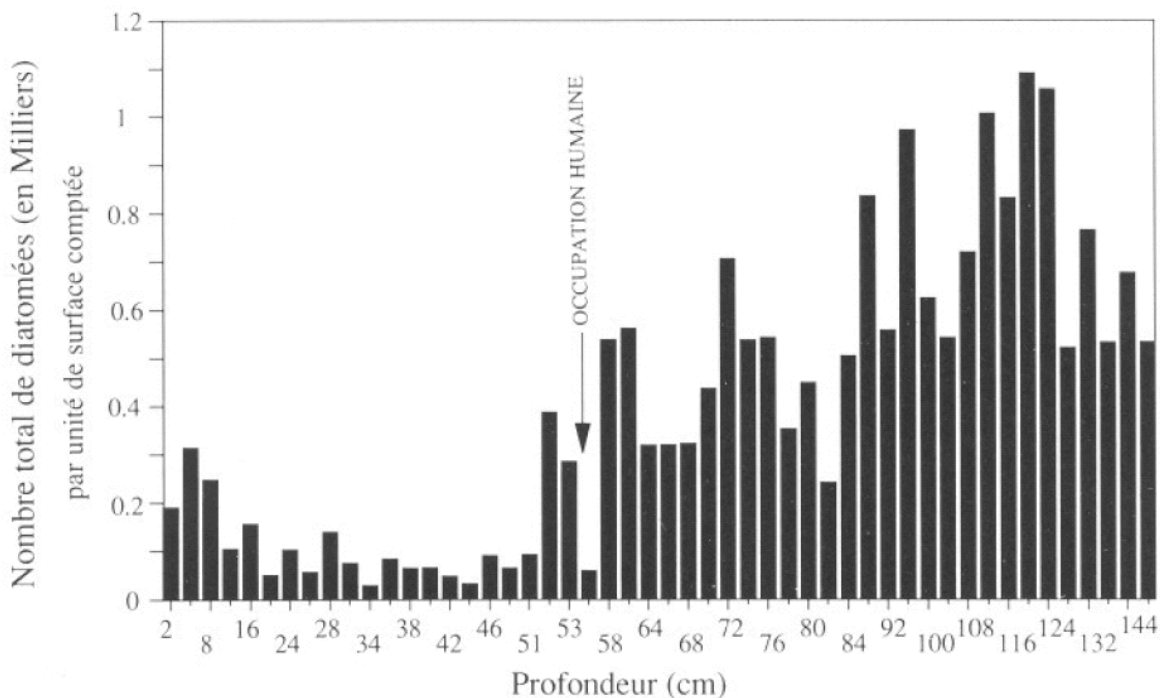


Fig. C : Variation de l'abondance des frustules de diatomées dans la carotte 1210 de Colletière-Charavines.

b) Données historiques

[7] 1896

Poissons : carpe, brochet, omble-chevalier, perche, vandoise, gardon. Pas de pisciculture.

[9] 1898

Couleur.

- ◆ Biologie : diatomées : *Cyclotella*, *Synedra* (en été).

[15] 1898

Chimie : résidu sec, SiO₂.

- ◆ Cl : traces (août 1891).

[33] 1924

Omble introduit dans le lac (date ?)

[6] 1953

- ◆ Liste de phytoplancton avec la fréquence pour chaque espèce. Les espèces les plus fréquentes sont *Dinobryon divergens*, *Cyclotella operculata*, *Ceratium hirundinella*, *Peridinium volzii* f. *maeandricum*. **La liste complète figure dans le document 55.pdf.**

Botryococcus braunii et *Beggiatoa alba*, espèces présentes dans le lac, sont signes d'eutrophie.

Eutrophie marquée.

[1] 1958

Introduction du lavaret dans le lac au début des années 50.

Le lac est eutrophe mais les salmonidés y vivent.

Résumé des données historiques utiles :

Dans les années 50 le lac présente déjà une eutrophie marquée. Les données sont insuffisantes pour en savoir plus sur l'évolution de l'état trophique du lac.

c) Quand placer l'état de référence pour le lac de Paladru ?

Il n'y a pas de données de paléolimnologie suffisamment précises sur la période récente pour identifier un état de référence.

Les données historiques, quant à elles, indiquent seulement que le lac présentait déjà une eutrophie marquée dans les années 50.

5- Lac de Petichet

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac de Petichet.

Données historiques

[14] 1892

Résidu sec, couleur, transparence.

[15] 1898

Chimie : résidu sec.

[45] 1913

Mêmes poissons que dans le Grand lac de Laffrey, mais les truites sont plus nombreuses et il n'y a pas de tanches.

Résumé des données historiques utiles :

Les données ne fournissent aucune information sur l'état trophique du lac.

6- Lac de Pierre-Châtel

Il n'existe pas de données de paléolimnologie sur le lac de Pierre-Châtel.

Données historiques

[14] 1892

Résidu sec, couleur, transparence.

[15] 1898

Chimie : résidu sec.

[32] 1907

Liste de cladocères.

Résumé des données historiques utiles :

Les données ne fournissent aucune information sur l'état trophique du lac.

Conclusion

Après analyse des données bibliographiques de paléolimnologie, il apparaît difficile de satisfaire l'objectif premier de l'étude : définir des conditions de référence en établissant un lien entre paramètres paléolimnologiques et paramètres de qualité utilisés couramment.

Cinq lacs seulement sont concernés par ce type de données, et ce sont par ailleurs sans doute les cinq lacs les mieux connus dans le district en termes de qualité et d'objectif de gestion.

L'analyse des données paléolimnologiques permet de recueillir des éléments relatifs à l'histoire du lac (évolution de l'état trophique, apparition de pollutions) mais ne permet pas de définir un état de référence en tant que tel.

Ces données peuvent plutôt être utilisées pour étoffer une réflexion autour des indicateurs émanant de la paléolimnologie et de la manière de les exploiter dans la définition des états de référence et objectifs. Cet aspect est développé dans la deuxième partie.

Il n'y a pas qu'en France que ces questions sont posées : l'Ecosse mène aussi une réflexion sur l'utilisation de la paléolimnologie dans le cadre de la Directive-Cadre sur l'Eau. Le « Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research » (SNIFFER) développe plusieurs projets autour de la DCE, dont l'un s'intitule « Paleolimnological approaches to the WFD » et doit se terminer en octobre 2004 (http://www.sniffer.org.uk/active_further_info.asp?id=265&location=our_activities). Un article paru en février 2004 présente les résultats de ce travail (sur le CD dans le répertoire *Techniques > Articles > Conditions de référence Ecosse*).

Nature des données de paléolimnologie et références des documents sources

	Diatomées	Pigments algaux	Matière organique	Phosphore	Pollen	Propriétés magnétiques	Fe, Mg, K, Na...	Métaux (Pb...)	Carbonates	Ostracodes
Lac d'Annecy	32.pdf	32.pdf	10.pdf	53.pdf	10.pdf 49.pdf (52.pdf)	36.pdf 49.pdf	49.pdf	Climasilac 54.pdf	49.pdf 51.pdf	
Lac du Bourget			47.pdf			39.pdf 47.pdf	43.pdf	38.pdf 40.pdf	47.pdf	47.pdf
Lac Léman	(31.pdf)		31.pdf	53.pdf	46.pdf (31.pdf)	46.pdf		57.pdf		
Lac de Nantua	30.pdf	30.pdf	30.pdf	30.pdf			30.pdf		30.pdf	
Lac de Paladru	33.pdf 34.pdf				33.pdf					

Bibliographie des documents de paléolimnologie et résumés

(classement par ordre alphabétique d'auteur)

Les documents décrits ont été scannés en fichiers PDF et sont joints sur un CD en annexe de ce rapport.

Document scanné : **40.pdf**

A 300 year history of lead contamination in northern French Alps reconstructed from distant lake sediment records

Auteurs : Arnaud, F.; Revel, M.; Bosch, D.; Winiarski, T.; Desmet, M.; Tribovillard, N.; Givelet, N.

Année : 2004

Journal : Journal of environmental monitoring

Notes : Cet article figure aussi, dans sa version soumise à *Geochimica et Cosmochimica Acta*, dans la thèse de F. Arnaud ("Signatures climatique et anthropique, dans les sédiments holocènes des lacs du Bourget et d'Anterne (nord-ouest des Alpes) - Paléohydrologie et contamination au plomb") datant de 2003.

Origine du document : LGCA Chambéry (Marc Desmet)

Lac(s) concerné(s) : Bourget, (Anterne)

Résumé : Etude de la concentration de plomb dans les sédiments datant des derniers siècles (lacs d'Anterne et du Bourget). Distinction entre contaminations anthropique et naturelle et, pour la contamination anthropique, entre influence globale et influence locale/régionale. Recherche des variations dans la nature du plomb anthropique.

Dans le lac du Bourget :

- Contamination au plomb au moins depuis le Moyen-Age
- Pas d'augmentation significative au moment de la révolution industrielle au début du 19^{ème} siècle
- Augmentation importante au début du 20^{ème} siècle (visible dans toute l'Europe)
- Pic de contamination dans les années 20 puis augmentation régulière jusqu'à la crise pétrolière de 1973-1974
- A ce moment, baisse importante et rapide, suivie d'une ré-augmentation rapide.
- Puis une baisse stable seulement à partir de 1985, quand apparaît la réglementation concernant l'essence plombée.
- Aujourd'hui le niveau de plomb reste assez élevé dans le lac du Bourget : il s'agit d'une contamination locale et régionale directe.

Origine du plomb :

- Jusqu'à 1960 : combustion du charbon
- De 1923 à 1991 : émission de plomb tétraéthyle (TEL) issu de l'essence plombée.

Apparition de l'essence plombée : entre 1920 et 1930, début de la commercialisation de l'essence plombée aux Etats-Unis (1923) et en Europe (1931), puis forte augmentation de son utilisation jusqu'au début de la seconde guerre mondiale. En 1945, toute l'essence vendue en Europe est plombée.

Intérêt pour l'étude : Contamination au plomb d'origine humaine depuis le Moyen-Age et notamment au cours du 20^{ème} siècle.

Document scanné : **39.pdf**

7200 years of Rhône river flooding activity in Lake Le Bourget : a high-resolution sediment record of NW Alps hydrology

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

Auteurs : Arnaud, F.; Revel, M.; Chapron, E.; Desmet, M.; Tribovillard, N.

