

## Etude paléolimnologique sur 8 lacs du district Rhône-Méditerranée

Mise en place d'éléments de référence pour les lacs  
des 9 Couleurs, d'Anterne, de Chalain, de Lauvitel, Nègre, de  
Remoray, du Vallon et de Vens 1<sup>er</sup>

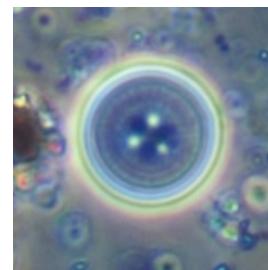
Années 2007-2008



Lac des 9 Couleurs



Lac d'Anterne



*Cyclotella ocellata*



Lac de Chalain



Carottes de sédiment



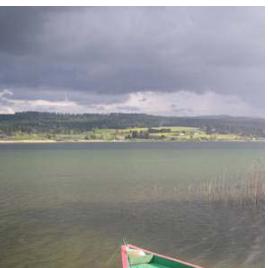
Lac de Lauvitel



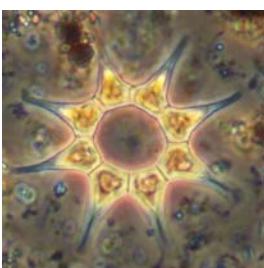
Lac Nègre



*Fragilaria ulna*



Lac de Remoray



*Pediastrum simplex*



Lac du Vallon



Lac de Vens 1<sup>er</sup>

Décembre 2008

**Propriétaire du rapport :** Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse  
2-4, Allée de Lodz  
69363 LYON CEDEX 07

**Interlocuteur :** M. Lionel NAVARRO

**N° de marché:** 070000014 du 13 mars 2007

**Titre :**

**Etude paléolimnologique sur 8 lacs du district Rhône-Méditerranée**

- Mise en place d'éléments de référence pour les lacs des 9 Couleurs, d'Anterne, de Chalain, de Lauvitel, Nègre, de Remoray, du Vallon et de Vens 1<sup>er</sup>. Années 2007-2008.

**Mots-Clés :**

Agence de l'eau Rhône Méditerranée & Corse, lacs de référence, paléolimnologie, diatomées, pigments, radiochronologie, granulométrie laser, phytoplancton, évolution, carottage.

**Numéro de rapport :** 3112EAEB08  
**Date :** Décembre 2008

**Statut du rapport :** Rapport final

**Rédaction, interprétation :**

François BOURGEOT, Arnaud OLIVETTO, Philippe PROMPT

**Echantillonnages de terrain<sup>1</sup>:** Philippe PROMPT, Roger ANTOINE

**Identification Diatomées :**

Arnaud OLIVETTO, Sonia BAILLOT, Jérémy AUBOIN

**Données Radiochronologiques:**

Jean-Louis REYSS (LSCE -CNRS)

**Données Granulométriques:**

Marc DESMET (LSE -ENTPE)

**Données Physico-chimiques:**

Jérôme LAZAROTTO (INRA de Thonon)

**Contrôle qualité :**

Philippe PROMPT

**Nombre d'exemplaires édités :** 1

**Nombre de pages (+annexes):** 94 (+50)

**Réalisation :**



<sup>1</sup> En fonction des contextes, interventions complémentaires de différents intervenants. La carotte d'Anterne a été prélevée par l'Université de Savoie (Fabien ARNAUD).

## Sommaire

<b>I) INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>II) MATERIEL &amp; METHODES.....</b>	<b>6</b>
1) Présentation des sites d'études .....	6
1.1) Lac des 9 Couleurs.....	7
1.2) Lac d'Anterne .....	7
1.3) Lac de Chalain.....	8
1.4) Lac de Lauvitel .....	10
1.5) Lac Nègre.....	11
1.6) Lac de Remoray.....	11
1.7) Lac du Vallon.....	13
1.8) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	13
2) Protocole d'échantillonage .....	15
2.1) Carottage des sédiments .....	15
2.2) Campagnes d'échantillonnage .....	15
2.3) Prélèvements de pleine eau .....	16
3) Analyses .....	16
3.1) Acquisition des données.....	16
3.1.1) Préparation des carottes .....	16
3.1.2) Radiochronologie .....	17
3.1.3) Granulométrie laser .....	17
3.1.4) Physico-chimie.....	18
3.1.5) Micropolluants.....	19
3.1.5) Hydrobiologie .....	20
3.1.5.1) Phytoplancton de pleine eau .....	20
3.1.5.2) Pigments photorécepteurs et accessoires.....	20
3.1.5.3) Diatomées .....	20
3.2) Traitement des données .....	22
3.2.1) Indices biocénotiques .....	22
3.2.2) Obtention des profils de traits écologiques.....	23
3.2.3) Analyses multivariées.....	24
3.2.3.1) Analyse en composantes principales (ACP) .....	24
3.2.3.2) Analyse factorielle des correspondances (AFC) .....	25
3.2.3.3) Analyses inter-groupes et intra-groupes.....	25
3.2.3.4) Analyse de co-inertie .....	26
3.2.3.5) Analyse de classification .....	26
3.2.4) Tests statistiques.....	26
<b>III) RESULTATS– DISCUSSION .....</b>	<b>27</b>
1) Présentation générale des données recueillies.....	27
1.1) Carottes .....	27
1.1.1) Lac des 9 Couleurs.....	28
1.1.2) Lac d'Anterne .....	28
1.1.3) Lac de Chalain.....	28
1.1.4) Lac de Lauvitel.....	28
1.1.5) Lac Nègre .....	29
1.1.6) Lac de Remoray .....	29
1.1.7) Lac du Vallon .....	29
1.1.8) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	29
1.2) Vitesses de sédimentation et datation.....	30
1.2.1) Lac des 9 Couleurs.....	31
1.2.2) Lac d'Anterne .....	31
1.2.3) Lac de Chalain.....	32
1.2.4) Lac de Lauvitel.....	32

1.2.5) Lac Nègre .....	32
1.2.6) Lac de Remoray .....	33
1.2.7) Lac du Vallon .....	33
1.2.8) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	33
1.3) Granulométrie laser .....	33
1.3.1) Lac des 9 Couleurs.....	33
1.3.2) Lac d'Anterne .....	34
1.3.3) Lac de Chalain.....	34
1.3.4) Lac de Lauvitel.....	35
1.3.5) Lac Nègre .....	35
1.3.6) Lac de Remoray .....	36
1.3.7) Lac du Vallon .....	36
1.3.8) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	37
<b>2) Analyse des paramètres physico-chimiques et biologiques au sein des carottes .....</b>	<b>37</b>
2.1) Physico-chimie des sédiments .....	37
2.1.1) Caractérisation des lacs en fonction de leurs paramètres physico-chimiques.....	37
2.1.2) Evolution des paramètres physico-chimiques.....	39
2.2) Micropolluants .....	44
2.2.1) Caractérisation des lacs en fonction de leurs teneurs en micropolluants. 44	44
2.2.2) Evolution temporelle des teneurs en micropolluants .....	45
2.3) Etude des pigments photorécepteurs et accessoires dans les sédiments.....	49
2.3.1) Préambule .....	49
2.3.2) Analyse globale et représentation des données .....	50
2.3.3) Lac des 9 Couleurs.....	52
2.3.4) Lac de Chalain.....	52
2.3.5) Lac de Lauvitel.....	54
2.3.6) Lac Nègre .....	54
2.3.7) Lac de Remoray .....	56
2.3.8) Lac du Vallon .....	56
2.3.9) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	57
2.4) Analyse par l'étude des traits écologiques des diatomées .....	57
2.4.1) Préambule .....	57
2.4.2) Analyse globale et représentation des données .....	59
2.4.3) Lac des 9 Couleurs.....	61
2.4.4) Lac d'Anterne .....	61
2.4.5) Lac de Chalain.....	63
2.4.6) Lac de Lauvitel.....	63
2.4.7) Lac Nègre .....	64
2.4.8) Lac de Remoray .....	64
2.4.9) Lac du Vallon .....	65
2.4.10) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	65
2.4.11) Analyse de la relation entre la caractérisation des lacs par les traits écologiques de leurs peuplements diatomiques et par leur physico-chimie 66	66
2.5) Caractérisation spatiale et évolutive des lacs par l'étude des peuplements diatomiques fossiles. ....	67
2.5.1) Evolution des indices biocénotiques.....	67
2.5.1.1) Préambule .....	67
2.5.1.2) Lac des 9 Couleurs .....	67
2.5.1.3) Lac d'Anterne.....	68
2.5.1.4) Lac de Chalain .....	69
2.5.1.5) Lac de Lauvitel .....	70
2.5.1.6) Le lac Nègre.....	71
2.5.1.7) Lac de Remoray .....	72
2.5.1.8) Le lac du Vallon.....	73
2.5.1.9) Lac de Vens 1 <sup>er</sup> .....	74
2.5.2) Analyses des listes floristiques .....	75

2.5.2.1) Préambule.....	75
2.5.2.2) Analyse globale.....	75
2.5.2.3) Analyse de l'évolution des peuplements diatomiques.....	77
2.5.2.4) Analyse de la relation entre la caractérisation des lacs par leur peuplement diatomique et par leur physico-chimie .....	78
2.5.3) Définition de peuplements diatomiques types.....	79
<b>IV) CONCLUSION .....</b>	<b>90</b>
• <b>Annexe 1.....</b>	<b>95</b>
• <b>Annexe 2.....</b>	<b>107</b>
• <b>Annexe 3.....</b>	<b>109</b>
• <b>Annexe 4.....</b>	<b>111</b>
• <b>Annexe 5.....</b>	<b>136</b>

## I) INTRODUCTION

La directive 2000/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Elle préconise l'atteinte d'un "bon état" écologique des différents milieux aquatiques, dont les plans d'eau, d'ici 2015. L'un des objectifs de son application est de définir et de caractériser des masses d'eau de référence. En ce qui concerne les lacs, il s'agit de définir des milieux aquatiques lenticques naturels, considérés comme peu ou pas perturbés par les activités humaines.

C'est dans le contexte de l'application de cette Directive Cadre sur l'Eau que l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse a mandaté le GREBE afin de réaliser une étude paléolimnologique sur 8 lacs. Une approche paléolimnologique permet de reconstituer l'histoire des lacs par le biais de différentes techniques : carottage des sédiments, analyse des diatomées, des pigments, de la matière organique etc. Ainsi, cette étude permet de travailler sur l'état et l'évolution des lacs depuis plus de 150 ans, en recoupant l'évolution de la physico-chimie et du compartiment biologique.

L'étude porte sur l'analyse de carottes de sédiments lacustres, qui intègrent au fur et à mesure de leur accumulation, les variations du milieu lacustre d'un point de vue physico-chimique et biologique. Parmi les marqueurs biologiques susceptibles d'être retrouvés dans les sédiments, pollens, pigments algaux et diatomées, sont régulièrement utilisés. La paléopalynologie, basée sur l'étude des pollens anciens, permet une analyse des conditions du milieu plus globale et notamment des conditions climatiques. L'analyse des algues unicellulaires que constituent les diatomées apporte quant à elle une information plus spécifiquement centrée sur le fonctionnement lacustre. La particularité des diatomées porte sur la présence d'une structure siliceuse enfermant le contenu cellulaire à l'intérieur de deux valves, le frustule. Ce dernier, particulièrement résistant, y compris dans les milieux réducteurs, peut donc être retrouvé dans les couches de sédiments. Le frustule étant à la base de la systématique des diatomées, ceux retrouvés dans les couches de sédiments suffisent à reconstituer les peuplements anciens. Ainsi, de la même manière que les sédiments issus d'un carottage du fond d'un lac renseignent sur l'évolution des paramètres physico-chimiques d'un milieu lacustre, les frustules de diatomées traduisent l'évolution des peuplements correspondants.

Cette intégration de l'évolution temporelle dans l'analyse permet donc d'évaluer, en plus de l'état écologique du milieu étudié, sa stabilité. Le lac pris en compte est-il une référence stable dans le temps ou est-il soumis à des évolutions physiques, chimiques ou

biologiques, d'origine anthropique ou non, remettant en cause son caractère de "référence" ?

La première partie de cette étude consistera donc à évaluer la stabilité temporelle des huit lacs d'études, ainsi que les liens entre le compartiment biologique et les caractéristiques physico-chimiques du sédiment de chacun des sites étudiés.

La deuxième partie de cette étude porte sur l'élaboration d'un début de typologie de ces lacs en fonction de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Un peuplement-type de diatomées pourra alors être proposé pour chacun des lacs.