Année : A paraître en 2005, version écrite pour la thèse en 2003

Notes : Cet article figure dans la thèse de F. Arnaud : "Signatures climatique et anthropique dans les sédiments holocènes des lacs du Bourget et d'Anterne (nord-ouest des Alpes) - Paléohydrologie et contamination au plomb"

Origine du document : LGCA Chambéry (Marc Desmet)

Lac(s) concerné(s) : Bourget

Résumé : Mesure de la susceptibilité magnétique (SM) dans les sédiments du lac du Bourget depuis 7000 ans, pour connaître l'évolution des apports détritiques du Rhône.

La SM reflète l'importance relative de la fraction silicatée détritique issue du Rhône par rapport à la fraction carbonatée autochtone. C'est donc un indicateur des flux de dépôts solides provenant du Rhône, lié à l'activité du fleuve.

Variations importantes (augmentation) des valeurs au cours des 3000 dernières années, imputables essentiellement au climat, mais amplifiées par l'impact humain (déforestation notamment).

Intérêt pour l'étude: historique sommaire du peuplement des berges du lac et des activités humaines:

- Romains : déforestation pour 1) construire des structures pour la pêche et la navigation, 2) développer l'agriculture

- Pic de SM à 890 AD peut-être dû à la déforestation

- Valeurs élevées de SM depuis le début du Petit Age Glaciaire (PAG) peut-être dues à de grandes quantités de sédiments rendues disponibles par le déboisement pendant la "Medieval Warm Period".

- Pendant le PAG, baisse des valeurs de SM car baisse du stock de sédiments disponibles

Pas de données sur la période récente.

Document scanné : **38.pdf**

Lead fall-out isotopic signal over French northern Alps: Timing and sources constraints from distant lake sediment records

Auteurs : Arnaud, F.; Revel, M.; Winiarski, T.; Bosch, D.; Chapron, E.; Desmet, M.; Tribovillard, N.

Année : 2003

Journal : Journal de Physique IV

Volume : 107

Pages : 61-64

Origine du document : LGCA Chambéry (Marc Desmet) (également annexe de la thèse de F. Arnaud)

Lac(s) concerné(s) : Bourget, (Anterne)

Résumé : Contamination au plomb dans les lacs d'Anterne et du Bourget. Etude sur les 3 derniers siècles environ.

Intérêt pour l'étude : Contamination au plomb d'origine humaine. Début de la contamination à la fin du 19^{ème} siècle (industrialisation), pic de concentration en 1985 (plomb d'origine humaine et locale) mais les retombées de plomb atmosphérique d'origine humaine culminent à la fin des années 60, puis baisse rapide. Aujourd'hui le niveau pré-industriel n'est pas retrouvé dans le lac du Bourget, mais l'origine du plomb actuel est essentiellement locale.

Document scanné : **53.pdf**

Recovery from eutrophic to oligotrophic states in lakes : role of sediments

Auteurs : Balvay, G.; Span, D.; Coppée, V.; Dominik, J.; Berthier, F.; Martin, C.; Vernet, J.-P.

Année : 1993

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

Journal : Studies in environmental science
Volume : 55
Pages : 303-322
Origine du document : INRA Thonon
Lac(s) concerné(s) : Annecy, Léman, (Lugano)

Résumé : Mesures de P (différentes formes) dans les sédiments et dans l'eau des lacs Léman et d'Annecy. Evolution de l'état trophique des lacs au cours des dernières décennies. Etude des échanges de P entre les sédiments et l'eau, dans le cas d'un lac eutrophe, mésotrophe ou oligotrophe. Différentes étapes de la restauration d'un lac (ex. du Léman) :

- 1- Rapide diminution de la concentration en P due à une diminution des apports (plus ou moins vite suivant la source : stations d'épuration ou agriculture)
- 2- Changement de la composition du phytoplancton : la proportion d'organismes de petite taille augmente
- 3- Baisse de la consommation d'O₂ dissous près de l'interface eau-sédiment et augmentation de la rétention de P dans les sédiments. Puis retour à un état plus oligo-mésotrophe.

Les sédiments profonds agissent comme une importante source interne de P.
 Une concentration en O₂ suffisante peut réduire la libération de P par les sédiments.

Intérêt pour l'étude : Quelques figures de profil de P en fonction du temps (dans les sédiments ou dans l'eau).

- Léman : principales stations d'épuration construites entre 1972 et 1976.

P interdit dans les lessives en 1986 en Suisse.

Création de la CIPEL en 1957.

- Annecy : passage d'un état oligotrophe à un état méso-eutrophe dans les années 60.

Création du SILA en 1957 pour superviser la restauration des eaux du lac.

Construction d'une canalisation tout autour du lac pour collecter les eaux domestiques. Construction de 1962 à 1976. Une seule station d'épuration.

Document scanné : **33.pdf**

Microlaminations lacustres : variations bathymétriques et climatiques avant l'an mil sur le site de Colletière, lac de Paladru, France

Auteurs : Borel, J.-L.; Brochier, J.-L.; Druart, J.-C.

Année : 1994

Journal : Quaternaire

Volume : 5

Numéro : 3-4

Pages : 105-111

Origine du document : INRA Thonon (Jean-Claude Druart)

Lac(s) concerné(s) : Paladru

Résumé : Etude d'une carotte courte autour de l'an mil : algologie, palynologie, analyse d'image, étude des séquences sédimentaires

Intérêt pour l'étude : Informations détaillées sur la période précédant l'an Mil, notamment concernant l'impact humain. Mais la période étudiée est trop ancienne et courte pour que les données soient utiles.

Document scanné : **52.pdf**

Climatic changes and anthropogenic effects during the last millennium attested by the

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

petrographical study of organic matter (Annecy, le Petit Lac; France)**Auteurs :** Buillit, N.; Lallier-Verges, E.; Disnar, J. R.; Loizeau, J. L.**Année :** 1997**Journal :** Bulletin de La Société Géologique de France**Volume :** 168**Numéro :** 5**Pages :** 573-583**Notes :** Le PDF contient uniquement un graphe issu de l'article et utilisé dans le CD Climasilac.
Voir les explications sur le CD.**Origine du document :** CD Climasilac**Lac(s) concerné(s) :** Annecy (Petit Lac)Document scanné : **47.pdf****Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'avant-pays alpin (lac du Bourget) durant le quaternaire récent****Auteur :** Chapron, E.**Année :** 1999**Université:** Université Joseph Fourier - Grenoble**Nombre de pages :** 264 p.**Notes :** Thèse (chapitre IV-3 uniquement : *Etude sédimentologique du drapé holocène du lac du Bourget - Sédimentation historique*)**Origine du document :** LGCA Chambéry (Marc Desmet)**Lac(s) concerné(s) :** Bourget**Mots-clés :** Avant-pays alpin, sédimentation lacustre, sismo-stratigraphie, environnements sédimentaires actuels, cyclicité du signal sédimentaire, paléoclimatologie, paléosismicité.**Résumé :**

Résumé du chap. 4-3 : analyse des séquences sédimentaires de la plaine lacustre et des différents deltas. Informations sur les crues et les aménagements récents.

Intérêt pour l'étude : Nombreux profils sédimentaires de la plaine lacustre et des différents deltas. Quelques figures intéressantes (quantité de matière organique au cours du temps notamment).

Crues historiques et aménagements majeurs :

- 1480-1902 : 60 crues importantes. Influence de l'intense déforestation et des aménagements humains sur les cours d'eau (digues, ponts...)

- Leysse : premières digues en 1862

Aujourd'hui : des aménagements tout le long de la Leysse

1948-1953 : travaux de correction et de détournement de 30° vers l'est de l'embouchure de la Leysse. Renforcement entre 1964 et 1972. Résultat : changement de la zone d'influence de la rivière dans le lac.

- Chautagne : premières digues en 1760.

- Principale crue du lac au 20^{ème} siècle : 1944. Elle correspond avec le début du faciès à rythmites.

A cette époque, le développement industriel et agricole était déjà important dans la région. Déversement des eaux usées dans le lac.

Premiers indices d'eutrophisation du lac : 1942. Maximum dans les années 80, avant le détournement des eaux usées vers le Rhône et la mise en place de stations d'épuration.

Document scanné : **34.pdf****Etude paléocéologique du site archéologique de Colletière-Charavines (Paladru, Isère, France)***Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse*

Auteur : Druart, J.-C.
Année : 1990
Journal : Cryptogamie Algologie
Volume : 11
Numéro : 2
Pages : 91-110
Origine du document : INRA Thonon (Jean-Claude Druart)
Lac(s) concerné(s) : Paladru

Résumé : Etude des diatomées pour connaître l'évolution du niveau du lac. Abaissement du lac autour de l'an Mil et installation des hommes sur le site de Colletière-Charavines. Confirmation par palynologie et sédimentologie. Pas de datation.

Intérêt pour l'étude : Figures représentant des profils de diatomées en fonction de la profondeur (carotte non datée). On voit notamment les traces de l'occupation humaine de l'an Mil environ jusqu'à nos jours.

Document scanné : **32.pdf**

Variation de l'état trophique du Lac d'Annecy (Haute-Savoie, France) d'après l'analyse des diatomées et des pigments algaux dans quelques carottages

Auteurs : Druart, J.-C.; Pelletier, J.-P.
Année : 1998
Journal : Arch. Sci. Genève
Volume : 51
Numéro : 3
Pages : 325-333
Origine du document : INRA Thonon (Jean-Claude Druart)
Lac(s) concerné(s) : Annecy

Résumé : Climasilac - Etude des sédiments du lac d'Annecy : analyse des diatomées et des pigments algaux. Mise en évidence (dans 2 des 3 carottes), du processus d'eutrophisation apparu au 20^{ème} siècle.

Intérêt pour l'étude : Petit pic de matière organique et diatomées à l'an Mil (cause à voir). Début de l'eutrophisation en 1940, augmentation de plus en plus forte jusqu'en 1963 puis stabilisation. En 1975 installation du collecteur d'eaux usées. Baisse du P observée depuis mais pas de baisse de diatomées ni de matière organique.

Document scanné : **30.pdf**

Trophic status evolution of Lake Nantua as revealed by biological records in sediment

Auteurs : Feuillade, M.; Dominik, J.; Druart, J.-C.; Loizeau, J.-L.
Année : 1995
Journal : Archiv für Hydrobiologie
Volume : 132
Numéro : 3
Pages : 337-362
Origine du document : INRA Thonon (Jean-Claude Druart)
Lac(s) concerné(s) : Nantua

Résumé : Etude des diatomées et des pigments dans une carotte de 50 cm. Apparition de l'état

eutrophe du lac vers 1880.

Intérêt pour l'étude : Figures représentant les profils de différents éléments en fonction du temps (depuis environ 1750-1800).

Variations de l'état trophique du lac de Nantua au cours des 2 derniers siècles :

Apparition de l'état eutrophe vers 1880.

- Phosphore total : augmentation depuis ~1852 jusqu'à ~1912 puis baisse entre 1912 et 1933 (cause inconnue) puis nouvelle augmentation jusqu'en 1974 (détournement des égouts loin du lac).
- Pigments : traduisent la quantité de cyanobactéries dans le lac, notamment *Oscillatoria* (caractéristique d'un état eutrophe). Apparition de *O. rubescens* dans le lac vers 1880. 1880-1923 : augmentation des cyanobactéries (max. en 1923). Coloration rouge du lac observée en 1921, due à *O. rubescens*. A partir de 1951, coloration rouge observée tous les ans. Depuis 1972-1973, baisse de l'abondance de cette cyanobactérie.
- Chlorophylle : lac mésotrophe avec des périodes d'eutrophie après 1880.
- Caroténoïdes : lac eutrophe.
- Rapport "dérivés de la chlorophylle/caroténoïdes totaux" : lac eutrophe.
- Diatomées : avant 1875 : espèces caractéristiques d'un lac oligo-mésotrophe, puis évolution vers des espèces caractéristiques d'un lac eutrophe (de 1903 à 1990).

Cause probable de l'eutrophisation : les activités industrielles au bord du lac ou sur le bassin versant :

- à partir de 1764 : usines textiles, filatures de soie, fabriques de coton et manufactures de laine
- à partir de 1808 : 20 tanneries
- à partir de 1810 : importantes industries du bois : papeteries, scieries

Les déchets sont rejetés directement dans le lac ou dans ses affluents.

La plupart de ces industries ont disparu dans les années 1950.

Hormis dans la concentration en P, on ne voit pas de signes de diminution de l'eutrophisation à la suite du détournement des égouts en 1972.

Document scanné : 36.pdf

Meteorological and land use controls on past and present hydro-geomorphic processes in the pre-alpine environment: an integrated lake-catchment study at the Petit Lac d'Annecy, France

Auteurs : Foster, G. C.; Dearing, J. A.; Jones, R. T.; Crook, D. S.; Siddle, D. J.; Harvey, A. M.; James, P. A.; Appleby, P. G.; Thompson, R.; Nicholson, J.; Loizeau, J. L.

Année : 2003

Journal : Hydrological Processes

Volume : 17

Numéro : 16

Origine du document : Hydrological Processes online, accès INRA

Lac(s) concerné(s) : Annecy (Petit Lac)

Résumé : Influence respective du climat et de l'utilisation du sol (land use) sur l'érosion. Variations suivant l'échelle de temps considérée. Intégration de différents types de données.

Intérêt pour l'étude : 2 schémas intéressants.

- Quelques mots sur le rôle de la déforestation dans l'érosion au Moyen-Age (800-1100 AD) et au 18^{ème} siècle.
- Population : pic au milieu du 19^{ème} siècle puis baisse dans la première moitié du 20^{ème} siècle (exode rural) puis augmentation à partir des années 50 grâce à l'expansion des agglomérations et du tourisme.
- Pendant toute cette période, baisse de la surface cultivée et augmentation de la forêt

Comparaison avec les enregistrements d'"écoulement" (discharge) :

- A partir du 17^{ème} siècle : développement d'activités proto-industrielles entraînant une déforestation importante dans les principales vallées fluviales (jusqu'à 10% de forêt en moins par an à la fin du 18^{ème} et au début du 19^{ème}).
- périodes de crues importantes dues à la déforestation juste avant 1900, à la construction de digues, à l'urbanisation et à l'agriculture intensive au 20^{ème} siècle.
- Depuis 1825 baisse de la charge sédimentaire : influence de la diminution de l'agriculture et de l'amélioration de la conservation de la forêt sur l'alimentation en sédiments.

Document scanné : **46.pdf**

Sismostratigraphie et structure sédimentaire en 3D d'un bassin lacustre, du retrait glaciaire à nos jours (Lac Léman, Suisse)

Auteur : Girardclos, S.

Année : 2001

Université : Université de Genève - Institut Forel

Nombre de pages : 182 p.

Notes : 46.pdf (chapitre 4 uniquement : *Datation des séquences sédimentaires et sismiques*)

Thèse intégrale en ligne :

http://www.unige.ch/cyberdocuments/theses2001/GirardclosS/these_front.html, notamment les diagrammes polliniques en annexe.

Origine du document : LGCA Chambéry (Marc Desmet)

Lac(s) concerné(s) : Léman

Mots-clés : sismo-stratigraphie, modèle tridimensionnel, lac Léman, Hauts-Monts, Holocène, Tardiglaciaire, Pléistocène, paléoclimatologie.

Résumé : Les séquences sédimentaires sondées appartiennent aux biozones palynologiques du Tardiglaciaire et de l'Holocène. La plupart des sédiments carottés se sont déposés durant le Subatlantique récent (X). La carotte sg1 montre une variation du couvert végétal du Bas Moyen Age à nos jours unique dans le Bassin Lémanique. La pression et l'influence anthropique, présentes dès le bas de la carotte, s'intensifient vers le haut. Les derniers 20 cm appartiennent au 20^{ème} siècle et les témoins polliniques (arbres exotiques, *Ambrosia*, *Pediastrum*) sont en accord avec le taux de sédimentation moyen minimum de 2,44 mm/an obtenu par l'analyse de l'activité du ¹³⁷Cs. Les carottes de la baie de Corsier sont drapées par des sédiments récents (19^{ème} - 20^{ème} siècles) qui sont remaniés régulièrement au gré des tempêtes de vent (Girardclos, 1993). Les niveaux sédimentaires d'âge Subboréal et Subatlantique ancien indiquent un milieu de dépôt plus tranquille que ceux qui appartiennent au Subatlantique récent et sont peut-être les témoins des niveaux lacustres +3 m de l'époque romaine et du Bronze moyen-Hallstat (Corboud, 2001; Gallay & Kaenel, 1981).

Durant le Subatlantique récent (unité D), le taux de sédimentation moyen a fortement augmenté (5,03 mm/an). Trois processus permettent d'expliquer ce changement radical. L'effet érosif des courants a globalement diminué. La déviation des dépôts de la Versoix vers le nord a accru le bilan sédimentaire du site. Les apports de la Versoix ont considérablement augmenté suite à l'intensification de l'utilisation du sol engendrée par les activités humaines (déforestation, agriculture) au cours de cette période.

Intérêt pour l'étude : Le tableau 4.2 rassemble les étapes importantes des changements du couvert végétal, sous l'effet notamment de l'activité humaine.

- Atlantique récent / Subboréal : peu de signes de l'influence humaine

- Subboréal : idem

- Subatlantique ancien : anthropisation de la végétation (charmes, noyers, châtaigniers, chênes...)

- Subatlantique récent : variations très importantes du couvert végétal (de 1300 BP à nos jours) : forte anthropisation de la végétation ; expansion du noyer, du châtaignier, des céréales, du chanvre ; recul de la hêtraie-sapinière

Au cours du 20^{ème} siècle : reboisement des résineux, plantation d'arbres exotiques, apparition de la mauvaise herbe *Ambrosia* vers 1950 et de l'algue *Pediastrum* suite à l'eutrophisation du lac (eutrophisation maximale dans les années 1975-1980).

Document scanné : 49.pdf

The record of land use change and soil erosion in the late Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France

Auteurs : Higgitt, S.R.; Oldfield, F.; Appleby, P. G.

Année : 1991

Journal : Holocene

Volume : 1

Numéro : 1

Pages : 14-28

Origine du document : INRA Thonon

Lac(s) concerné(s) : Annecy (Petit Lac)

Mots-clés : sédiments lacustres, propriétés magnétiques, changement de l'utilisation du sol, érosion du sol, Holocène récent, analyse pollinique, France

Résumé : Brusque changement à partir de 1000 AD environ.

- Période romaine (160 BC - 300 AD) : déforestation (limitée), pas d'agriculture intensive, économie pastorale plutôt.

A partir de 200 AD : déclin de l'autorité romaine.

- Début du Moyen-Age (300 - 1000 AD) : augmentation des cultures et de la déforestation mais pas d'agriculture intensive.

- Haut Moyen-Age (1000 - 1400 AD) : installation de monastères cistercien et bénédictin, expansion de la population. Conséquences : très forte augmentation de l'agriculture (céréales + fourrages) et des pâturages, donc déforestation très importante. Culture du noyer et du châtaigner.

1000-1200 AD : climat plus chaud qu'aujourd'hui

1300-1600 AD : détérioration du climat

A partir du milieu du 16^{ème} siècle : Petit Age Glaciaire

- Fin du Moyen-Age - milieu du 19^{ème} siècle :

1) moins d'activité agricole, plus de forêt, moins d'érosion du sol

2) déforestation très importante (maximale au 18^{ème} siècle), beaucoup de cultures, et donc augmentation de l'érosion.

- Jusqu'à aujourd'hui : plus de forêt, moins de cultures, moins d'érosion.

Intérêt pour l'étude : Données sur l'occupation par les hommes depuis 2000 ans et sur l'activité agricole et la déforestation, et leur influence sur l'érosion du sol. Pollen, propriétés magnétiques. Bilan des données dans la figure 10.

Document scanné : 54.pdf

Recent and present sedimentary fluxes of heavy metals and radionuclides in oligotrophic Lake Annecy, France

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

Auteurs : Loizeau, J. L.; Arpagaus, P.; Mathieu, D.; Dominik, J.

Année : 2003

Journal : Journal De Physique IV

Volume : 107

Pages : 789-792

Origine du document : Jean-Luc Loizeau, Institut Forel, université de Genève (disponible à Thonon)

Lac(s) concerné(s) : Annecy

Intérêt pour l'étude : Article très court. Pas de tableau de résultats ni de graphe sur les carottes remontant à un siècle. Uniquement un court commentaire : "... La concentration des métaux lourds augmente depuis le début du 20^{ème} siècle [apparemment il n'y a pas de valeurs avant cette période], avec une accélération après 1945. La concentration max. en métaux lourds dans le sédiment montre un facteur d'enrichissement, comparé aux valeurs pré-industrielles, de 8 pour le Pb, de 4 pour le Cd, et de 2 pour Zn et Cu. On observe une baisse des concentrations en métaux lourds après les années 80, sauf pour les teneurs en Cu qui restent stables. Les flux de métaux lourds déterminés d'après les enregistrements sédimentaires correspondant au maximum de contamination et à la surface de la carotte (années 90), sont comparables aux flux actuels déterminés dans le piège à sédiment. Actuellement, les flux de métaux lourds sont 2 à 3 fois plus faibles que pendant la période de contamination maximale."