En vue de répondre à ces différents objectifs, plusieurs types de descripteurs ont été retenus:

- descripteur temporel (datation des sédiments);
- descripteurs physiques (granulométrie des sédiments);
- descripteurs physico-chimiques (pH, teneur en nutriments, en carbone, etc., des sédiments);
- descripteurs de perturbation toxique (dosage des micropolluants dans les sédiments);
- descripteurs biologiques (pigments phytoplanctoniques et diatomées).

La diversité des données à recueillir a ainsi nécessité une collaboration entre :

- le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) du CNRS de Gif-sur-Yvette qui a fourni les données pour la datation des sédiments (radiochronologie) ;
- le Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LSE) de l'ENTPE de Vaulx-en-Velin qui a fourni les données de la granulométrie laser des sédiments ;
- l'INRA de Thonon qui a fourni les données physico-chimiques ainsi que les analyses des pigments du phytoplancton dans les sédiments ;
- le Laboratoire Environnement, Dynamique et Territoire de Montagne (UMR CNRS 5024) de l'Université de Savoie qui a fourni la demi-carotte de sédiment pour le lac d'Anterne ;
- et le GREBE qui, outre la synthèse et l'interprétation des données, a mis en œuvre les échantillonnages et procédé aux déterminations des diatomées.

Enfin, les investigations de terrain n'auraient pu être menées à bien sans la collaboration des Parcs Nationaux du Mercantour et des Ecrins, ainsi que des Réserves Naturelles du lac de Remoray et de Sixt-Passy.

## II) MATERIEL & METHODES

### 1) Présentation des sites d'études

Huit lacs du district Rhône-Méditerranée ont été retenus par l'Agence de l'Eau RM&C pour cette étude. Deux sites se situent en Franche-Comté, il s'agit des lacs de Remoray et de Chalain, trois en Rhône-Alpes, lacs de Lauvitel, d'Anterne et de Vallon, et les lacs de Vens 1<sup>er</sup>, Nègre et des 9 Couleurs qui se situent en Provence-Alpes-Côte-D'azur (cf. figure 1). Tous ces lacs sont naturels et d'origine glaciaire.

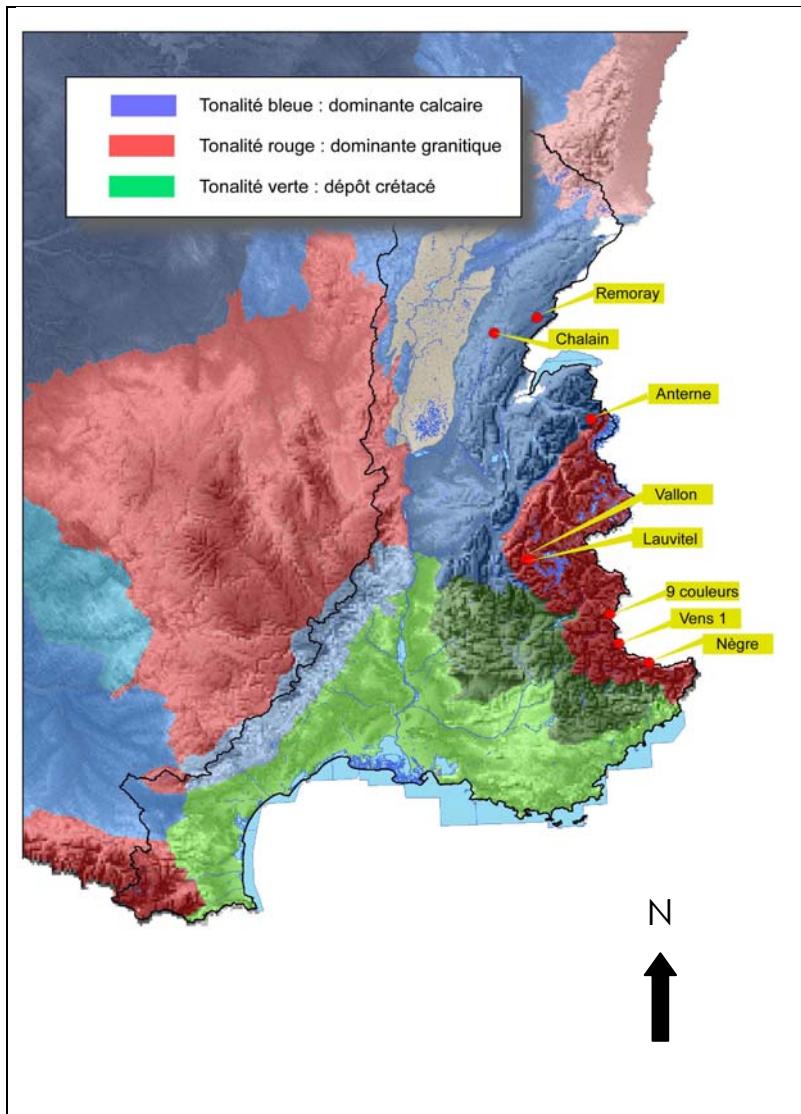


Figure 1 - Localisation des plans d'eau d'étude sur fond géomorphologique du bassin hydrographique RM&C (délimité en noir).

### 1.1) Lac des 9 Couleurs

Ce lac est situé à proximité de la frontière italienne, sur la commune de Saint Paul dans les Alpes-de-Haute-Provence (04), à 2841m d'altitude. 9 Couleurs est le lac le plus élevé de cette étude et draine la plus petite surface de bassin versant (85 ha) pour une superficie de 11 ha. C'est un lac privé d'une profondeur maximale de 27m.

L'environnement du lac des 9 Couleurs est très minéral, dominé par des terrains sédimentaires du secondaire. Il ne présente pas de réseau hydrographique de surface et est alimenté par la fonte des neiges, les eaux repartant par des pertes à travers les éboulis. Le lac des 9 Couleurs est un lac de haute montagne à berge dénudées, défini comme type N2 par la typologie des plans d'eau du CEMAGREF<sup>1</sup>.

A cette altitude, l'impact humain est faible et se résume aux activités de loisirs de type randonnée. La figure 2 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

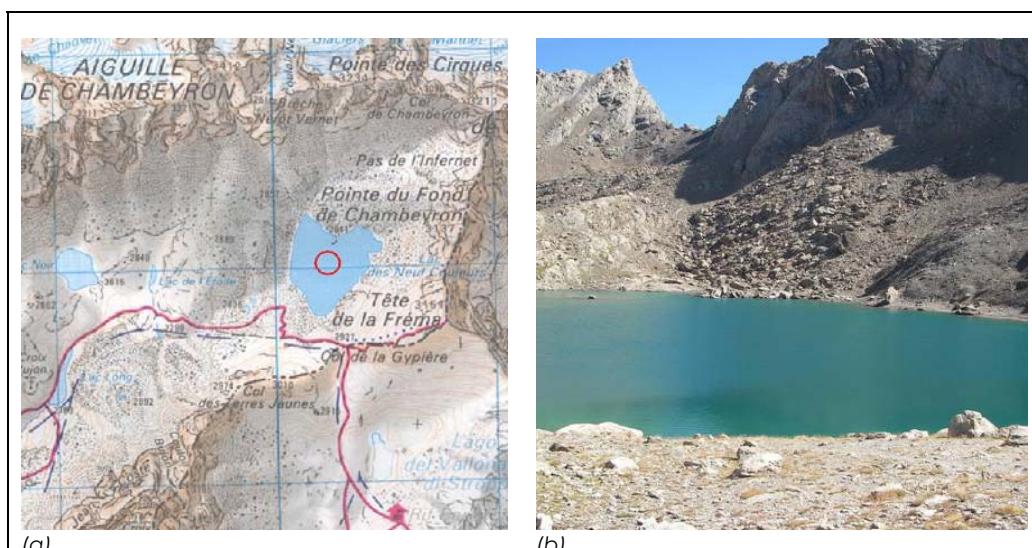


Figure 2 - Présentation du lac des 9 Couleurs. (a) Extrait de carte IGN 3538 ET. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac des 9 Couleurs (05 septembre 2007).

### 1.2) Lac d'Anterne

Situé en Haute-Savoie (74) sur la commune de Passy, au sein de la réserve naturelle de Sixt-Passy, le lac d'Anterne se situe à 2061m d'altitude. Avec une profondeur maximale de 13m, il est le moins profond et un des plus petits lacs de cette étude (12ha). Son bassin versant, d'une superficie de 336ha, est essentiellement occupé par des pelouses alpines et des éboulis en pied de falaise. Des développements tourbeux importants jouxtent également le lac. Sa lithologie est essentiellement composée de marnes et de schistes du Jurassique. Il

<sup>1</sup> Aquascope – Gay-Environnement, 2002. Notes sur la typologie des plans d'eau. SEQ Plan d'eau et directive-cadre. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durables – Agences de l'Eau. 11p.

est classé N1 selon la typologie des plans d'eau du CEMAGREF, soit comme un lac de haute montagne avec zone littorale. L'alimentation a lieu lors de la fonte des neiges par huit tributaires. Au niveau de l'émissaire, les eaux s'engouffrent dans une perte pour ressortir 172m en contrebas.

Les pressions anthropiques limitées se caractérisent par le passage de randonneurs empruntant le GR5 et par la présence de deux refuges installés à proximité. Les abords du lac sont également utilisés comme prairies d'estive, avec notamment 1280 moutons et 50 chèvres (données de 2007). Aucune incidence sur la qualité des eaux des tributaires du lac n'a pu être détectée par le gestionnaire de la réserve (comm. pers. D. Gerfaud-Valentin, coordinateur des gardes des réserves de Haute-Savoie). Enfin, un alevinage en truite fario est réalisé annuellement. Cependant, aucune ne fut retrouvée lors de l'inventaire piscicole mené par l'ONEMA en septembre 2007. La figure 3 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

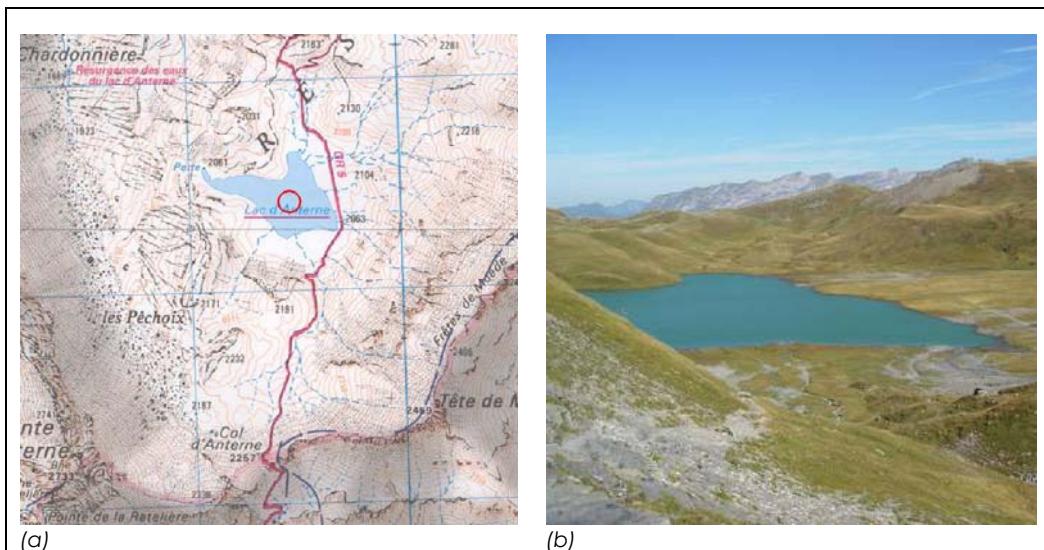


Figure 3 - Présentation du lac d'Anterne. (a) Extrait de carte IGN 3528 ET. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac d'Anterne, le 12 septembre 2007.

### 1.3) Lac de Chalain

Le lac de Chalain, situé sur la commune de Fontenu (Jura) est le plus grand lac de cette étude (230 ha) mais aussi le plus bas (488 m). Son bassin versant est important, 3850ha, occupé à 60% par des forêts de feuillus et de résineux, et à 40% par des prairies de pâture utilisées pour des élevages extensifs. La lithologie est dominée par des dépôts sédimentaires, calcaires du Jurassique moyen et supérieur et des moraines. Le lac de Chalain est classé N4 selon la typologie des plans d'eau du CEMAGREF, soit comme un lac de moyenne montagne calcaire profond à zone littorale.

L'alimentation du lac se fait principalement par les ruisseaux du Moulin, des Canes et de Fontenu, issu d'exsurgences localisées au fond de la reculée de Chalain. D'autre part, le lac reçoit les eaux du ruisseau de la Fontaine froide, de celui de la combe Verne issu d'une zone humide en bordure de la route de Doucier, ainsi que de différents apports modestes drainant les prairies et les marais environnants<sup>2</sup>.