Document scanné : **57.pdf**

Origin and evolution of Pb in sediments of Lake Geneva (Switzerland – France). Establishing a stable Pb record

Auteurs : Monna, F.; Dominik, J.; Loizeau, J. L.; Pardos, M.; Arpagaus, P.

Année : 1999

Journal : Environmental Science and Technology

Volume : 33

Numéro : 17

Pages : 2850-2857

Origine du document : Jean-Luc Loizeau, Institut Forel, université de Genève (disponible à Thonon)

Lac(s) concerné(s) : Léman

Résumé : Profils de plomb sur la période récente dans le Léman. Deux endroits sont étudiés : le centre du lac et la baie de Vidy.

Intérêt pour l'étude : Augmentation du Pb d'origine anthropique au cours du 20^{ème} siècle jusqu'à la fin des années 70 puis diminution.

Document scanné : **31.pdf**

Holocene sediment record from Lake Geneva, CH : a history of climate, environmental changes and human evolution

Auteurs : Moscarrello, A.; Schneider, A. M.; Benier, C.; Druart, J.-C.

Année : 2000

Origine du document : INRA Thonon (Jean-Claude Druart)

Lac(s) concerné(s) : Léman

Résumé : Etude multi-paramètres des sédiments du lac Léman sur les 6000 dernières années. Impact climatique et humain.

Intérêt pour l'étude : Quelques éléments sur le peuplement des rives du lac par l'homme au

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

Néolithique et l'expansion des populations, ainsi que sur le rôle des variations du niveau du lac dans le déplacement des villages. Informations très générales sur l'évolution de l'utilisation du sol et des pratiques agricoles. Pollen, amibes à thème.

- Subatlantique : apparition des pollens caractéristiques de la présence de l'homme (noyer, châtaignier, houblon, chanvre...)
 - Epoque romaine + Moyen-Age : augmentation significative du pollen de céréales et d'herbes car augmentation démographique importante.
 - Phases de déforestation + ruissellement : Néolithique (5800-3800 BP), Age du Bronze (3800-7200 BP).
 - Fin de l'Age du Bronze (~2800 BP) : augmentation du niveau du lac (causes climatiques) et déplacement des populations vers l'intérieur, plus haut.
- Figure 2 : bilan des données (biologiques, physico-chimiques) sur 6000 ans.

Document scanné : **10.pdf**

Human impact and soil erosion during the last 5000 years as recorded in lacustrine sedimentary organic matter at Lac d'Annecy, the French Alps

Auteurs : Noel, H.; Garbolino, E.; Brauer, A.; Lallier-Verges, E.; de Beaulieu, J. L.; Disnar, J. R.

Année : 2001

Journal : Journal of Paleolimnology

Volume : 25

Numéro : 2

Pages : 229-244

Origine du document : Journal of Paleolimnology online, accès université de Besançon, laboratoire de chrono-écologie. Présent à Thonon.

Lac(s) concerné(s) : Annecy (Petit Lac)

Mots-clés : sédiments lacustres, Holocène, matière organique, palynofaciès, analyse pollinique, érosion du sol, paléoenvironnement.

Résumé : Climasilac - Etude des sédiments du Petit Lac d'Annecy : séquences sédimentaires et palynologie. Mise en évidence de l'impact des hommes d'après l'évolution de la nature de la matière organique.

3200 BP : apparition des hommes autour du lac

2000 BP : installation des Romains

1700 BP : phase de déforestation importante (résultat : instabilité du sol, jusqu'à aujourd'hui)

900 BP : Très forte érosion. Agriculture des moines cisterciens. Culture du noyer...

Puis culture de céréales et sylviculture : le sol se restabilise.

Intérêt pour l'étude : Méthodes : pollen, matière organique, carbone organique total, index hydrogène, pétrographie.

Datation : ¹⁴C, proportions des sédiments, 1^{ère} occurrence de *Juglans*.

Document scanné : **43.pdf**

Sr and Nd isotopes as tracers of sources of clastic material, in the Bourget lake sediment (NW Alps, France) during the Little Ice Age - Paleohydrological implications

Auteurs : Revel, M.; Arnaud, F.; Chapron, E.; Desmet, M.; Givelet, N.

Année : Soumis à Chemical Geology. Version écrite pour la thèse en 2003.

Journal : Chemical Geology

Origine du document : LGCA Chambéry (Marc Desmet) - Annexe de la thèse de F. Arnaud (2003)

Utilisation de la paléolimnologie pour la détermination d'un état de référence (au sens de la Directive-Cadre européenne sur l'Eau) dans les lacs du bassin Rhône Méditerranée Corse

Lac(s) concerné(s) : Bourget, (Anterne)

Mots-clés: sédiments du lac du Bourget, isotopes de Sr et Nd, crues du Rhône, paléohydrologie, Petit Age Glaciaire.

Résumé : Utilisation des isotopes de Sr et Nd pour déterminer la provenance des sédiments clastiques (Sierroz/Leyse ou Rhône/Arve). Rhône : source majeure dans les 600 dernières années. Le signal clastique du lac dépend de l'activité paléohydrologique du Rhône et non des modifications humaines (déforestation, agriculture).

Intérêt pour l'étude : Pas d'informations sur l'impact humain. La figure 2 présente l'évolution de la quantité de certains éléments au cours des 600 dernières années. Eutrophisation du lac en 1943.

Document scanné : **51.pdf**

Individual flood events detected in the recent sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France

Auteurs : Thorndycraft, V.; Hu, Y.; Oldfield, F.; Crooks, P. R. J.; Appleby, P. G.

Année : 1998

Journal : Holocene

Volume : 8

Numéro : 6

Notes : Le PDF contient un graphe issu de l'article et utilisé dans le CD Climasilac. Voir les explications sur le CD.

Origine du document : CD Climasilac

Lac(s) concerné(s) : Annecy (Petit Lac)

Bibliographie des documents historiques

Il s'agit d'une bibliographie exhaustive des documents historiques relatifs aux 14 lacs étudiés. Le fonds historique de la bibliothèque de l'INRA de Thonon étant très complet en ce qui concerne les lacs de la région, tous les documents mentionnés s'y trouvent et peuvent y être consultés ; la cote d'un document, qui figure en gras à la fin de sa référence, permet de localiser l'ouvrage, la revue ou le tiré-à-part dans la bibliothèque.

Pour certains documents, des extraits ont été scannés en fichiers PDF et figurent sur le CD dans le répertoire « PDF paléo et histo ».

Les numéros entre crochets sont les références des documents, utilisées dans la synthèse des documents historiques.

NB : ces références n'ont aucun rapport avec les noms des documents scannés.

[1] BATIAS, A., 1958 – Le lavaret du lac du Bourget – Annales de la Station Centrale d'Hydrobiologie Appliquée, tome 7 – **Rev 44**

[2] BAUDIN, L., 1919 – Contribution à l'étude de la répartition verticale du plancton dans le Léman – **Tp 2209**

[3] BERTIN, L., 1925 – Les poissons et la pêche dans le lac Léman – *Science, Progrès, Découverte*, décembre 1925 – **Rev 115**

[4] BLANC, H., 1895 – Distribution verticale et horizontale du plancton – **Tp 2778**

[5] BOURRELLY, P., 1949 – Deux cyanophycées nouvelles du lac du Bourget : Phormidium franqueti nov. sp. et Aphanocapsa farlowiana Drouet et Daily – **Tp 2965**

[6] BOURRELLY, P., 1953 – Quelques pêches planctoniques dans le lac du Bourget et les lacs voisins – *Travaux de l'association internationale de limnologie théorique et appliquée*, tome 12, p.253 – **Rev 55 – Extrait dans le document scanné 55.pdf**

[7] BROCCHI, P., 1896 – La pisciculture dans les eaux douces, 328 p. – **M 5**

[8] BRUN, J., 1884 – Végétations pélagiques et microscopiques du lac de Genève au printemps de 1884 – **Tp 2333**

[9] CHODAT, R., 1898 – Etudes de biologie lacustre. B. Nouvelles remarques sur la flore pélagique superficielle des lacs suisses et français – **Tp 2749**

[10] CHODAT, R. et F., 1925 – Esquisse planctologique de quelques lacs français – **Tp 2309**

[11] CHODAT, R., 1927 – Sur l'apparition subite de deux algues vertes nouvelles dans le plancton du lac de Genève – **Tp 2295**

[12] COUTURIER, M., 1976 – Les activités agricoles et la pollution des eaux sur le bassin versant du lac du Bourget (Savoie) – **Tp 6560**

[13] DE GUERNE, J. & RICHARD, J., 1893 – Sur la faune pélagique des lacs du Jura français – **Tp 4550**

- [14] DELEBECQUE, A. & DUPARC, L., 1892 – Composition des eaux du lac du Bourget et de quelques autres lacs du Jura et du Dauphiné – *Archives des sciences physiques et naturelles*, 3^{ème} période, tome XXVIII, n°11 – **Tp 7460**
- [15] DELEBECQUE, A., 1898 – Les lacs français, 436 p. – **G 11**
- [16] DUPARC, L., 1894 – Le lac d'Annecy. Monographie – **Tp 2743**
- [17] DUSSART, B., 1948 – Sur le plancton du lac Léman – **Tp 230**
- [18] DUSSART, B. & JUGET, J., 1954 – Sur l'écologie de quelques organismes limicoles du lac d'Annecy – **Tp 614**
- [19] EYNARD, L. & VANEY, C., 1914 – Contribution à l'étude des cladocères de quelques lacs de la région plissée du Jura français – **Tp 2991**
- [20] FAVRE, J., 1940 – La faune malacologique post-glaciaire et actuelle du lac du Bourget – **M 160**
- [21] FEUILLADE, J., 1985 – Caractérisation et essais de restauration d'un écosystème dégradé : le lac de Nantua, 165 p.
- [22] FOREL, F.-A., 1884 – Etudes zoologiques dans les lacs de Savoie – **Tp 6543**
- [23] FOREL, F.-A., 1892, 1895 et 1904 – Le Léman, tome I, 543 p., tome II, 651 p. et tome III, 715 p. – **M 44**
- [24] FRAY, J.-P., 1903 – Notice sur les poissons des lacs de Nantua et de Sylans – **Tp 8782**
- [25] GANDOLFI HORNYOLD, A., 1912 – Quelques rotifères pélagiques du Léman – *Annales de biologie lacustre*, tome 5 – **Rev 77**
- [26] GAUTHIER, M., 1923 – Les dominantes planktoniques des lacs de Nantua et de Sylans dans leurs rapports avec la faune piscicole – **Tp 5159**
- [27] GORCEIX, Ch., 1973 – Répartition des températures dans le lac du Bourget – **Tp 4941**
- [28] GOUX, M., 1958 – L'acclimatation de la palée (*Coregonus schinzi* Fatio) dans le lac de Saint-Point (Doubs) – *Bulletin français de pisciculture*, n°188 p.125 – **Rev 43**
- [29] HUBAULT, E., 1943 – Les grands lacs subalpins de Savoie sont-ils alcalitrophes ? – **Tp 2774**
- [30] HUBAULT, E., 1947 – Etudes thermiques, chimiques et biologiques des eaux des lacs de l'est de la France (Vosges, Jura, Alpes de Savoie) – **M 86**
- [31] JUGET, J., 1958 – Recherches sur la faune de fond du Léman et du lac d'Annecy – *Annales de la Station Centrale d'Hydrobiologie Appliquée*, tome 7 – **Rev 44**
- [32] KEILHACK, L., 1907 – Cladocères des Alpes du Dauphiné – **Tp 2983**
- [33] KREITMANN, L., 1924 – Les poissons spéciaux des lacs subalpins – **Tp 4302**
- [34] KREITMANN, L., 1937 – Etude hydrobiologique et aménagement piscicole de trois lacs du Jura utilisés industriellement – **M 217**

- [35] LAURENT, P.-J., 1966 – Modifications biologiques récentes dans quelques lacs subalpins – **Tp 2901**
- [36] LEGER, L., 1913 – Sur les conséquences au point de vue de l'hygiène de l'utilisation des eaux du lac d'Aiguebelette par la société hydroélectrique de la Bridoire – **Tp 6634 et Tp 6635**
- [37] LEGER, L., 1928 – Etude hydrobiologique pour servir à l'aménagement et à la restauration piscicoles du lac de Nantua – **Tp 3604**
- [38] LE ROUX, M., 1892 – Les faunes lacustres – **Tp 2783**
- [39] LE ROUX, M., 1899 – Notes biologiques sur le lac d'Annecy – **Tp 2789**
- [40] LE ROUX, M., 1907 – Recherches biologiques sur le lac d'Annecy – *Annales de biologie lacustre*, tome 2 – **Rev 77**
- [41] LE ROUX, M., 1907 – Le lac d'Annecy. Faune et flore – **Tp 2924**
- [42] MAGNIN, A., 1904 – La végétation des lacs du Jura – **M 329**
- [43] PELLETIER, J. & DRUART, J.-C., 1968 – Première colonisation du Léman par *O. rubescens* DC – *Revue algologique*, tome 9, fasc. 2 – **Rev 18**
- [44] PELOSSE, M.-J., 1937 – Le zooplancton des eaux alpines – *Travaux de l'association internationale de limnologie théorique et appliquée*, vol. VIII, Tome I – **Tp 459**
- [45] PERRIER, L., 1913 – Monographie hydrobiologique piscicole du bassin de la Romanche - *Travaux du laboratoire d'hydrobiologie et de pisciculture de l'université de Grenoble*, 1913 – **Rev 48**
- [46] PITARD, E., 1897 – Recherches sur la distribution des organismes inférieurs dans le lac de Genève – **Tp 8062**
- [47] PITARD, E., 1897 – Quelques notes sur la florule pélagique de divers lacs des Alpes et du Jura – **Tp 2745**
- [48] PRUDENT, P., 1907 – Contribution à la flore diatomique des lacs du Jura – **Tp 4226** – **Extraits dans le document scanné 56.pdf**
- [49] SUCHET, M., 1954 – Etudes physico-chimiques des eaux du lac d'Annecy – **trav 32**
- [50] VANDEL, A., 1919 – Contribution à la connaissance de la faune des eaux douces du Jura – **Tp 3944**
- [51] VIRIEUX, A., 1916 – Recherches sur le plancton des lacs du Jura central – *Annales de biologie lacustre VIII* – **Rev 77**
- [52] VIVIER, P., 1937 – Sur les variations quantitatives du plancton pélagique du lac du Bourget – **Tp 459**
- [53] VIVIER, P., 1939 – Le peuplement piscicole des lacs subalpins de Savoie – **Tp 345**
- [54] VIVIER, P., 1957 – Acclimatation de la palée du lac de Neuchâtel dans le lac de Saint-Point – *Bulletin français de pisciculture*, n°186 p.30 – **Rev 43**

Liste des documents scannés triée par nom de PDF

Tous ces documents se trouvent sur le CD dans le répertoire « PDF paléo et histo »

10.pdf Human impact and soil erosion during the last 5000 years as recorded in lacustrine sedimentary organic matter at Lac d'Annecy, the French Alps, Noel *et al.*, 2001

30.pdf Trophic status evolution of Lake Nantua as revealed by biological records in sediment, Feuillade *et al.*, 1995

31.pdf Holocene sediment record from Lake Geneva, CH : a history of climate, environmental changes and human evolution, Moscariello *et al.*, 2000

32.pdf Variation de l'état trophique du Lac d'Annecy (Haute-Savoie, France) d'après l'analyse des diatomées et des pigments algaux dans quelques carottages, Druart & Pelletier, 1998

33.pdf Microlaminations lacustres : variations bathymétriques et climatiques avant l'an mil sur le site de Colletière, lac de Paladru, France, Borel *et al.*, 1994

34.pdf Etude paléoécologique du site archéologique de Colletière-Charavines (Paladru, Isère, France), Druart, 1990

36.pdf Meteorological and land use controls on past and present hydro-geomorphic processes in the pre-alpine environment: an integrated lake-catchment study at the Petit Lac d'Annecy, France, Foster *et al.*, 2003

38.pdf Lead fall-out isotopic signal over French northern Alps: Timing and sources constraints from distant lake sediment records, Arnaud *et al.*, 2003

39.pdf 7200 years of Rhône river flooding activity in Lake Le Bourget : a high-resolution sediment record of NW Alps hydrology, Arnaud *et al.*, thèse de F. Arnaud, 2003

40.pdf A 300 year history of lead contamination in northern French Alps reconstructed from distant lake sediment records, Arnaud *et al.*, 2004

43.pdf Sr and Nd isotopes as tracers of sources of clastic material, in the Bourget lake sediment (NW Alps, France) during the Little Ice Age - Paleohydrological implications, Revel *et al.*, thèse de F. Arnaud, 2003

46.pdf Sismostratigraphie et structure sédimentaire en 3D d'un bassin lacustre, du retrait glaciaire à nos jours (Lac Léman, Suisse), Giradclos, 2001

47.pdf Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'avant-pays alpin (lac du Bourget) durant le quaternaire récent, Chapron, 1999

49.pdf The record of land use change and soil erosion in the late Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France, Higgitt *et al.*, 1991

51.pdf Individual flood events detected in the recent sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France, Thorndycraft *et al.*, 1998

52.pdf Climatic changes and anthropogenic effects during the last millennium attested by the petrographical study of organic matter (Annecy, Le Petit Lac; France), Buillit *et al.*, 1997

53.pdf Recovery from eutrophic to oligotrophic states in lakes : role of sediments, Balvay *et al.*, 1993

54.pdf Recent and present sedimentary fluxes of heavy metals and radionuclides in oligotrophic Lake Annecy, France, Loizeau *et al.*, 2003

55.pdf Extrait de Quelques pêches planctoniques dans le lac du Bourget et les lacs voisins, Bourrelly, 1953 [données historiques]

56.pdf Extraits de Contribution à la flore diatomique des lacs du Jura, Prudent, 1907 [données historiques]

57.pdf Origin and evolution of Pb in sediments of Lake Geneva (Switzerland – France). Establishing a stable Pb record, Monna *et al.*, 1999

Liste des documents scannés triée par lac

ANNECY

- 32.pdf** Variation de l'état trophique du Lac d'Annecy (Haute-Savoie, France) d'après l'analyse des diatomées et des pigments algaux dans quelques carottages
- 52.pdf** Climatic changes and anthropogenic effects during the last millennium attested by the petrographical study of organic matter (Annecy, Le Petit Lac; France)
- 36.pdf** Meteorological and land use controls on past and present hydro-geomorphic processes in the pre-alpine environment: an integrated lake-catchment study at the Petit Lac d'Annecy, France
- 49.pdf** The record of land use change and soil erosion in the late Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France
- 54.pdf** Recent and present sedimentary fluxes of heavy metals and radionuclides in oligotrophic Lake Annecy, France
- 10.pdf** Human impact and soil erosion during the last 5000 years as recorded in lacustrine sedimentary organic matter at Lac d'Annecy, the French Alps
- 51.pdf** Individual flood events detected in the recent sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France
- 53.pdf** Recovery from eutrophic to oligotrophic states in lakes : role of sediments
- 55.pdf** *Extrait de* Quelques pêches planctoniques dans le lac du Bourget et les lacs voisins [données historiques]

BOURGET

- 39.pdf** 7200 years of Rhône river flooding activity in Lake Le Bourget : a high-resolution sediment record of NW Alps hydrology
- 47.pdf** Contrôles climatique et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'avant-pays alpin (lac du Bourget) durant le quaternaire récent
- 38.pdf** Lead fall-out isotopic signal over French northern Alps: Timing and sources constraints from distant lake sediment records
- 40.pdf** A 300 year history of lead contamination in northern French Alps reconstructed from distant lake sediment records
- 43.pdf** Sr and Nd isotopes as tracers of sources of clastic material, in the Bourget lake sediment (NW Alps, France) during the Little Ice Age - Paleohydrological implications
- 55.pdf** *Extrait de* Quelques pêches planctoniques dans le lac du Bourget et les lacs voisins [données historiques]
- 56.pdf** *Extraits de* Contribution à la flore diatomique des lacs du Jura [données historiques]

LEMAN

- 53.pdf** Recovery from eutrophic to oligotrophic states in lakes : role of sediments
- 46.pdf** Sismostratigraphie et structure sédimentaire en 3D d'un bassin lacustre, du retrait glaciaire à nos jours (Lac Léman, Suisse)
- 57.pdf** Origin and evolution of Pb in sediments of Lake Geneva (Switzerland – France). Establishing a stable Pb record
- 31.pdf** Holocene sediment record from Lake Geneva, CH : a history of climate, environmental changes and human evolution

NANTUA

- 30.pdf** Trophic status evolution of Lake Nantua as revealed by biological records in sediment
- 56.pdf** *Extraits de* Contribution à la flore diatomique des lacs du Jura [données historiques]

PALADRU

33.pdf Microlaminations lacustres : variations bathymétriques et climatiques avant l'an mil sur le site de Colletière, lac de Paladru, France

34.pdf Etude paléoécologique du site archéologique de Colletière-Charavines (Paladru, Isère, France)

55.pdf *Extrait de* Quelques pêches planctoniques dans le lac du Bourget et les lacs voisins [données historiques]

Le document **56.pdf** (*Extraits de* Contribution à la flore diatomique des lacs du Jura) concerne également les lacs de Chalain, des Rousses, de l'Abbaye et d'Aiguebelette.