L'installation d'une centrale hydroélectrique en 1904 a court-circuité l'exutoire du lac de Chalain qui formait le Bief de l'Œuf après sa confluence avec Bief de la Côte. Depuis lors, une partie des eaux du lac emprunte une conduite souterraine à la pointe Nord-Ouest du lac et alimentent une usine hydroélectrique EDF installée en bordure de l'Ain. Lors de très hautes eaux, un déversoir évacue une partie de l'eau dans le Bief de l'œuf<sup>3</sup>. Au niveau de son exutoire, les installations ont entraîné un marnage important, dommageable pour l'équilibre écologique du lac et la stabilité des berges. Les actions issues d'une convention signée en 1991 ont permis de réduire l'importance du marnage.

La fréquentation touristique, concentrée autour du lac, atteint 10 000 personnes en été, alors que la population à l'année n'est que de 300 habitants, supposant un impact non négligeable sur le lac. L'essentiel des effluents issus des communes de Marigny, Fontenu et Saffloz et de 2 campings, est traité dans une station d'épuration de 5000 eq/hab (comm. pers. M. Thomas, Régie Départementale de Chalain-Vouglans).

La figure 4 présente un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.



Figure 4 - Présentation du lac de Chalain. (a) Extrait de carte IGN 3326 OT. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac de Chalain, le 03 mai 2007.

<sup>2</sup> SRAE Franche-Comté, 1986. Lac de Chalain (Jura). Etude écologique, 116 pages + annexes.

<sup>3</sup> DIREN Franche-Comté. 1999. Les lacs du département du Jura et leurs bassins-versants. – Synthèse des données – Propositions.

## 1.4) Lac de Lauvitel

Situé sur la commune du Bourg d'Oisans en Isère (38), le lac de Lauvitel comprend une partie de la réserve intégrale du Fond du Lauvitel, incluse dans la zone centrale du parc national des Ecrins. L'essentiel du bassin versant capté, constitué à 60% par des éboulis rocheux et des rochers et à 40% par des pelouses, est compris dans la réserve. Localisé à 1495m, il montre la profondeur la plus importante des 8 lacs de l'étude (68 m). Il présente une superficie de 37ha pour un bassin versant de 1554ha. La géologie y est dominée par des schistes cristallins et des granites du Pelvoux. Il est à noter que le lac de Lauvitel est le seul de cette étude à avoir une double origine, glaciaire et tectonique. En effet, la vallée est barrée par une moraine glaciaire surplombée par des éboulis rocheux. Selon la typologie des plans d'eau du CEMAGREF, le lac de Lauvitel est de type N2, soit comme un lac de haute montagne à berge dénudées.

En phase de dégel, six tributaires alimentent le lac de Lauvitel. Le ruisseau de la Pisso, le plus important d'entre eux, draine le vallon du fond de Lauvitel et contribue à la formation au sud du lac d'une zone deltaïque graveleuse. Aucun émissaire superficiel n'est visible, à part des écoulements sous-moraniques débouchant en plusieurs points entre 100m et 150m en contrebas. Une fois le niveau maximal du lac atteint lors de la fonte des neiges, le marnage annuel peut être supérieur à 20m.<sup>4</sup> Les pressions anthropiques y sont très réduites. Si le secteur servait autrefois d'alpage, l'estive ne concerne plus qu'une dizaine de vaches.

La figure 5 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

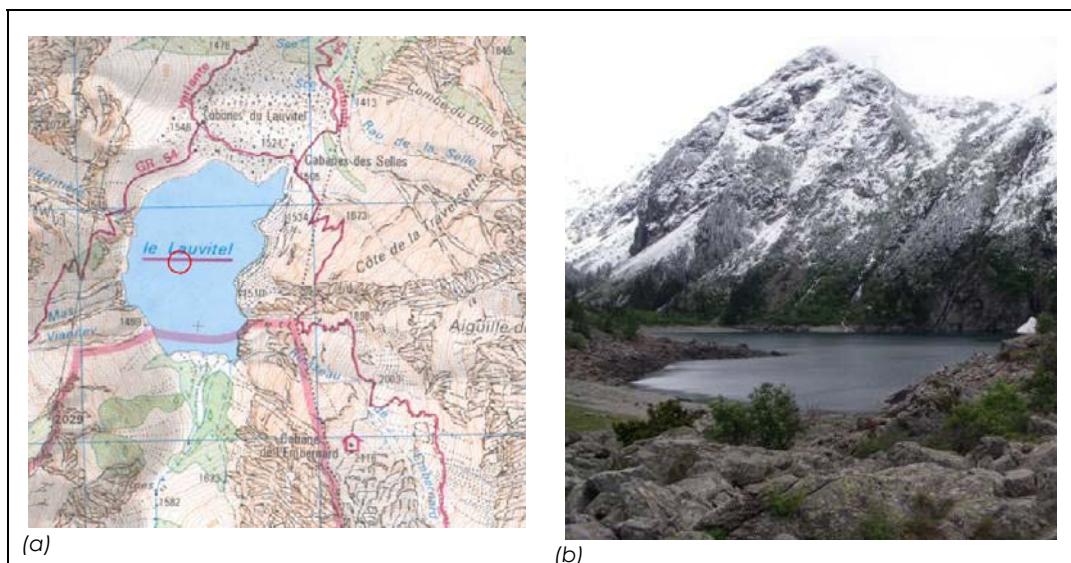


Figure 5 - Présentation du lac de Lauvitel. (a) Extrait de carte IGN 3336 ET. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac de Lauvitel, le 29 mai 2007..

<sup>4</sup> Université de Provence-Marseille. Décembre 2000. Etude hydrobiologique d'un lac d'altitude du Parc National des Ecrins : le lac de Lauvitel.

### 1.5) Lac Nègre

Situé sur la commune de Valdeblore dans les Alpes-Maritimes (06), ce lac est inclus dans la zone centrale du parc national du Mercantour, à 2354m d'altitude. Drainant un bassin versant de 200ha, il a une profondeur maximale de 28m pour une superficie de 10ha. Son environnement est très minéral avec de rares pelouses. Localisé sur un substrat granitique, il présente également des dépôts glaciaires. Différentes sources alimentent plus ou moins directement le lac Nègre. Son exutoire prend la forme d'un petit torrent qui s'écoule dans un vallon sensiblement encaissé. Lac de haute montagne à berges dénudées, il est de type N2, selon la typologie des plans d'eau du CEMAGREF.

Des sondages furent autrefois entrepris près du lac, mais l'activité humaine se réduit aujourd'hui à la randonnée.

La figure 6 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

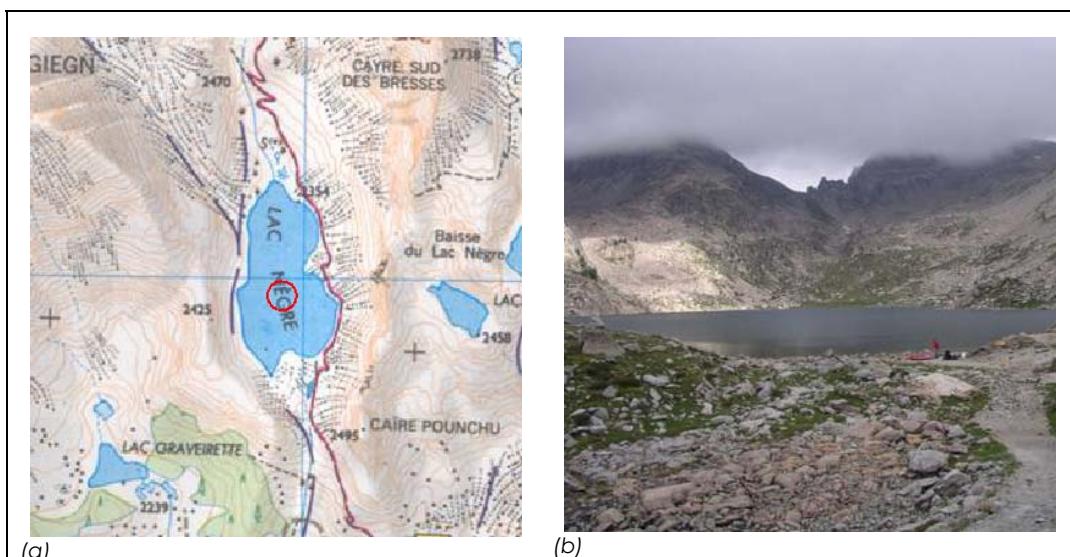


Figure 6 - Présentation du lac Nègre. (a) Extrait de carte IGN 3641 ET. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac Nègre, le 02 juillet 2007.

### 1.6) Lac de Remoray

Situé sur la commune de Labergement-Sainte-Marie dans le Doubs (25), à 850m d'altitude, le lac de Remoray est classé en zone Natura 2000. De plus, l'extension de la zone de marais largement préservée a permis d'y créer en 1980 la réserve naturelle du lac de Remoray. Le lac présente une profondeur maximale de 27m et une superficie de 95ha. Le bassin versant d'une surface de 2990ha est essentiellement occupé par des forêts de résineux et des prairies naturelles.

La lithologie du site est constituée de calcaires du Jurassique et de moraines glaciaires. Le lac de Remoray est alimenté par trois tributaires, la Drésine, le Lhaut et le Remoray, et un seul émissaire, la Taverne, affluent du Doubs, permet l'écoulement des eaux. Le lac est de type N4, soit un lac de moyenne montagne calcaire profond à zone littorale, selon la typologie CEMAGREF des plans d'eau.

Les pressions sont surtout dues aux pollutions en provenance des différents villages situés sur le bassin versant du lac. Cependant ces dernières semblent globalement résorbées ou en voie de l'être (comm. pers. B. Tissot, réserve naturelle de Remoray):

- Les eaux usées de Remoray ont été raccordées au réseau et à la STEP de Pontarlier en 1993. Des problèmes de branchements inadéquats ont persisté jusqu'en 2000 mais ils sont actuellement résolus. Un problème demeure au niveau du bourg du Bougeons mais le raccordement à la STEP est en cours.
- Le point noir porte essentiellement sur la présence d'une scierie sur la commune de Bougeons et son impact sur la Drésine en pesticides issus du traitement du bois. Des investissements importants ont été réalisés par l'entrepreneur concerné mais ils n'ont pas eu les résultats escomptés. La scierie a été rachetée et devait être réinstallée à compter de l'été 2008 sur un site équipé d'une plateforme de récupération des jus issus du traitement du bois.
- Enfin, une mise aux normes des bâtiments d'élevage fut réalisée entre 1993 et 1998. Cependant, un diagnostic mis en œuvre par le gestionnaire de la réserve et la chambre d'agriculture a mis en évidence un certain nombre de dysfonctionnements.

La figure 7 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

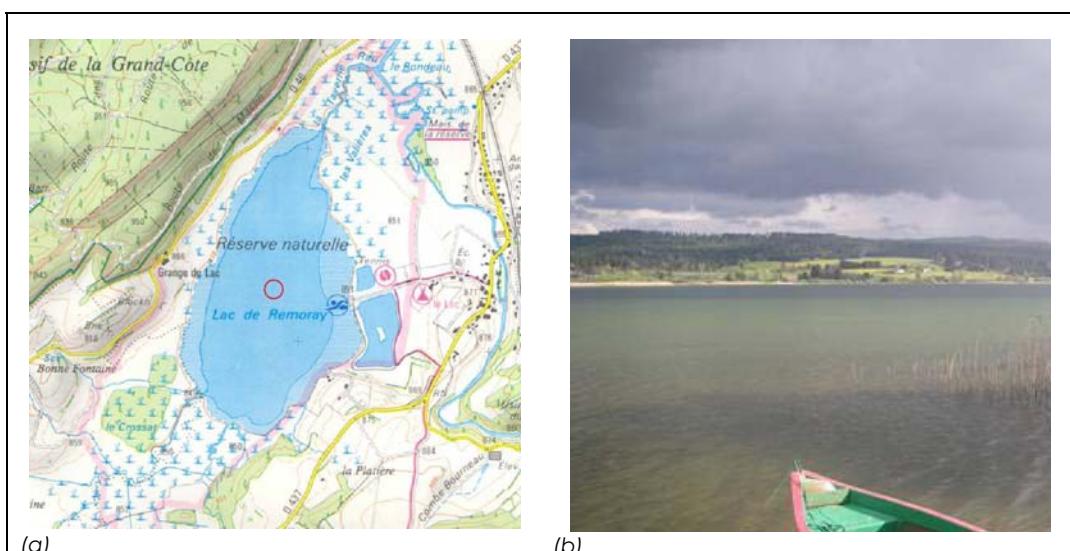


Figure 7 - Présentation du lac Remoray. (a) Extrait de carte IGN 3426 OT. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac Remoray, le 03 mai 2007.

### 1.7) Lac du Vallon

Situé sur la commune de Chantelouve, en Isère (38), le lac du Vallon est inclus dans la zone centrale du Parc National des Ecrins à 2510m d'altitude. Il présente une morphologie très encaissée. D'une profondeur maximale de 47m pour une surface de 14ha, il draine un petit bassin versant de 125ha. Sa lithologie est dominée par des faciès granitiques. Ce lac est classé N2 selon la typologie CEMAGREF des plans d'eau, soit comme un lac de haute montagne à berges dénudées.

En l'absence de tributaire bien constitué, l'alimentation du lac du Vallon se fait de manière diffuse lors de la fonte des neiges et des quelques glaciers relictuels qui dominent le bassin versant. La Malsanne qui constitue l'émissaire du lac présente un débit soutenu à l'exutoire. Les pressions anthropiques dues à la fréquentation sont limitées de par le dénivelé important.

La figure 8 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

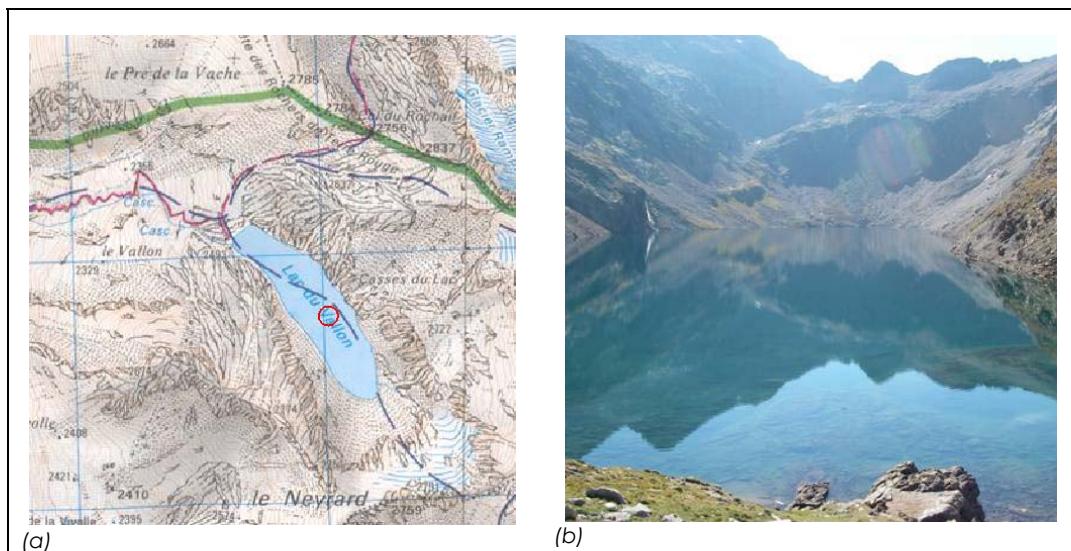


Figure 8 - Présentation du lac du Vallon. (a) Extrait de carte IGN 3336 ET. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac du Vallon, le 10 septembre 2007.

### 1.8) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

Le lac de Vens 1<sup>er</sup> est situé dans la zone centrale du Parc National du Mercantour, sur le territoire de la commune de Saint-Etienne-de-Tinée dans les Alpes-Maritimes (06), à 2327m d'altitude. D'une profondeur maximale de 32m et d'une superficie de 11ha, il draine un bassin versant de 402ha. Ce dernier est occupé par des pelouses alpines et de nombreux éboulis et rochers. Le lac se situe au fond d'un cirque glaciaire sur un substrat cristallin (agmatites à biotites, muscovites et sillimanites). Il est intéressant de noter ici la présence de

filons à plomb, cuivre et zinc dans le vallon de la Tortisse situé à proximité et susceptibles d'avoir un impact sur le lac. Alimenté par le ruisseau de Terre Rousse et celui issu du lac de Fourchas situé en amont, le lac de Vens 1<sup>er</sup> se déverse dans quatre lacs successifs avec lesquels il forme un réseau avant de donner le ruisseau de Vens.

Tout comme les lacs des 9 couleurs, Nègre, de Lauvitel et du Vallon, le lac de Vens 1<sup>er</sup> est un lac de hautes montagnes à berge dénudées, soit de type N2 selon la typologie CEMAGREF des plans d'eau.

Les pressions anthropiques sont extrêmement limitées et se résument à la fréquentation de randonneurs et de pêcheurs. A noter qu'un refuge domine également le lac.

La figure 9 montre un extrait de carte IGN du lac et le positionnement de la zone de carottage, ainsi qu'une photographie prise le jour des prélèvements.

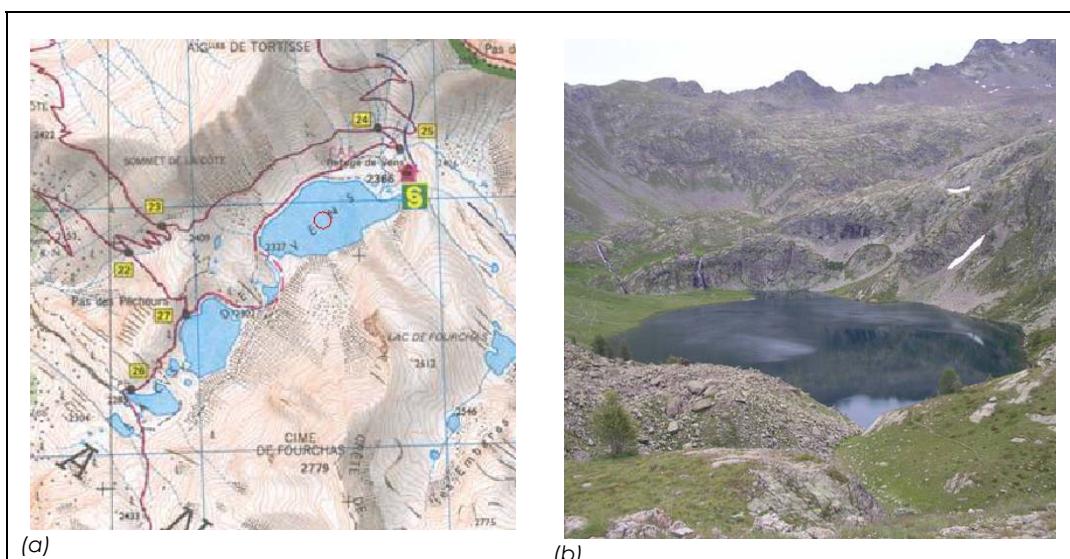


Figure 9 - Présentation du lac Vens 1er. (a) Extrait de carte IGN 3639 OT. Le cercle rouge situe la zone de carottage. (b) Photographie du lac Vallon, le 03 juillet 2007.

## 2) Protocole d'échantillonage

### 2.1) Carottage des sédiments

Les carottes de sédiments sont réalisées à l'aide d'un carottier gravitaire (figure 10) permettant l'extraction de carottes de plus de 60cm, afin d'intégrer une période d'au moins 150 ans. Les carottages sont réalisés au niveau de la zone la plus profonde du lac afin d'éviter les zones proches des rives ou celles soumises à des courants importants, dans un souci de représentativité de l'ensemble du lac.



Figure 10 - Carottier gravitaire.

Trois carottes sont prélevées par lac, afin de disposer de répliques en laboratoire en cas de destruction de l'une d'entre elles lors des manipulations. Le choix se porte sur la carotte semblant présenter une couche de sédiment intègre, donc peu perturbée par le prélèvement.

### 2.2) Campagnes d'échantillonnage

Le tableau I récapitule les caractéristiques des campagnes de prélèvement de sédiment.

	Vens 1er			Nègre			9 Couleurs			Lauvitel		
Date de prélèvement	02/07/07			03/07/07			05/09/07			29/05/07		
Coordonnées Lambert II du point de prélèvement	X (km)			967,193			992,000			959,830		
	Y (km)			1934,492			1918,625			1959,095		
Carottes	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Longueur (m)	0,70	0,82	0,75	0,62	0,63	-	0,82	0,75	0,46	0,50	0,82	0,91
Profondeur de prélèvement (m)	27	31	32	24	26	-	30	20	19	57	56	57
	Anterne			Vallon			Remoray			Chalain		
Date de prélèvement	12/09/07			10/09/07			03/05/07			03/05/07		
Coordonnées Lambert II du point de prélèvement	X (km)			944,500			890,436			899,825		
	Y (km)			2119,800			2004,191			2204,318		
Carottes	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Longueur (m)	0,56	-	-	0,75	0,89	0,82	0,85	0,84	0,82	0,77	0,76	0,78
Profondeur de prélèvement (m)	-	-	-	42	41	43	27	27	27	30	30	30

Tableau I - Récapitulatif des campagnes de prélèvement.

En ce qui concerne le lac Nègre, seules 2 carottes ont été prélevées après une dizaine de tentatives infructueuses. En effet, de mauvaises conditions météorologiques n'ont

pas permis de réaliser le troisième carottage. Le lac de Lauvitel a également présenté quelques difficultés lors des carottages, en raison de la présence de bloc gênant le prélèvement de sédiments fins au fond du plan d'eau.

Enfin, la carotte de sédiment analysée pour le lac d'Anterne a été fournie par F. Arnaud du laboratoire Environnement, Dynamique et Territoire de la Montagne de l'Université de Savoie (UMR CNRS 5204).

### 2.3) Prélèvements de pleine eau

Des prélèvements de pleine eau ont été effectués à l'aide d'une bouteille à prélèvement afin d'évaluer le peuplement phytoplanctonique actuel des différents lacs étudiés (cf. tableau II). L'échantillonnage est réalisé au niveau du point le plus profond de chacun des plans d'eau. Il s'agit d'un prélèvement intégrant la zone euphotique, tranche d'eau comprise entre la surface et la zone trophogène, estimée à 2,5 fois la transparence mesurée au disque de Secchi. Les différentes profondeurs de prélèvements sont relevées.

Un aliquote de l'échantillon intégré est prélevé et conservé dans un flacon en verre de 500mL. Celui-ci est fixé sur le terrain avec une solution de *Lugol* alcalin pour une concentration finale de 0,5% dans l'échantillon.

Les listes floristiques pour chacun des lacs sont fournies en annexe 3 de ce rapport.

	Vens 1er	Nègre	9 Couleurs	Lauvitel
Date de prélèvement	02/07/07	03/07/07	05/09/07	29/05/07
Transparence (m)	9	5,5	4,5	6
Zone euphotique (m)	22	14,05	11,25	15
Nombre de prélèvements	5	5	5	4
Profondeur échantillonées (m)	0, 5, 10, 15 et 20	0, 3, 6, 9 et 12	0, 3, 6, 9 et 12	0, 5, 10 et 15
	Anterne	Vallon	Remoray	Chalain
Date de prélèvement	12/09/07	10/09/07	03/05/07	03/05/07
Transparence (m)	1,5	11,5	3,3	2,5
Zone euphotique (m)	3,75	28,75	8,25	6,25
Nombre de prélèvements	5	6	5	4
Profondeur échantillonées (m)	0, 1, 2, 3 et 4	0, 4, 8, 12, 16 et 20	0, 2, 4, 6 et 8	0, 2, 4 et 6

Tableau II - Récapitulatif des campagnes de prélèvement de phytoplancton.

## 3) Analyses

### 3.1) Acquisition des données

#### 3.1.1) Préparation des carottes

La carotte est coupée en deux dans le sens de la longueur, puis débitée en 20 tranches d'épaisseur régulière. Une demi-tranche est utilisée pour les analyses physico-

chimiques et hydrobiologiques, l'autre moitié pour la datation et la granulométrie laser. Les tranches sont numérotées de 1 à 20, de la couche superficielle vers le fond.

### 3.1.2) Radiochronologie

Les datations des huit carottes (une par lac d'étude) ont été réalisées par le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement du CNRS de Gif-sur-Yvette.

Chaque carotte a été laissée à sécher puis découpée suivant une maille de 0,5cm à 1cm. Quatre isotopes radioactifs ont ensuite été mesurés par spectrométrie gamma sur les échantillons.

Les isotopes mesurés sont les suivants :

- $^{7}\text{Be}$  : il permet de mettre en évidence les phénomènes de mélange entre le sédiment de surface et les couches plus anciennes pouvant biaiser la datation;
- $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  : il est utilisé pour mesurer la vitesse de sédimentation du lac de manière à dater les segments de carottes les uns par rapport aux autres;
- $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$  : la mesure de ces 2 isotopes permet de « caler » les datations par rapport à deux événements majeurs. Un pic commun marque les essais nucléaires de 1963, alors qu'un pic de  $^{137}\text{Cs}$  seul marque les retombés de l'accident de Tchernobyl en 1986.