II- CAHIER DES CHARGES POUR LA REALISATION D'UNE ETUDE DE PALEOLIMNOLOGIE SUR 14 LACS DES ALPES ET DU JURA

Introduction

Les données paléolimnologiques présentées dans la première partie sont incomplètes et ne concernent qu'un petit nombre de lacs. Cependant il ressort de leur analyse que la paléolimnologie peut servir à répondre aux questions suivantes : l'objectif d'oligotrophie est-il justifié pour un lac donné ? Autrement dit, peut-on identifier un changement brutal de l'état trophique et si c'est le cas, quelle est son origine ? En parallèle, existe-t-il une pollution par les métaux due à l'activité humaine ?

D'une manière générale l'état de référence des lacs naturels de montagne (moyenne et haute montagne) est l'oligotrophie, avec une déclinaison en termes de paramètres chimiques et biologiques. L'exploitation de la paléolimnologie doit permettre de se prononcer sur cet objectif « par défaut » en nuancant un ou plusieurs aspects ; en d'autres termes, de savoir si la qualité des lacs observée actuellement, éventuellement moyenne ou médiocre, est le résultat d'une pollution ou bien d'une évolution progressive naturelle.

Cette seconde partie présente les indicateurs les plus pertinents et les méthodes et techniques à utiliser pour réaliser une étude de paléolimnologie sur les 14 lacs.

Ces informations ont été rassemblées à partir de plusieurs sources : les données de la première partie d'une part, mais aussi des ouvrages de référence (notamment *Pollution of lakes and rivers*, Smol, 2002), l'avis de chercheurs familiers de ces techniques (Jean-Claude Druart, INRA Thonon, Marc Desmet, LGCA Chambéry), l'interrogation de la liste de diffusion PALEOLIM, qui regroupe des spécialistes de la paléolimnologie dans des laboratoires du monde entier (voir la partie « Ressources »).

1- Choix des indicateurs

Pour déterminer si la qualité actuelle d'un lac est le résultat d'une pollution ou d'une évolution naturelle, il est important de pouvoir identifier sur une carotte une « rupture » dans les profils obtenus avec les différents indicateurs.

Le choix s'orientera donc vers les indicateurs qui témoignent directement ou indirectement, soit de l'état trophique du lac au cours du temps, soit de pollutions spécifiques indépendantes.

1- Les indicateurs biologiques

Ils sont très variés dans les travaux de recherche effectués sur les lacs de l'étude : diatomées, pollens, pigments, ostracodes...

Mais dans l'optique d'une étude de grande ampleur sur une palette de lacs, il est nécessaire de rechercher les indicateurs qui ont « fait leurs preuves » d'une part, et dont le coût, d'autre part, n'est pas excessif. Les diatomées répondent à ces critères, ainsi que, dans une moindre mesure, les cyanobactéries.

a) Les diatomées

Les diatomées sont de loin l'indicateur biologique le plus utilisé dans les études de paléolimnologie, notamment les études à grande échelle, impliquant un nombre significatif de lacs dans une région donnée. Plusieurs pays européens ont déjà réalisé des séries de données, dans le cadre du projet européen Eddi (pour *European Diatom Database*, <http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/index.jsp>).

Ainsi il existe des jeux de données pour de nombreuses régions d'Europe, de même que pour certaines régions d'Afrique.

Chaque jeu de données rassemble des profils de diatomées sur plusieurs dizaines de lacs de la région considérée.

A partir de ces données ont été mises au point des fonctions de transfert qui permettent de déduire des diatomées certains paramètres utiles pour la reconstitution de l'état du lac au cours du temps. Trois principaux types de reconstructions sont possibles : le pH, le phosphore total (TP) et la salinité. Leur utilité varie en fonction de la région considérée.

Il existe notamment une série de données sur les lacs suisses, et une fonction de transfert permettant de retrouver les valeurs de TP dans ces lacs au cours du temps. Les lacs suisses étant assez semblables aux lacs des Alpes et du Jura français étudiés ici, on peut envisager d'utiliser cette fonction de reconstruction du TP sur les analyses de diatomées qui auront été faites, pour obtenir des valeurs de phosphore sur les 150 dernières années.

b) Les cyanobactéries

La recherche des cyanobactéries, qui sont le signe d'une qualité trophique dégradée, a aussi montré sa pertinence. Toutefois le dosage de pigments de cyanobactéries est beaucoup moins répandu que l'analyse des diatomées.

Si une rupture est identifiable dans les successions de peuplements phytoplanctoniques, et qu'elle est suivie d'une période de stabilité, on peut supposer que la qualité trophique a été considérablement changée. A l'inverse, une relative stabilité apparente des peuplements phytoplanctoniques laisserait

supposer que la qualité observée actuellement n'est pas le fruit d'une profonde modification et peut être liée au potentiel trophique naturel du lac (substrat, apports tributaires...).

2- Les indicateurs chimiques

Les profils issus d'analyses chimiques peuvent refléter l'évolution des pressions sur un lac de manière assez fidèle. D'un coût souvent plus abordable que les indicateurs biologiques, ils peuvent apporter des éléments de diagnostic.

a) Les nutriments

Il s'agit de l'azote et surtout du phosphore. Ce dernier, facilement mesurable, reflète l'urbanisation et l'intensification de l'agriculture. En général dans les lacs le phosphore connaît au cours des années 50-80 une forte augmentation due au développement des activités humaines.

b) Les métaux

Les profils de sédiments portant sur les métaux font bien apparaître l'évolution des pressions vis-à-vis de ces éléments : présence humaine riveraine, exploitation de mines, apparition des carburants plombés...

Ces éléments informatifs sur l'histoire des pressions peuvent être exploités indirectement pour une réflexion sur les états de référence : identifier les périodes de développement industriel, mettre en évidence le caractère progressif ou brutal des pollutions... Au-delà de ces aspects, ils peuvent permettre de distinguer les pollutions « historiques » et les pollutions « actuelles » et donc de fixer des objectifs réalistes en terme d'action.

2- Prélèvement et conservation des carottes

1- Taille des carottes

a) Longueur

Le choix de la longueur des carottes dépend essentiellement du taux de sédimentation. Celui-ci varie suivant les lacs, mais dans les lacs des Alpes et du Jura, il est généralement compris entre 2 et 3 mm par an. A 3 mm/an, il faut une carotte de 45 cm pour remonter jusqu'en 1850. Par précaution, et comme le taux de sédimentation a pu varier au cours du temps, on peut considérer qu'une longueur de 60 cm au maximum permettra de couvrir la période que l'on veut étudier.

b) Diamètre

Le choix du diamètre dépend de la quantité de sédiment nécessaire pour les analyses, et du pas de temps sur lequel on veut travailler. La difficulté à prélever les carottes (due par exemple à la profondeur du lac) peut aussi inciter à choisir un diamètre important, pour avoir plus de sédiment en une seule fois et limiter le nombre de carottes.

Le diamètre classique pour des petites carottes est 60 mm.

2- Lieu de carottage

Il est recommandé de choisir pour le carottage un endroit représentatif de l'ensemble du lac, et les sédiments doivent être aussi peu perturbés que possible. La zone la plus profonde du lac est donc particulièrement bien adaptée (Smol, 2002). Il faut éviter les zones proches des rives ou d'une dénivellation brutale, ou encore les zones exposées à des courants importants.

Représentativité d'un point du lac :

Un point unique n'est jamais parfaitement représentatif de l'ensemble du lac. On observe généralement des différences d'un carottage à l'autre, même pour des zones de carottage proches. Il est donc toujours préférable de pouvoir multiplier les carottes et les analyses, mais le coût se trouve multiplié par la même occasion.

De plus, ce qu'on recherche ici est une rupture bien marquée, et il est peu probable que les variations d'un endroit du lac à l'autre soient telles qu'elles modifient cette rupture si elle existe.

3- Méthode

a) Nombre de carottes à prélever sur chaque lac

Le nombre de carottes dépend bien sûr des analyses à effectuer, mais en général une ou deux carottes peuvent suffire.

Cependant il peut être utile de profiter de l'occasion pour réaliser un plus grand nombre de carottes dans la même zone, sans augmentation significative du coût. Cette solution présente plusieurs avantages : d'abord elle permet de conserver au moins une carotte en archive pour des études complémentaires, ensuite d'utiliser une carotte par type d'analyse (une pour les diatomées, une pour la physico-chimie...), ce qui permet d'avoir une plus grande quantité d'échantillon pour chaque mesure et éventuellement de faire un découpage différent d'une carotte à l'autre ; elle permet enfin de comparer la succession des couches dans les différentes carottes prélevées, et de repérer et d'éliminer une carotte qui aurait un profil différent et donc peu représentative.

Techniquement le prélèvement de carottes plus nombreuses nécessite, en plus de la rallonge de temps, de prévoir le stockage des carottes supplémentaires, et de disposer d'un carottier dont le tube peut être changé facilement plusieurs fois de suite.

Il semble intéressant de prélever plusieurs carottes sur tous les lacs où le carottage se fait facilement. En revanche la question peut se poser pour les lacs très profonds où le prélèvement peut être plus délicat. Dans ce cas une ou deux carottes de bonne qualité sont déjà un bon résultat.

b) Découpage sur le lieu de prélèvement ou conservation des carottes entières

Sur le lieu de prélèvement, il est possible soit de récupérer les carottes entières et de les conserver telles quelles, soit de les découper en tranches d'épaisseur donnée, dès leur sortie du carottier (Smol, 2002). Les différents échantillons, soigneusement identifiés, sont ensuite stockés pour être analysés ultérieurement.

Techniquement la première méthode, plus simple, est favorisée par le fait que les sédiments des lacs étudiés sont plutôt compacts et donc peu fragiles. Il est possible de manipuler assez facilement les carottes entières. Toutefois il faut penser au stockage : si les carottes font environ 50 à 60 cm de long, elles ne rentreront pas dans une glacière classique. Il faut donc prévoir un récipient adapté.

La deuxième méthode nécessite un équipement spécifique pour le découpage des carottes, et de plus il y a un risque d'erreur plus élevé à découper les carottes sur place plutôt qu'à le faire au laboratoire (mélange des échantillons). Mais cette méthode permet de gagner de la place pour le stockage et surtout, elle évite d'éventuelles altérations des carottes, toujours possibles au cours des manipulations.

4- Choix d'un carottier

Les critères à prendre en compte sont les suivants :

- Longueur des carottes : environ 60 cm.
- Consistance du sédiment (des sédiments mous ou liquides imposent l'emploi d'un carottier plus élaboré et donc plus cher) : dans les lacs étudiés, les sédiments sont plutôt solides (à cause de la précipitation de CaCO_3), ce qui permet en outre de les déplacer facilement sans risquer de les altérer, sans congélation préalable.
- Profondeur à laquelle se feront les prélèvements : elle est variable suivant les lacs et donc il est préférable de choisir un carottier adapté à tous les cas de figure.
- Faut-il prélever plusieurs carottes d'affilée ? On l'a vu, cela peut s'avérer utile pour la première méthode de carottage. De plus, il est toujours possible qu'une carotte soit perturbée lors de son prélèvement. Il sera alors nécessaire de recommencer aussitôt le carottage.
- Poids du carottier : il faut pouvoir transporter facilement le carottier dans un petit bateau et le manipuler sans avoir besoin d'un appareillage compliqué. Cependant un carottier léger peut être difficile à utiliser dans les lacs les plus profonds (Léman) où il peut être dévié par les courants.
- Tube transparent pour voir l'état de la carotte.
- Facilité d'utilisation du carottier pour des non-experts, qualité du carottage.
- Prix du carottier et des accessoires (tubes supplémentaires par exemple).

Un carottier Mortimer est parmi les plus simples d'utilisation mais ne permet pas de faire des carottes de plus de 25-30 cm de long, ce qui risque d'être insuffisant pour les lacs ayant les taux de sédimentation les plus élevés.

Uwitec (<http://www.uwitec.at>) propose un carottier plus grand mais qui semble facile à utiliser et reste d'un poids raisonnable (5 à 8 kg), adapté en théorie à toutes les profondeurs, pourvu de tubes facilement échangeables (60 ou 120 cm de long, 60 ou 90 mm de diamètre intérieur), en PVC transparent, ce qui permet de vérifier l'état de la carotte après le prélèvement. Le prix de ce carottier, version 60 mm de diamètre, avec 3 tubes, est de 738 euros, avec une offre de lancement à 260 euros (août 2004).

Il existe aussi d'autres types de carottiers plus élaborés, notamment des carottiers à piston. Voir les catalogues de Uwitec et OSIL (<http://www.osil.co.uk>) joints sur le CD dans le répertoire *Techniques > Catalogues > Carottiers*.

Signalons également qu'il est possible de construire soi-même un carottier à moindre coût. Cette possibilité est exposée dans l'article de Haberyan ci-joint (haberyan.pdf), dans le répertoire *Techniques > Articles > Construction de carottiers*.

5- Archivage des carottes

Comme on l'a vu plus haut, il peut s'avérer utile de profiter de l'étude pour prélever sur chaque lac une carotte destinée à être archivée.

On peut envisager de conserver les sédiments sous deux formes :

- soit on conserve la carotte entière, en la congelant ou en la réfrigérant (la lyophilisation est à éviter car la carotte se rétracte et devient très difficile à couper)

- soit on découpe la carotte puis on conserve les échantillons par congélation ou lyophilisation.

L'avantage de conserver la carotte entière est que l'on garde une trace de la façon dont le carottage a été fait et que l'on peut étudier à nouveau les couches successives du sédiment ; l'inconvénient est que la décongélation d'une carotte peut entraîner une perturbation du sédiment. De ce point de vue, la seconde méthode est plus sûre, puisqu'une fois la carotte découpée, les différentes tranches ne courent aucun risque d'être mélangées. D'autre part, des portions de carotte lyophilisées ne sont pas fragiles et sont faciles à conserver.

3- Datation

Pour des carottes courtes (période récente), la datation se fait couramment en établissant un profil de ^{137}Cs ou de ^{210}Pb . Le ^{14}C est plutôt utilisé pour dater des périodes plus longues.

Voici les prix indicatifs des datations, sachant que pour une carotte il faut compter une vingtaine de mesures pour établir un profil :

	€HT - 1 mesure	€HT - 20 mesures
^{137}Cs	300,00	6 000,00
^{210}Pb	300,00	6 000,00
^{14}C	600,00	12 000,00

Chaque mesure devant être reproduite une vingtaine de fois, le prix des datations s'élève rapidement.

Les datations au ^{137}Cs et au ^{210}Pb peuvent être faites au Laboratoire Souterrain de Modane.

Etant donné le coût de la datation, la question se pose de son intérêt, dans le cadre de la recherche d'un changement de l'état du lac ou de l'apparition d'une pollution. En effet, grâce aux taux de sédimentation on connaît approximativement la période couverte par une carotte, et les profils donnés par les indicateurs mettront en évidence la présence ou l'absence de modification récente. Il est intéressant de pouvoir dater précisément un tel changement mais ce n'est pas indispensable dans la mesure où l'on cherche surtout à décrire l'état qui l'a précédé.

Par ailleurs, les analyses physico-chimiques ou de métaux, couplées aux données historiques sur le lac, peuvent permettre de dater certains événements clés. Un profil de plomb, par exemple, mettra en évidence une hausse brutale du taux de plomb qui, à l'examen des données historiques, pourra être associée à l'installation d'une usine sur le bassin versant. Une datation fiable peut être obtenue de cette manière (c'est le cas pour le Léman notamment).

Dans certains cas, on peut observer une stratification annuelle sur une carotte (varves). S'il est confirmé que la périodicité est bien annuelle, on peut reconstituer une échelle de temps pour cette carotte.

4- Analyses

Dans cette partie sont regroupées les analyses susceptibles de fournir les informations les plus utiles pour l'étude.

Le coût des analyses est mentionné pour une mesure et pour vingt, car c'est approximativement le nombre nécessaire pour obtenir un profil sur une carotte de cette longueur. Une vingtaine de mesures,

soit 8 à 10 ans entre deux mesures, ne permettent pas d'avoir une résolution très fine, mais c'est suffisant pour l'étude puisqu'on peut s'attendre à observer un changement sur quelques dizaines d'années. Il n'est pas forcément utile, sauf peut-être pour dater la carotte, de détecter une pollution passagère et courte qui n'a pas d'incidence sur l'état général du lac. Toutefois on peut choisir le pas de temps que l'on souhaite, sachant que le coût devient rapidement prohibitif.

A l'extrême, on peut se contenter de ne faire que deux mesures, l'une en haut de la carotte et l'autre en bas (Smol, 2002 : approche « top/bottom »). De cette manière on peut comparer l'état actuel (ou du moins récent) et l'état d'il y a 150 à 200 ans, et ainsi mettre en évidence un changement brutal d'un ou plusieurs indicateurs dans cet intervalle de temps, même si on ne peut pas le dater plus précisément. Un tel changement pourra être considéré comme étant d'origine anthropique. Cette méthode peut aussi être déclinée en ajoutant une ou deux mesures intermédiaires.

Les analyses présentées ci-dessous et leur coût sont rassemblées dans un tableau (prix_analyses.xls) sur le CD dans le répertoire *Techniques > Catalogues > Analyses*.

1- Chimie

Les analyses détaillées ci-dessus peuvent être réalisées au laboratoire d'analyse des sols (LAS) à l'INRA d'Arras. Les prix sont ceux pratiqués par ce laboratoire. Sur le CD figure le catalogue complet des analyses disponibles (las_arras.xls) dans le répertoire *Techniques > Catalogues > Analyses*.

Il est possible de fournir soit un échantillon séché et broyé, soit un échantillon brut, et dans ce cas il faut ajouter le prix du broyage, du séchage, de la détermination de la matière sèche à l'air et de l'humidité résiduelle.

	€HT - 1 échantillon	€HT - 20 échantillons
Humidité résiduelle à 105°C	2,42	48,40
Matière sèche	2,79	55,80

La quantité d'échantillon nécessaire varie suivant les analyses qu'on souhaite faire.

a) Prise en charge et préparation des échantillons

	€HT - 1 échantillon	€HT - 20 échantillons
Prise en charge de l'échantillon	2,21	44,20
Préparation de produits divers	9,30	186,00
Traitement spécial de l'échantillon niveau 1	3,45	69,00
Traitement spécial de l'échantillon niveau 2	8,65	173,00
Traitement spécial de l'échantillon niveau 3	17,30	346,00
Renvoi de l'échantillon après analyse	0,61	12,20

b) Nutriments et silice

Si l'on choisit de faire des analyses de nutriments, il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas de développement d'algues dans les sédiments, car les mesures de P et de N seraient faussées. Il faut

donc soit faire faire les analyses rapidement après prélèvement, soit empêcher la croissance des algues en réfrigérant les sédiments et en les gardant à l'abri de la lumière, ou en les congelant.