Cette méthode de datation a cependant deux limites d'utilisation :

- en raison de la maille de 0,5cm à 1cm choisie, une vitesse de sédimentation très faible (1mm/an) gêne la séparation des deux pics de  $^{137}\text{Cs}$ ;
- le calcul de la vitesse de sédimentation n'est réalisé que sur une période de 110 ans.

### 3.1.3) Granulométrie laser

Un échantillon de surface de chaque demi-carotte est prélevé à la spatule tous les centimètres sur les 30 premiers cm puis avec un pas de 2 cm. La mise en solution dans l'eau de chaque prélèvement se fait par des ultrasons de manière à décoller les petites particules détritiques des plus grosses.

Le bruit de fond est préalablement mesuré, puis la solution est passée dans une cellule de mesure traversée par un faisceau laser incident calibré à 670nm, mesurant la taille des particules.

Le grain moyen est alors calculé pour chaque échantillon de chaque carotte au moyen d'une macro Excel (gradistat). Les représentations graphiques du grain moyen ont été réalisées sous Microsoft Excel et celle représentant le spectre de l'importance relative des tailles de particules en fonction de la profondeur sous Matlab.

### 3.1.4) Physico-chimie

Sept descripteurs physico-chimiques ont été retenus et sont analysés dans chacune des 20 tranches de sédiments réalisées sur les carottes:

- le pH : paramètre structurant l'écosystème lacustre, notamment les communautés de diatomées. Il a été mesuré suivant la norme NF ISO 10390.
- l'alcalinité : contrairement au pH qui est une mesure d'intensité, l'alcalinité reflète la capacité du milieu à absorber des protons. C'est son pouvoir tampon face aux phénomènes d'acidification.
- la teneur en silice : la silice est un élément clé pour les diatomées en raison de leur frustule siliceux. Elle a été dosée par méthode colorimétrique après mise en solution par fusion alcaline<sup>5</sup>.
- le phosphore total : souvent considéré comme facteur limitant, le phosphore est un nutriment clé pour la croissance des communautés phytoplanctoniques. Il a été mesuré par une méthode de fusion à la soude et dosé par la méthode de Murphy-Riley au bleu de molybdène<sup>6</sup>.
- l'azote total : autre nutriment majeur, il traduit avec le phosphore le niveau trophique du milieu. L'azote a été dosé suivant la norme NF ISO 10694.
- le carbone total : il permet, avec l'azote, le calcul du rapport C/N, renseignant sur l'origine et l'âge de la matière organique accumulée. Il a été dosé suivant la norme NF ISO 10694.
- la matière organique : elle donne une image de la productivité du milieu. Elle a été dosée suivant la norme NF ISO 11465.

L'ensemble des dosages a été réalisé par l'INRA de Thonon.

---

<sup>5</sup>Pansu, M. et J. GAUTHEYROU, 2003. L'analyse du sol, minéralogique, organique et minérale – SPRINGER Ed., ISBN : 2-287-59774-3

<sup>6</sup> WILLIAMS J.D.H., J.K. SYERS & T.N. WALKER, 1967. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's Procedure. Soil Sci. Soc. Amer. Proc.; 31,736

### 3.1.5) Micropolluants

Certains métaux présentent une toxicité directe sur les êtres vivants. D'autres, absorbés en petites quantités sont indispensables au métabolisme cellulaire. Cependant, ces mêmes métaux en concentrations plus élevées peuvent s'avérer toxiques.

Huit métaux ont été mesurés suivant la norme NF X 31147 dans les 20 tranches de carotte de chacun des 8 lacs d'étude :

- le zinc : le zinc est un métal mais aussi un oligo-élément nécessaire aux végétaux. Il peut ainsi provenir de la métallurgie et de l'agriculture. Essentiel dans l'apport nutritif des végétaux à faible dose, il peut devenir毒ique si celle-ci augmente.
- le cadmium : métal toxique sous toutes ses formes. Il est issu de la métallurgie du zinc dont tous les minéraux le contiennent, mais également des engrains phosphorés de synthèse.
- le plomb : autre micropolluant toxique souvent associé au zinc, il a été introduit dans certains additifs pour carburants automobile et est toujours utilisé dans les accumulateurs électriques.
- le nickel : le nickel est un métal entrant dans la composition d'enzymes de détoxicification de certaines diatomées. Il est cependant toxique à certaines concentrations.
- le cuivre : c'est un oligo-élément dont la toxicité est avérée. C'est également un des rares métaux existant à l'état natif.
- le chrome : il s'agit également d'un oligo-élément dont l'excès présente un potentiel toxique. Il est également un rejet de la métallurgie.
- le sélénium : ce métal est un oligo-élément non toxique, indispensable pour le développement des diatomées.
- l'arsenic : présent à l'état natif, c'est un composé très toxique.

L'ensemble des dosages a été réalisé par l'INRA de Thonon.

### 3.1.5) Hydrobiologie

#### 3.1.5.1) Phytoplancton de pleine eau

Le dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée a été réalisé suivant la norme NF EN 15204<sup>7</sup>, correspondant à la méthode Utermöhl.

L'échantillon est d'abord homogénéisé puis versé dans la chambre de sédimentation. Le point sensible est de disposer de suffisamment de matériel biologique sédimenté sans qu'une concentration trop élevée ne nuise à l'observation et à l'identification.

La sédimentation a lieu à température ambiante et à l'obscurité, à raison de 4 heures par cm de hauteur de colonne de sédimentation.

Le phytoplancton est alors dénombré par transect, de 1 à 4, jusqu'à obtenir un effort de comptage d'au moins 400 objets algaux, tous taxons confondus. Un objet algal peut être une cellule, un cœnobe (colonie sphérique d'algues unicellulaires), un filament (par unité de 100 µm de long) ou une colonie en fonction des taxons.

En ce qui concerne les diatomées, seuls les frustules avec plastes sont dénombrés. Les résultats sont fournis en nombre d'objets algaux par mL d'échantillon.

#### 3.1.5.2) Pigments photorécepteurs et accessoires

Les pigments photorécepteurs et accessoires permettent d'évaluer les peuplements phytoplanctoniques anciens, suivant leurs présences/absences et leur présence relative au sein de la communauté.

L'ensemble de l'analyse a été réalisée par l'INRA de Thonon où des extractions à l'acétone et au méthanol ont été effectuées sur les carottes. Un dosage par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) est ensuite réalisé pour mesurer l'ensemble des pigments.

#### 3.1.5.3) Diatomées

La préparation des lames de diatomées a été réalisée suivant le protocole ci-après.

- Dans un premier temps, l'échantillon est séché pendant 24 heures dans une étuve à 60°C. Puis il est réduit en sable fin dans un mortier et minéralisé par traitement chimique. Un gramme est ensuite prélevé pour la suite du protocole.

---

<sup>7</sup> NF EN 15204, 2006. Qualité de l'eau : Norme guide pour le dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée (méthode Utermöhl), AFNOR, 39p.

- Il est d'abord procédé à la destruction de la matière organique : le gramme d'échantillon est complètement dissocié dans un bêcher de 200 ml avec 40 ml de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) oxygénée à 130 volumes. Le bêcher est porté à douce ébullition pendant au moins 30 minutes. La solution refroidie est centrifugée pendant 25 minutes à 2500 tours par minute. L'intérêt de la centrifugation est de provoquer la sédimentation des frustules dans le culot. Ce dernier est rincé à l'eau déminéralisée, puis centrifugé à nouveau. Le surnageant est éliminé après chaque centrifugation.
- L'étape suivante consiste à éliminer les carbonates : le culot issu de la centrifugation est dilué avec 40 ml d'acide chlorhydrique (HCl) à 30%. La solution est portée à douce ébullition pendant 30 minutes. Comme précédemment, la solution refroidie est centrifugée pendant 25 minutes à 2500 tours par minute. Le culot, rincé à l'eau déminéralisée, est ensuite centrifugé. Le surnageant est à nouveau éliminé après centrifugation. Cette étape de rinçage est ensuite répétée afin d'éliminer l'acide chlorhydrique.
- Le culot issu de ce deuxième rinçage est dilué dans 200 ml d'eau déminéralisée.
- Dans un deuxième temps, 0,25 ml de la solution obtenue sont montés sur une lamelle de verre circulaire d'un diamètre de 18mm, préalablement dégraissée. L'eau déminéralisée est alors éliminée par évaporation en plaçant la lamelle sur une platine chauffante. La lamelle est ensuite montée sur une lame de verre préalablement chauffée, et montée avec du Naphrax, une résine synthétique d'indice de réfraction de 1,66. Le solvant benzénique du Naphrax est évaporé également sur platine chauffante afin d'obtenir une préparation permanente.
- La qualité de la lame est alors vérifiée sous microscope. Si la densité de frustules s'avère trop faible, la lame est alors remontée en utilisant 500 $\mu$ L de la solution afin de concentrer un plus grand nombre de frustules sur la lame. Au contraire, si la concentration de frustules ou de matière résiduelle sur la lame est trop importante et gêne sa lisibilité et la détermination des frustules, la préparation est alors remontée avec une solution diluée.
- La détermination des frustules est alors réalisée sous microscope à immersion à contraste de phase. Cependant, celle-ci ne porte pas sur l'ensemble des frustules de diatomées présentes sur la lame. Il est procédé à l'observation d'un diamètre de la lamelle en identifiant et en comptant l'ensemble des diatomées présentes sur une surface représentée par un cadre d'une surface de 111,8 mm<sup>2</sup> placé dans l'objectif. Sous l'objectif X100, objectif sous lequel sont déterminés les frustules, celui-ci représente une surface de 0,00118 mm<sup>2</sup>. Si un minimum de 400 diatomées n'est pas atteint à la fin de ce comptage, il est procédé à l'observation d'un deuxième diamètre. Après cette phase, l'ensemble de la lame est parcouru rapidement afin d'identifier la totalité des espèces rares non encore identifiées.

Ce protocole de comptage présente l'avantage de connaître la surface observée de par la taille du cadre placé dans l'objectif et du diamètre de la lamelle, tous deux connus. Il est ainsi possible d'estimer la densité des frustules présents sur la lame. Avec la surface de la lamelle et le volume de solution déposée sur la lame, tous deux également connus, le calcul de la concentration en frustules de diatomées dans la solution de départ est réalisé. Cette concentration est ensuite rapportée au gramme de sédiment, et les listes floristiques peuvent ainsi être exprimées en nombre d'individus par gramme de sédiments, concentration directement comparable entre lames d'un même lac et entre lacs.

Les lames sont numérotées, comme les tranches de carottes auxquelles elles correspondent, de 1 à 20, de la couche superficielle vers le fond.

Enfin, il paraît important de souligner ici les différentes difficultés que nous avons rencontrées lors de la préparation des lames et de l'identification. En effet, la difficulté majeure pour préparer les lames fut dans la dilution de la solution avant le montage de la lame et le compromis à faire entre le nombre de frustules observables et la densité de matière pouvant gêner leur identification. Outre le problème de matière recouvrant en partie certaines frustules ou les empêchant d'être à plat, les années de sédimentation n'ont évidemment pas permis une conservation optimale des frustules. Nombreuses furent celles qui furent en partie ou totalement cassées gênant ou empêchant l'identification.

De plus, la forte présence de diatomées planctoniques, notamment centriques (genres *Cyclotella*, *Aulacoseira*,...) a compliqué la détermination, et l'interprétation par un manque d'informations concernant leur écologie.

### 3.2) Traitement des données

#### 3.2.1) Indices biocénotiques

Dans une première analyse des listes floristiques, issues des 20 lames montées à partir des 20 tranches de chacune des huit carottes analysées, une évolution par lame de quatre indices biocénotiques est fournie.

Les indices biocénotiques retenus sont :

- L'abondance ( $Q$ ) : somme des individus présents, tous taxons confondus,  

$$Q = \sum (q_i), q_i \text{ abondance du } i^{\text{ème}} \text{ taxon} ;$$
- La richesse taxinomique ( $S$ ) : nombre de taxons présents ;
- La diversité taxinomique de Shannon ( $H'$ , Shannon & Weaver, 1963<sup>8</sup>) :  
dépend de la richesse et de la régularité de la distribution des effectifs des différents taxons présents,

---

<sup>8</sup> Shannon C.E. & W Weaver R, 1963. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 117pp.

$$H' = -\sum(q_i/Q)\log_2(q_i/Q) ;$$

- L'équitabilité de Pielou, 1966<sup>9</sup>, ( $J'$ ) qui néglige l'effet de  $H'_{\min}$ ,  
 $J' = H'/\log_2(S)$ .

### 3.2.2) Obtention des profils de traits écologiques

Les listes floristiques obtenues pour chaque lame montée par tranche de carotte de sédiments de chaque lac ont été importées dans le logiciel OMNIDIA version 5.1<sup>10,11</sup>. Ce logiciel, développé pour le calcul de l'Indice Biologique Diatomique, a notamment permis, grâce à son importante base de données écologiques, de calculer de manière automatique des profils écologiques pour chaque liste, donc pour chaque lame. La base de données OMNIDIA utilisée dans le calcul des profils est la mise à jour de 2008 qui a l'avantage, par rapport aux bases précédentes, de prendre en compte les taxons planctoniques, importants en milieu lacustre. Les traits retenus sont ceux définis par Hakansson, 1993<sup>12</sup> pour le pH et par Van Dam, 1994<sup>13</sup> pour les autres traits. Ils sont listés avec leurs modalités respectives dans le tableau III.

<b>Traits</b>	<b>Modalités</b>
1. pH	1.1. acidophile 1.2. circumneutrale 1.3. alcaliphile
2. Statut trophique	2.1. oligotrophe 2.2. oligo-mésotrophe 2.3. mésotrophe 2.4. méso-eutrophe 2.5. eutrophe 2.6. hypereutrophe 2.7. indifférent
3. Oxygénation	3.1. élevée à forte 3.2. modérée 3.3. basse à très basse
4. Saprobies	4.1. oligosaprobe 4.2. β-mésosaprobe 4.3. α-mésosaprobe 4.4. α-méso-polysaprobe 4.5. polysaprobe
5. N-Hétérotrophie	5.1. N-autotrophe sensible à de faibles concentrations en N organique 5.2. N-autotrophe tolérant des concentrations en N élevées 5.3. N-hétérotrophe facultatif 5.4. N-hétérotrophe obligatoire

Tableau III - Traits écologiques et leurs modalités retenues pour le calcul des profils des lames basés sur leurs peuplements en diatomées

<sup>9</sup> Pielou E.C., 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. Journal of Theoretical Biology 13: 131-144.

<sup>10</sup> Lecointe, C., M. Coste & J. Prygiel (1993) - "OMNIDIA" software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. Hydrobiologia 269/270 : 509-513.

<sup>11</sup> Lecointe, C., M. Coste J. Prygiel & ECTOR L., 1999. Le logiciel OMNIDIA version 3, une puissante base de données pour les inventaires de diatomées et pour le calcul des indices diatomiques européens. Cryptogamie Algalogie 20[2] : 131-134.

<sup>12</sup> Hakansson, S. (1993) - Numerical methods for the inference of pH variations in mesotrophic and eutrophic lakes in Southern Sweden - A progress report. Diatom Res. 8 (2): 349-370.

<sup>13</sup> Van Dam H., Mertens S.A., Sinkeldam J., 1994. A coded checklists and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. Netherlands Journal of Aquatic Ecology 28(1): 117-133

Pour des raisons de clarté, certaines modalités ont été regroupées. Ainsi, les 9 modalités de la variable pH et les 5 modalités concernant l'oxygénation ont été regroupées en 3 modalités pour chacun de ces traits.

Enfin, il est important de signaler que les profils sont obtenus par lame, les caractéristiques écologiques des diatomées ne sont pas renseignées sous la forme de spectre écologique mais plutôt de préférendum strict. Ainsi, en ce qui concerne le statut trophique par exemple, un taxa peut être qualifié d'oligo-mésotrophe, même si celui-ci est susceptible de se développer dans des milieux oligotrophes ou mésotrophes.

### 3.2.3) Analyses multivariées

En raison de l'importance du nombre de données (20 lames x 8 lacs pour une liste globale de près de 460 diatomées) et de variables utilisées (taxinomiques, écologiques, physico-chimiques) le recours aux analyses multivariées s'est avéré indispensable. En effet, ces méthodes sont reconnues comme particulièrement efficaces dans la description de l'information contenue dans d'importants tableaux de données. Elles permettent en outre la confrontation d'informations de natures différentes (floristiques et mésologiques par exemple) par couplage de deux tableaux mais également de prendre en compte (analyses inter-classes) ou de réduire (analyses intra-classes) un effet donné.

Cependant, ces analyses sont surtout descriptives et ne fournissent pas de validation statistique. Afin d'y pallier, des tests de permutation (test de Mantel) ainsi que des coefficients de régression ont été calculés afin de vérifier la valeur statistique des analyses multivariées.

Toutes les analyses multivariées et les tests statistiques présentés ici ont été réalisés grâce à la librairie ade4<sup>14</sup> sous logiciel R<sup>15</sup>.

#### 3.2.3.1) Analyse en composantes principales (ACP)

S'appliquant pour des tableaux de variables continues, l'ACP est depuis longtemps utilisée pour décrire synthétiquement les relations linéaires entre les descripteurs de structure de peuplements (Philipeau, 1986<sup>16</sup>) et de mettre en évidence les ressemblances entre relevés. L'ACP a ainsi été utilisée dans cette étude pour rendre compte de la structure des tableaux de données physico-chimiques afin de représenter graphiquement les positions des

<sup>14</sup> Thioulouse, J., S. Dolédec, D. Chessel, & J. M. Olivier. 1997. ADE-4 : a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing* 7:75-83.

<sup>15</sup> Ihaka R. & Gentleman R. 1996. R : a language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 5: 299-314.

<sup>16</sup> Philipeau S., 1986. Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales ? Institut Techniques des Céréales et des Fourrages, Paris. 63p.

différents relevés (tranches de carottes de sédiments) en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.

### 3.2.3.2) Analyse factorielle des correspondances (AFC)

L'AFC permet de synthétiser sur un espace de dimension réduite la plus grande partie de l'information contenue dans un tableau et permet la description des associations pouvant exister entre les deux ensembles de données, contenus par les lignes et les colonnes du tableau analysé (Dervin, 1998<sup>17</sup>).

L'AFC a donc été utilisée dans cette étude pour rendre compte de la structure des tableaux de données floristiques ainsi que du tableau de données des profils de traits. Ceci a permis de représenter graphiquement la position des relevés (tranches de carottes de sédiment) des 8 lacs étudiés en fonction de leurs peuplements de diatomées ainsi qu'en fonction des profils de traits écologiques de ces peuplements. Cette représentation permet d'observer quels relevés sont proches et lesquels se séparent en fonction de leurs peuplements.

### 3.2.3.3) Analyses inter-groupes et intra-groupes

Les analyses inter-groupes et intra-groupes (Dolédec & Chessel, 1987<sup>18</sup>, 1989<sup>19</sup>) permettent d'assigner à chaque ligne du tableau de données une information qualitative, comme l'appartenance de la ligne à un des 8 lacs d'études. Ces deux méthodes ont l'avantage de pouvoir s'appliquer à n'importe quel type d'analyses multivariées, telle que l'AFC et l'ACP.

Ces deux analyses sont complémentaires puisque l'analyse inter-groupes se construit sur ce qui différencie les groupes alors que l'analyse intra-groupe met l'accent sur ce qui est commun aux groupes. La somme de l'inertie inter-groupes et de l'inertie intra-groupes redonne l'inertie totale contenue dans le tableau de données.

Les analyses inter-groupes ont notamment servi de base pour les analyses de co-inertie dans le but de confronter les tableaux floristiques et physico-chimiques pour les lacs d'étude. Elles ont également servies lors de la définition des peuplements-types par lac.

---

<sup>17</sup> Dervin C., 1988. Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle des correspondances ? Institut Techniques des Céréales et des Fourrages, Paris. 75p.

<sup>18</sup> Dolédec S. & D. Chessel, 1987. Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique I. Description du plan d'observation complet par projection de variables. Acta Oecologica, Oecologia Generalis 8 :403-426.

<sup>19</sup> Dolédec S. & D. Chessel, 1987. Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique II. Prises en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistiques. Acta Oecologica, Oecologia Generalis 10 :207-232.

### 3.2.3.4) Analyse de co-inertie

L'analyse de co-inertie (Dolédec & Chessel, 1994<sup>20</sup>) est une méthode de couplage de deux tableaux dont les lignes sont en correspondance.

La co-inertie a ainsi permis de confronter directement les peuplements de diatomées, ou les profils de traits des relevés (tranches de chaque carotte de sédiments) aux tableaux de données physico-chimiques des même relevés.

### 3.2.3.5) Analyse de classification

Une méthode de classification hiérarchique ascendante permet d'effectuer des regroupements entre objets sur la base de similarité entre matrices ou distances.

Dans cette étude, les regroupements ont été réalisés en se basant sur les distances euclidiennes. La méthode de regroupement retenue est celle proposée par Ward en 1963<sup>21</sup>.

Cette méthode a permis de classer les lacs en fonction de leurs peuplements de diatomées, des profils de ces peuplements et des caractéristiques physico-chimiques des tranches de carottes de sédiments.

### 3.2.4) Tests statistiques

En plus des coefficients de régression donnés par l'analyse de co-inertie entre les tableaux de départ, des tests de permutations de Mantel ont pu être réalisés. Ils testent la congruence des matrices de distances issues des 2 analyses confrontées par la co-inertie.

Le test de permutation de Mantel permet de calculer la corrélation linéaire entre deux matrices de proximité de dissimilarité ou de similarité.

---

<sup>20</sup> Dolédec S. & D. Chessel, 1994. Co-inertia analysis: an alternative method for studying species-environnement relationships. Freshwater Biology 31: 277-294.

<sup>21</sup> Ward J.H., 1963. Hierarchical grouping to optimise an objective function. Journal of the American Statistics Association 58: 236-244.

### III) RESULTATS- DISCUSSION

#### 1) Présentation générale des données recueillies

##### 1.1) Carottes

La figure 11 présente pour chaque lac une photographie et un schéma de la carotte étudiée.

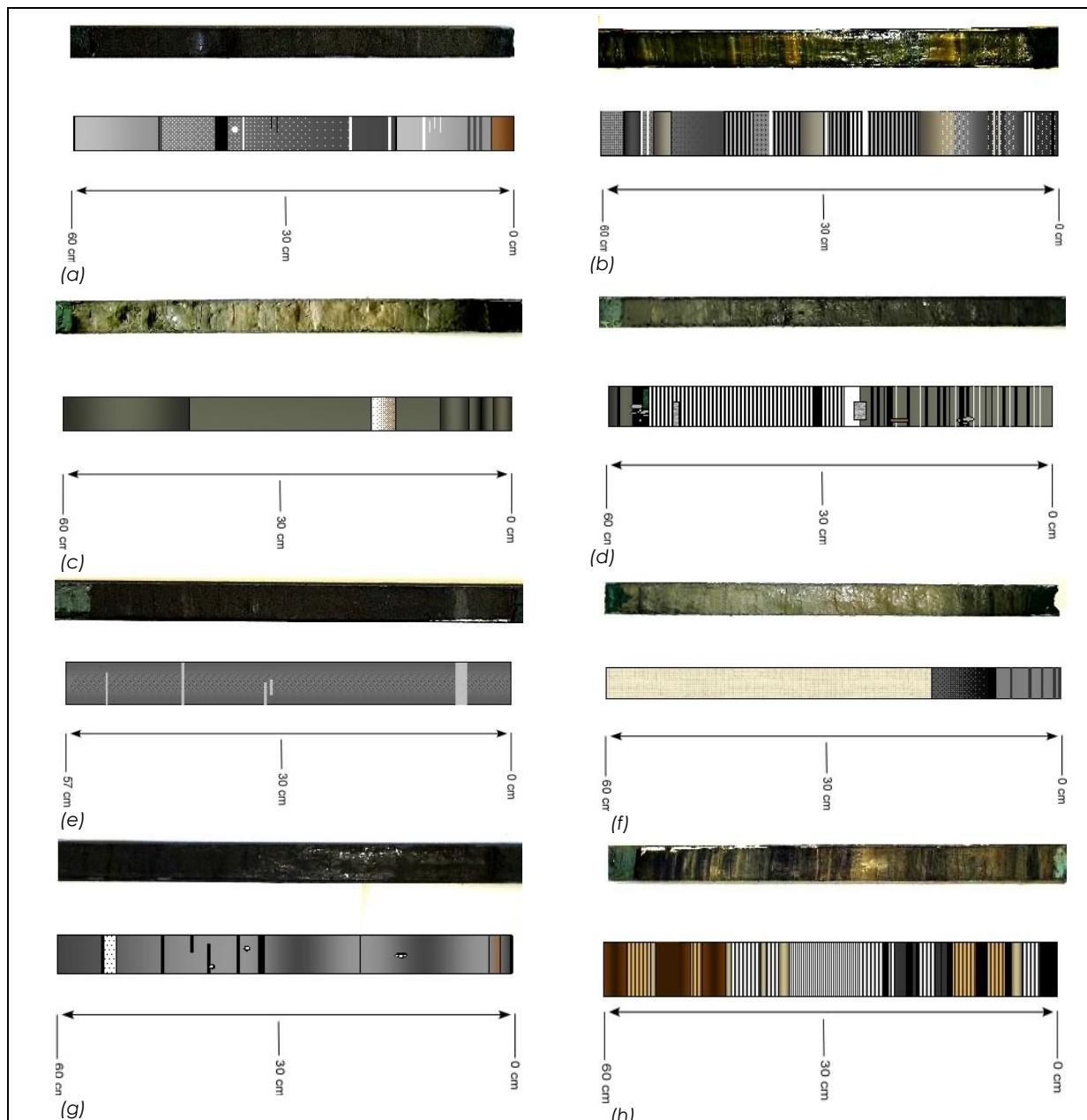


Figure 11 - Carottes de sédiment prélevée sur les lacs d'étude et retenues pour les analyses. Par lac sont présentés, en haut, une photographie de la carotte après séchage, et en bas un schéma de la carotte présentant les successions de lamination. (a) lac des 9 Couleurs ; (b) lac d'Anterne ; (c) lac de Chalain ; (d) lac de Lauvitel ; (e) lac Nègre ;(f) lac de Remoray ; (g) lac de Vallon ; (h) lac de Vens 1er.