Voici le prix des analyses de chimie les plus pertinentes pour la reconstitution du profil trophique d'un lac :

	€HT - 1 mesure	€HT - 20 mesures
Carbone (C) organique	5,70	114,00
Azote (N) total	5,09	101,80
Phosphore (P ₂ O ₅) total HF (spectrocolorimétrie)	2,43	48,60
Extraction selon la méthode Mehra-Jackson	8,24	164,80
Silicium (Si), méthode Mehra-Jackson (ICP-AES)	7,35	147,00

c) Métaux

Voici le prix des dosages de métaux les plus utiles pour mettre en évidence d'éventuelles pollutions d'origine anthropique :

	€HT - 1 mesure	€HT - 20 mesures
Mise en solution totale par HF	8,55	171,00
Cadmium (Cd) total HF (ICP-MS)	9,96	199,20
Chrome (Cr) total HF (ICP-AES)	8,55	171,00
Cobalt (Co) total HF (ICP-MS)	9,96	199,20
Cuivre (Cu) total HF (ICP-AES)	8,55	171,00
Nickel (Ni) total HF (ICP-AES)	8,55	171,00
Plomb (Pb) total HF (ICP-MS)	9,96	199,20
Zinc (Zn) total HF (ICP-AES)	8,55	171,00
Mercure (Hg) total par combustion sèche	25,54	510,80
Arsenic (As) total (HG-AAS)	30,34	606,80

2- Biologie

a) Diatomées

L'analyse de diatomées peut être faite à l'INRA de Thonon au prix de 164,84 € HT la mesure, soit 3296,80 € HT les 20 mesures.

Ce prix comprend la congélation de la carotte, la réalisation et la préparation des échantillons, l'analyse et l'interprétation des résultats.

L'analyse comprend un recensement des espèces, un comptage par espèce et/ou par genre, et un comptage global.

Pour faire une mesure, il faut disposer d'1 g de sédiment sec, soit environ 1 mm d'épaisseur dans une carotte de 6 cm de diamètre.

Les lames et les échantillons analysés sont tous conservés à l'INRA et peuvent être utilisés pour d'éventuelles analyses complémentaires ou vérifications.

Il est à noter que l'analyse d'un profil de diatomées n'est pas aisée, puisqu'on observe rarement une augmentation ou une diminution brutale du nombre de diatomées, mais plutôt des modifications des assemblages de différentes espèces. La présence d'une espèce particulière n'est pas obligatoirement liée à un état trophique donné. Il est nécessaire de savoir quelles sont les autres espèces présentes et quelles sont leurs proportions respectives.

L'évolution du nombre total de diatomées peut aussi être utile en mettant en évidence un changement majeur de l'état trophique.

Les données disponibles suite à l'analyse de diatomées peuvent ensuite être utilisées pour une reconstruction du profil de phosphore (voir le projet Eddi dans la partie « Choix des indicateurs »).

La reconstruction peut se faire directement sur le site ou en téléchargeant le logiciel (<http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/recon.jsp>). Le mode d'emploi se trouve dans le guide de l'utilisateur (user_guide.pdf), fourni sur le CD dans le répertoire *Techniques > Eddi*.

Les articles qui figurent sur le CD dans le répertoire *Techniques > Articles > Phosphore et diatomées* sont des exemples de reconstructions à partir des diatomées dans divers pays.

b) Pigments de cyanobactéries

Ce type d'analyse est beaucoup moins courant que l'analyse de diatomées, et ne se fait pas en routine dans les laboratoires centraux d'analyses (par exemple le Service Central d'Analyses du CNRS à Vernaison). On peut cependant prévoir un coût d'environ 150 euros pour une mesure de pigments par HPLC. Pour 20 mesures, on atteint la somme de 3000 euros (il ne s'agit que d'une estimation).

5- Synthèse / exploitation des données

Il faut prévoir, à l'issue de la réalisation des analyses, une interprétation globale des données sous la forme d'une représentation graphique de tous les paramètres, pour pouvoir déceler une éventuelle modification significative de l'état trophique du lac au cours des 150 dernières années et/ou l'apparition d'une pollution spécifique d'origine humaine, et de caractériser de façon aussi précise que possible l'état du lac avant ces changements.

Conclusion

Cette présentation des indicateurs de la paléolimnologie et de leur coût montre qu'il est possible de conduire une étude assez large pour un coût raisonnable, si l'on sélectionne les paramètres les plus adaptés. Il est possible d'associer plusieurs types d'analyses pour obtenir des données fiables et exploitables.

La paléolimnologie est encore peu utilisée en France, et uniquement pour la recherche. Il n'en est pas de même dans d'autres pays d'Europe et du monde, où elle est considérée comme un outil efficace pour la gestion des lacs. Ainsi l'Ecosse a-t-elle engagé un programme sur l'utilisation de la paléolimnologie dans le cadre de la DCE ; de nombreux pays européens ont réalisé des études systématiques de diatomées sur leurs lacs dans le cadre du projet européen Eddi ; de multiples études se font aux Etats-Unis et au Canada.

Dans ce cadre, une première étude de grande ampleur sur les lacs français pourrait apporter beaucoup de données nouvelles et initier une utilisation plus large de la paléolimnologie. Cette étude pourrait aussi permettre à la France d'apporter sa contribution au projet Eddi en étant à l'origine d'une collecte systématique des données diatomées, éventuellement utilisables ensuite pour construire des fonctions de transfert "sur mesure".

On le voit, il y a beaucoup à faire en matière de paléolimnologie en France, mais l'expérience d'autres pays sur le sujet donne des garanties de l'efficacité de cette approche, et permettra certainement de gagner du temps dans la réalisation d'études et l'exploitation des résultats pour la gestion des lacs.

Ressources

1- Ouvrages de référence

Pour cette étude, les ouvrages suivants ont été très utiles concernant les méthodes de la paléolimnologie appliquée à la gestion des lacs, et particulièrement le premier d'entre eux :

- Smol, JP, 2002. *Pollution of lakes and rivers – A paleoenvironmental perspective*. Coll. « Key issues in environmental change », Ed. Arnold, 280 pages, ISBN : 0 340 74146 5 (relié) ou 0 340 69167 0 (broché).
- Smol, JP, Birks, HJB et Last, WL, 2001. *Tracking environmental change using lake sediments, volume 3 : terrestrial, algal and siliceous indicators*. Coll. « Developments in paleoenvironmental research », Kluwer Academic Publishers, 371 pages, ISBN : 1 402 00681 0.
- Stoermer, EF et Smol, JP, 1999. *The diatoms : applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press, 469 pages, ISBN : 0 521 58281 4.

En outre les ouvrages suivants sont conseillés par des paléolimnologues de la liste de diffusion PALEOLIM, toujours pour une utilisation orientée gestion :

- Last, WL et Smol, JP, 2001. *Tracking environmental change using lake sediments, volume 1 : basin analysis, coring, and chronological techniques*. Coll. « Developments in paleoenvironmental research », Kluwer Academic Publishers, 371 pages, ISBN : 1-4020-0681-0.
- Berglund, BE, 1986. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. Wiley Interscience, 869 pages, ISBN : 0 471 90691 3.
- Cohen, AS, 2003. *Paleolimnology : the history and evolution of lake systems*. Oxford University Press, 528 pages, SBN : 0 195 13353 6.

2- Articles

Un certain nombre d'articles de revues scientifiques illustrent l'utilisation des techniques de paléolimnologie à l'étranger. Ils figurent dans la partie *Techniques > Articles* et sont classés suivant les thèmes qu'ils abordent. En particulier, les articles qui figurent dans le répertoire *Phosphore et diatomées* décrivent des exemples de reconstructions de valeurs de phosphore à partir d'études de diatomées, notamment dans le cadre du projet Eddi. Et dans le répertoire *Conditions de référence Ecosse* se trouve un article qui présente les résultats du travail réalisé par l'organisme écossais SNIFFER, pour l'établissement de conditions de référence dans les lacs d'Ecosse à l'aide de la paléolimnologie.

3- Sites internet

- Liste de diffusion en paléolimnologie

PALEOLIM :

<http://plaza.ufl.edu/whitmore/paleolim.htm>

➔ Archives :

<http://www.lists.ufl.edu/archives/paleolim.html>

- Vendeurs de matériel de carottage :

Uwitec :

<http://www.uwitec.at>

OSIL :

<http://www.osil.co.uk>

- Laboratoires d'analyses et/ou de recherche (France – Suisse)

Laboratoire d'Analyse des Sols (INRA Arras) :

http://www.lille.inra.fr/unites/unite_arras.htm

Laboratoire Souterrain de Modane :

<http://www-lsm.in2p3.fr/>

Service Central d'Analyses du CNRS (Vernaison) :

<http://www.sca.cnrs.fr/>

INRA Station de Thonon :

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

Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines, Chambéry :

<http://www.univ-savoie.fr/labos/lgca/>

Institut Forel, Université de Genève :

<http://www.unige.ch/forel/welcome.html>

CEREGE, Aix-en-Provence (participation au projet Eddi) :

<http://www.cerege.fr/>

- Laboratoires et projets européens ou internationaux

European Diatom Database (EDDI) :

<http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/index.jsp>

➔ Reconstructions :

<http://craticula.ncl.ac.uk/Eddi/jsp/recon.jsp>

Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research (SNIFFER) :

<http://www.sniffer.org.uk/>

➔ Projet « Approche paléolimnologique de la DCE » :

http://www.sniffer.org.uk/active_further_info.asp?id=265&location=our_activities

Environmental Change Research Centre (ECRC) - University College London (participation à Eddi) :

<http://www.geog.ucl.ac.uk/ecrc/>

Service géologique du Danemark et du Groenland (GEUS) (participation à Eddi) :

<http://www.geus.dk/geuspage-uk.htm>

North American Lake Management Society (NALMS) :

<http://www.nalms.org/>

Liste des fichiers fournis sur CD-Rom

L'organisation des documents sur le CD est la suivante :

Les deux répertoires principaux s'intitulent « *PDF paléo et histo* » et « *Techniques* ».

Dans le répertoire *PDF paléo et histo*, on trouve les documents PDF dont sont issues les données paléolimnologiques et historiques de la première partie. La description de ces documents est faite dans les bibliographies et les listes de documents scannés, à la fin de la première partie.

Dans le répertoire *Techniques* figurent différentes ressources concernant la seconde partie, c'est-à-dire des informations et des exemples sur les techniques paléolimnologiques utilisées pour la gestion des lacs.

- Le répertoire *Articles* rassemble des articles écrits par des auteurs internationaux qui ont eux-mêmes réalisé des études de ce type dans leur pays et qui exposent des techniques ou des résultats intéressants (notamment la détermination de conditions de référence pour les lacs écossais).
- Le répertoire *Catalogues* contient les catalogues d'analyses et de matériel de carottage, dont ont été extraites les informations qui figurent dans la deuxième partie.
- Enfin le répertoire *Eddi* contient le guide de l'utilisateur pour se servir du logiciel de reconstruction de profils de nutriments à partir des diatomées. Ce logiciel est disponible sur le site (voir la rubrique « Ressources » ci-dessus).