### 1.1.1) Lac des 9 Couleurs

La carotte des 9 Couleurs (figure 11) mesure 82 cm et présente des lamines marron rouille entre 0 et 1,5 cm, des lamines noires à 16 cm, entre 39 cm et 41 cm et 46 cm et des lamines blanches entre 9 cm et 10 cm, à 17 cm, 19 cm et 36cm. Elle présente également une tâche blanche à 38 cm. Le sédiment reste très humide sur l'ensemble de la carotte.

### 1.1.2) Lac d'Anterne

La carotte retenue pour Anterne (figure 11) mesure 75 cm et présente de nombreuses alternances de lamines. Tout d'abord une alternance de lamines noires et blanches entre 5 cm et 7 cm et entre 21 cm et 25 cm. Nous observons également une alternance de lamines grises et noires entre 18 cm et 21 cm, entre 25 cm et 29 cm, entre 33 cm et 37cm et 39 cm et 40cm. Une lamine sableuse grise est présente entre 13 cm et 16 cm, ainsi qu'une noire à 1 cm et des blanches à 8 cm, 10 cm, 21 cm, 38 cm, 49 cm et 50 cm.

### 1.1.3) Lac de Chalain

La carotte mesure 77 cm (figure 11) et montre une certaine homogénéité car elle ne présente qu'une lamine gris noir entre 2 cm et 4 cm et une lamine blanc beige entre 17 et 22 cm. Un morceau de feuille a été observé entre 3 cm et 4 cm. Le sédiment est humide et argileux sur l'ensemble de la carotte.

### 1.1.4) Lac de Lauvitel

La carotte retenue mesure 50 cm (figure 11) et présente de nombreuses lamines. Certaines régulièrement intercalées, noires et blanches, entre 27 cm et 34 cm et entre 36 cm et 55 cm, d'autres disposées plus irrégulièrement entre 0 et 25 cm et entre 57 et 60 cm. Elle montre également une lamine blanche épaisse de 2 cm entre 25 cm et 27 cm. A 56 cm, il y a présence d'une lamine noire et d'une brindille de sapin, ainsi qu'un morceau d'écorce entre 18 cm et 20 cm. De plus la présence de cailloux et/ou gravier a été relevée à 15 cm, entre 25 cm et 26 cm et à 56 cm. Le sédiment est fluide avec présence d'eau dans la carotte.

### 1.1.5) Lac Nègre

La carotte de Nègre (62 cm) est assez homogène (*figure 11*) puisqu'elle ne présente que des lamines gris clair entre 6,5 cm et 8,5 cm, à 35 cm, à 45 cm, et à 51 cm. Le sédiment est humide mais très « collant ».

### 1.1.6) Lac de Remoray

La carotte de Remoray (*figure 11*) retenue mesure 85 cm. Elle présente des lamines gris noir à 0, 1, 2,5, 3,5 et 5 cm, et une autre noire de 7 à 8 cm. Elle se caractérise surtout par 2 zones bien différenciées, l'une noire de 0 à 13 cm, et l'autre claire de 16 à 60 cm. Le sédiment est humide sur l'ensemble de la carotte.

### 1.1.7) Lac du Vallon

La carotte de Vallon (75 cm) présente une lamine marron rouille de 1,5 cm à 2 cm ainsi que des lamines noires entre 0 et 0,5 cm, à 1 cm, de 33 cm à 35 cm, à 37 cm, 39 cm, 41 cm, 46 cm et entre 54 cm et 56 cm (*figure 11*). Elle montre également une zone de sable à 54 cm, ainsi que de gros graviers (de 1 à 3 cm) à 15 cm, 35 cm et 39 cm, et des petits (de 0,2 cm à 1 cm) tout au long de la carotte. Le sédiment est semi-liquide dans la première moitié de la carotte puis seulement humide.

### 1.1.8) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

La carotte retenue pour le lac de Vens 1<sup>er</sup> (*figure 11*) mesure 57 cm. Elle présente également de nombreuses lamines. Certaines sont noires entre 0 cm et 4 cm, à 8 cm, entre 11 cm et 14 cm, à 17 cm, 18 cm, à 20 cm, entre 21 cm et 24 cm et à 26 cm, d'autres beiges, entre 6 cm et 7 cm, entre 34 cm et 35 cm, 36,5 cm, à 41 cm et à 55 cm, et enfin brune, entre 41 cm et 43 cm, entre 45 cm et 51 cm et 55 cm entre 57 cm à 60 cm. Le reste de la carotte présente une alternance régulière de lamines claires et foncées. Il est à noter la présence hors échantillon d'une lamine sableuse entre 72 cm et 74 cm. Le sédiment reste très humide sur l'ensemble de la carotte.

## 1.2) Vitesses de sédimentation et datation

Les résultats des datations sont fournis par le tableau IV.

Suppression des zones de turbidites																				
< Turbidites >																				
> Turbidites <																				
Ac des 9 Couleurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
France	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	42,0	48,0	54,0	59,0	20		
Profondeur (cm)	1983	1923	1863	1803	1743	1683	1623	1563	1503	1443	1383	1323	1263	1203	1143	1083	1023	863		
Datation																				
Ac d'Anterne	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
France	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	24,0	28,0	32,7	36,6	40,5	44,4	48,3	52,2
Profondeur																				
Ac de Chalain	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
France	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0	48,0	51,0	54,0	57,0
Profondeur	2007	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Datation																				
Ac de Lautel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
France	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0	48,0	51,0	54,0	57,0
Profondeur	2004	1983	1965	1948	1930	1912	1894	1878	1858	1840	1822	1804	1786	1768	1750	1732	1714	1696	1678	1660
Datation																				
Ac de Nègre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
France	0,0	2,8	5,6	8,4	11,2	14,0	16,8	18,6	22,4	25,2	28,0	30,8	33,6	36,4	39,2	42,0	44,8	47,6	50,4	53,2
Profondeur	2003	1978	1953	1827																
Datation																				
Ac du Vallon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
France	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0	48,0	51,0	54,0	57,0
Profondeur	2003	1969	1948	1918	1888	1858	1828	1798	1768	1738	1708	1678	1648	1618	1588	1558	1528	1498	1468	1438
Datation																				
Ac de Vens 1er	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
France	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,0	36,0	39,0	42,0	45,0	48,0	51,0	54,0	57,0
Profondeur	1987	1950	1938	1901	1864	1827	1790	1753	1716	1679	1642	1605	1568	1531	1494	1457	1420	1383	1346	1309
Datation																				

Figure IV – Tableau récapitulatif des résultats de la radiochronologie pour les huit lacs d'étude. Les profondeurs et les âges donnés sont ceux de la couche supérieure de chaque tranche des carottes prélevées sur les lacs.

Un premier constat porte sur une vitesse de sédimentation assez faible de l'ordre de 1 mm/an pour les lacs alpins échantillonnés (sauf pour Lauvitel). Cette vitesse de sédimentation est plus faible si on la compare à celle observée au niveau des lacs du Jura (1,65 mm/an). Ce constat s'explique par le fait que les lacs alpins sont de petits lacs (moins de 15 ha) de haute montagne (à plus de 2000 mètres), avec des bassins versants réduits (quelques centaines d'ha) et sont donc peu productifs. Au contraire, les deux lacs du Jura, Remoray et Chalain, ont une productivité plus importante, donc une sédimentation plus élevée, notamment de par leurs grandes tailles (respectivement 95 ha et 230 ha) et leur grand bassin versant (2990 ha pour l'un et 3850 ha pour l'autre). A noter que le ratio (BV capté)/(surface) est également plus important pour les lacs du Jura.

#### 1.2.1) Lac des 9 Couleurs

La vitesse de sédimentation du lac des 9 Couleurs, 0,5 mm/an, est la valeur la plus faible enregistrée dans le massif alpin français par le Laboratoire Sciences du Climat et de l'Environnement du CNRS de Gif-sur-Yvette.

Les pics de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$  marquants les années 1963 et 1986 n'ont pas pu être observés en raison de cette très faible vitesse de sédimentation. Le  $^{137}\text{Cs}$  n'est observable que dans le premier centimètre d'interface. Il est à noter que la présence de  $^7\text{Be}$  détectée prouve que l'interface a bien été prélevé. La date de 1963 a donc été assignée à 1 cm de profondeur. Cette datation est cependant à prendre avec des réserves.

#### 1.2.2) Lac d'Anterne

Le lac d'Anterne présente une vitesse de sédimentation plus élevée que les autres lacs alpins, 2,6 mm/an. Deux hypothèses peuvent expliquer cette situation. La première est que le ratio (BV capté)/(surface) est sensiblement plus élevé par rapport aux autres lacs dont la sédimentation est de 1mm/an. Le ruisseau d'alimentation draine une pelouse alpine puis une tourbière, offrant autant de matériaux à éroder lors de la fonte des neiges.

Cependant, le calcul de cette vitesse de sédimentation s'est heurté à la présence de nombreuses zones de turbidites dans la sédimentation de la carotte. Ces dernières, visuellement observable sur la coupe de la carotte, ont géné le calcul de la vitesse de sédimentation. Celle-ci s'est ensuite révélée régulière après suppression de ces événements et la datation a donc été établie en les excluant. Ces zones de turbidites sont localisées entre 3 cm et 14 cm, entre 22 cm et 24 cm et enfin entre 33 cm et 39 cm.

Toutefois, il est à noter que la carotte datée ne semble pas être la moitié complémentaire de celle utilisée pour les analyses physico-chimiques et des peuplements

de diatomées. La confrontation des données issues de ces analyses et celles issues de la datation est donc à prendre avec quelques réserves.

#### 1.2.3) Lac de Chalain

Le calcul de la vitesse de sédimentation, 1,6 mm/an, ainsi que la datation de la carotte n'ont pas posé de problème pour le lac de Chalain.

#### 1.2.4) Lac de Lauvitel

Le résultat le plus remarquable de cette analyse concerne le lac de Lauvitel. Celui-ci se démarque de tous les autres lacs de l'étude par sa vitesse de sédimentation bien plus élevée, 4,6 mm/an. Ceci peut être dû à son caractère « intermédiaire ». En effet, il est situé bien plus bas, 1495 m, que les autres lacs alpins. De même sa taille, 37 ha, et celle de son bassin versant, 1554 ha, le situe entre les lacs alpins et jurassiens pour ces deux critères. A noter que la sédimentation de Lauvitel peut être tourmentée par des apports brusques de différents matériaux en liaison avec les avalanches.

Toutefois, la vitesse de sédimentation de ce lac n'a été estimée que pour les 40 premiers cm en raison du taux de sédimentation moins régulier que dans les autres carottes.

Cependant, en raison de sa forte vitesse de sédimentation, le lac de Lauvitel est le seul dont la carotte intègre une période d'un peu plus de 100 ans sur son ensemble, permettant de mieux discriminer les événements.

#### 1.2.5) Lac Nègre

La datation du lac Nègre a posé quelques problèmes. Tout d'abord la mesure d'éléments traces a été gênée par une forte teneur en radioéléments de la famille du radium. Une couche de couleur claire, bien stratifiée, caractérisée par une perte en eau de 55% (70% pour le reste de la carotte) a été observée entre 5 et 6,5 cm. Ceci correspondrait à un apport sédimentaire différent, perturbant les profils que devrait générer une sédimentation régulière. De plus, le pic correspondant à l'accident de Tchernobyl en 1986 n'est pas visible. Le calage de la datation a cependant pu être fait sur le pic de 1963. La vitesse de sédimentation calculée pour ce lac est de 1,1 mm/an.

Des excès de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  sont observés lors de la datation des tranches de la carotte, entre 10 cm et 40 cm de profondeur. Ceci pourrait s'expliquer par un phénomène de *slumping*, apport massif quasi-instantané de sédiment. Cependant, le site ne se prête pas à ce type d'événement. Deux autres hypothèses sont envisageables. Il pourrait s'agir d'une pollution par les niveaux supérieurs lors de l'échantillonnage. Cette hypothèse ne peut

cependant pas être non plus validée car une pollution devrait diminuer avec la profondeur, hors ce n'est pas le cas. Une dernière hypothèse souligne le fait que le lac de Nègre est situé au centre d'une zone sismique<sup>22</sup>. D'après les dosages radiochronologiques, les tranches de carottes concernées par cet événement seraient datées des années 1900 environ. Un tremblement de terre, comme celui qui a eu lieu dans la vallée de la Tinée en 1887, aurait pu remobiliser le sédiment fin.

#### 1.2.6) Lac de Remoray

De même que pour le lac de Chalain, autre lac du massif jurassien, le calcul de la vitesse de sédimentation, 1,65 mm/an, et la datation n'ont posé aucun problème.

#### 1.2.7) Lac du Vallon

Le calcul de la vitesse de sédimentation du lac du Vallon fut plus compliqué que pour le lac de Remoray en raison, comme pour la carotte du lac Nègre, du pic de 1986 qui n'est pas résolu. De la même manière, la datation a cependant pu être calée sur le pic de 1963.

Une vitesse moyenne de sédimentation a été estimée à 1 mm/an, avec cependant une augmentation au niveau des premiers centimètres.

#### 1.2.8) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

Le taux de sédimentation du lac de Vens 1<sup>er</sup> est, comme pour les lacs des 9 Couleurs, Nègre et du Vallon, extrêmement faible, soit 0,8 mm/an. La datation a pu être finalisée malgré le fait que le pic de Tchernobyl n'était pas visible, tout comme pour les lacs Nègre et du Vallon.

### 1.3) Granulométrie laser

L'évolution du grain moyen avec la profondeur pour chaque carotte a été mesurée ainsi que l'évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

#### 1.3.1) Lac des 9 Couleurs

En ce qui concerne le lac des 9 Couleurs, le grain moyen est assez fin, entre 6 µm et 8 µm (figure 12 a). Il est relativement constant tout au long de la carotte. De la même manière,

---

<sup>22</sup> Ministère de l'Environnement.1985. Nouveau zonage sismique de la France. La documentation française.147p.

la distribution de la taille des particules en fonction de la profondeur (figure 12 b) ne semble pas évoluer. Ceci reflète une sédimentation lente (0,5 mm/an) et homogène.

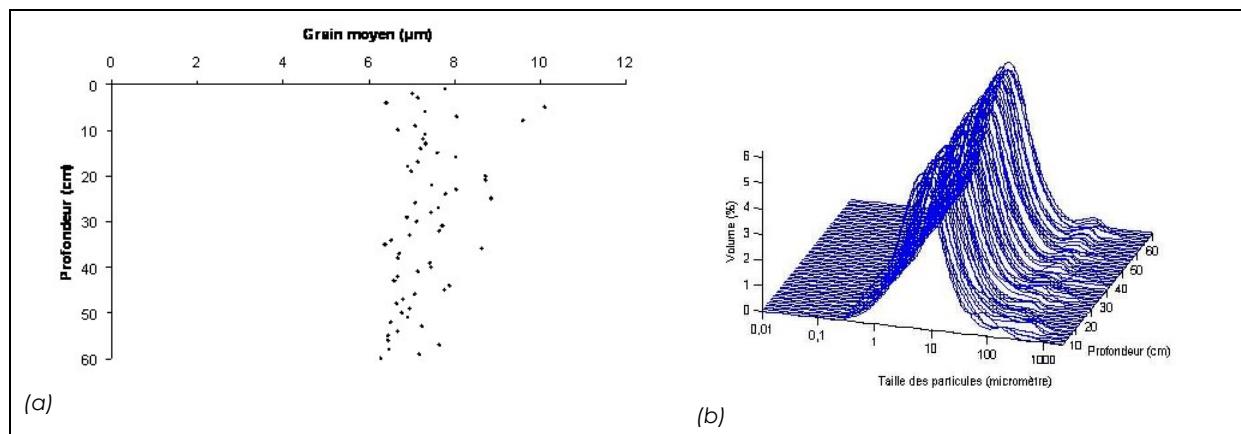


Figure 12 - Résultats des analyses granulométriques du lac des 9 Couleurs. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

### 1.3.2) Lac d'Anterne

Les données du lac d'Anterne sont malheureusement manquantes pour l'analyse granulométrique.

### 1.3.3) Lac de Chalain

Le lac de Chalain a un grain moyen relativement faible, entre 4  $\mu\text{m}$  et 10  $\mu\text{m}$  (figure 13 a). Un glissement brutal du grain moyen vers de plus hautes tailles, jusqu'à 61  $\mu\text{m}$ , est visible à 29 cm de profondeur. Ceci doit correspondre à un apport de sédiments de plus grande taille, rapide et peu important car il n'impacte qu'une faible couche du sédiment. La figure 13 b montre bien ce pic isolé dans l'évolution du spectre des tailles de particules. Elle permet également de voir que le lac de Chalain présente la plus faible granulométrie des 8 lacs d'étude.

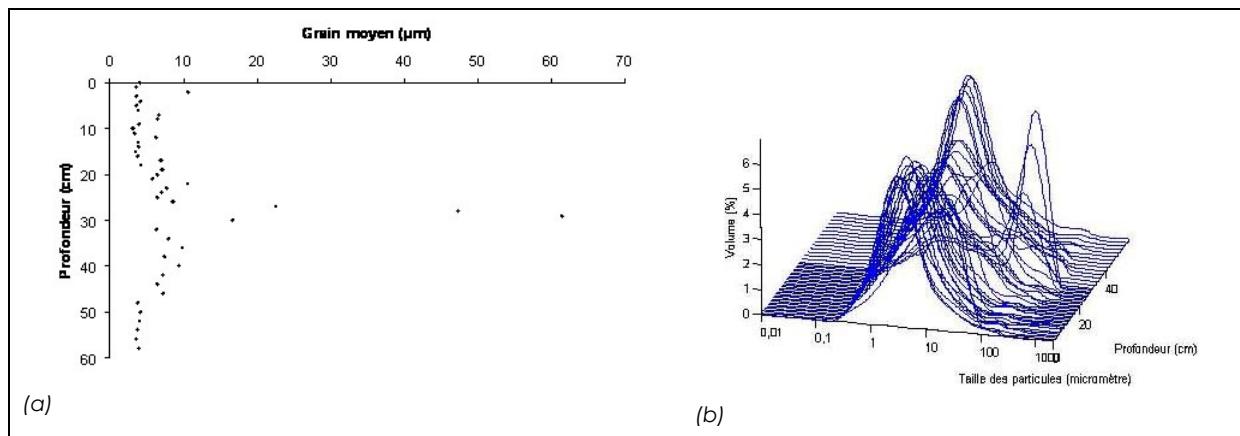


Figure 13 - Résultats des analyses granulométriques du lac de Chalain. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur

#### 1.3.4) Lac de Lauvitel

Le lac de Lauvitel présente un grain moyen évoluant entre 10 µm et 20 µm (figure 14 a). Cependant la partie profonde de la carotte montr deux pics, un jusqu'à 43µm à 46 cm de profondeur, et l'autre jusqu'à 70 µm, entre 52 cm et 56 cm. Le spectre des tailles de particules de la carotte du lac de Lauvitel (figure 14 b) semble le plus étalé, traduisant une répartition plus hétérogène des tailles de particules.

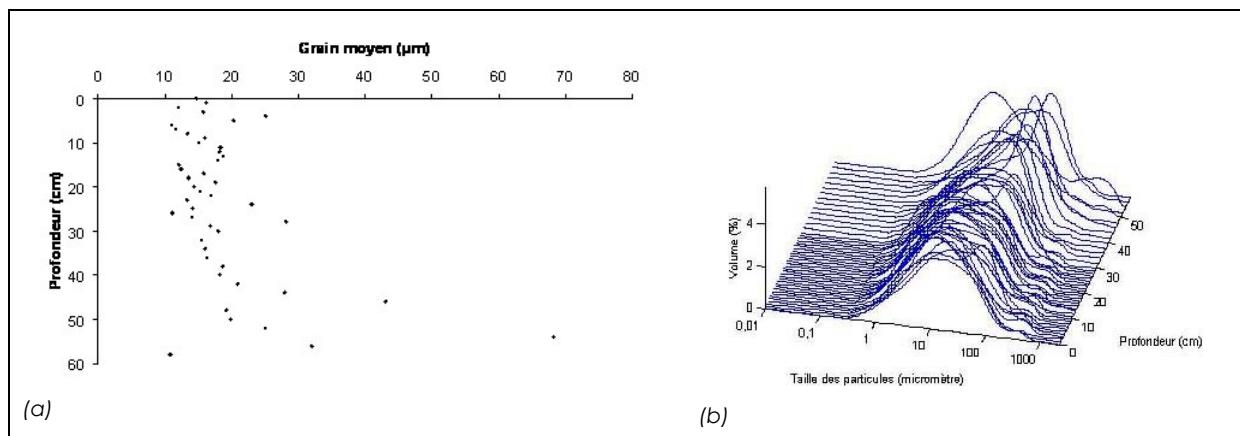


Figure 14 - Résultats des analyses granulométriques du lac de Lauvitel. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

#### 1.3.5) Lac Nègre

Au contraire, le lac Nègre présente une chute de la taille du grain moyen dans la partie superficielle de la carotte (figure 15 a). En effet, celui-ci est de l'ordre de 15 µm dans les 8 premiers centimètres, alors qu'il fluctue autour de 30 µm dans le reste de la carotte. Ceci correspond à la séparation en 2 phases de la carotte, observées lors de l'analyse radiochronologique. La figure 15 b montre visuellement 2 phases, dont la plus ancienne

homogène et plus grossière. L'hypothèse d'un tremblement de terre remobilisant le sédiment fin est probable.

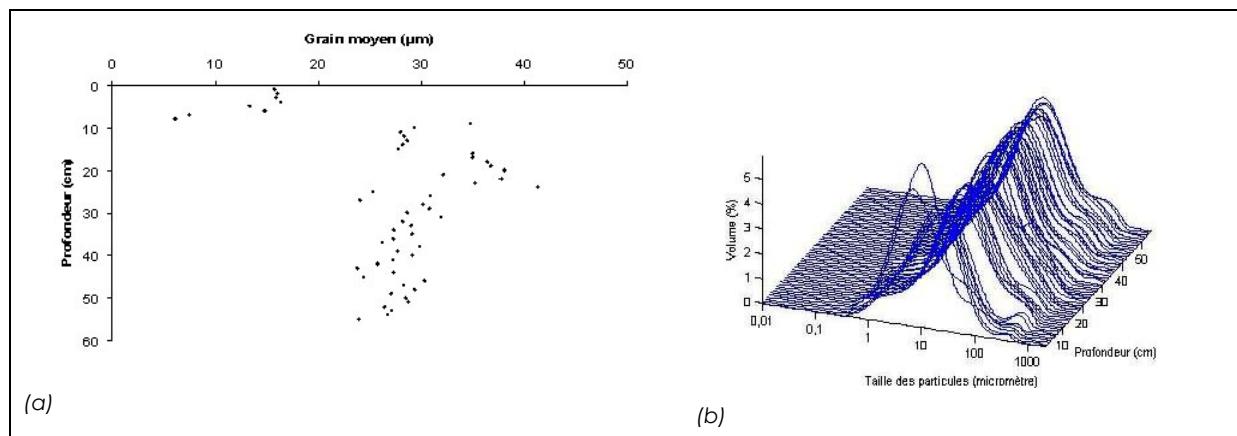


Figure 15 - Résultats des analyses granulométriques du lac Nègre. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

### 1.3.6) Lac de Remoray

L'évolution du grain moyen dans la carotte de sédiment de Remoray semble montrer sur la figure 16 a une augmentation de taille en remontant du fond vers les couches superficielles. Cependant, cette tendance est assez faible puisque sa taille passe de 6  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$ , ce qui est plus faible que la fluctuation du grain moyen sur l'ensemble de la carotte du lac de Chalain ou du lac Nègre par exemple.

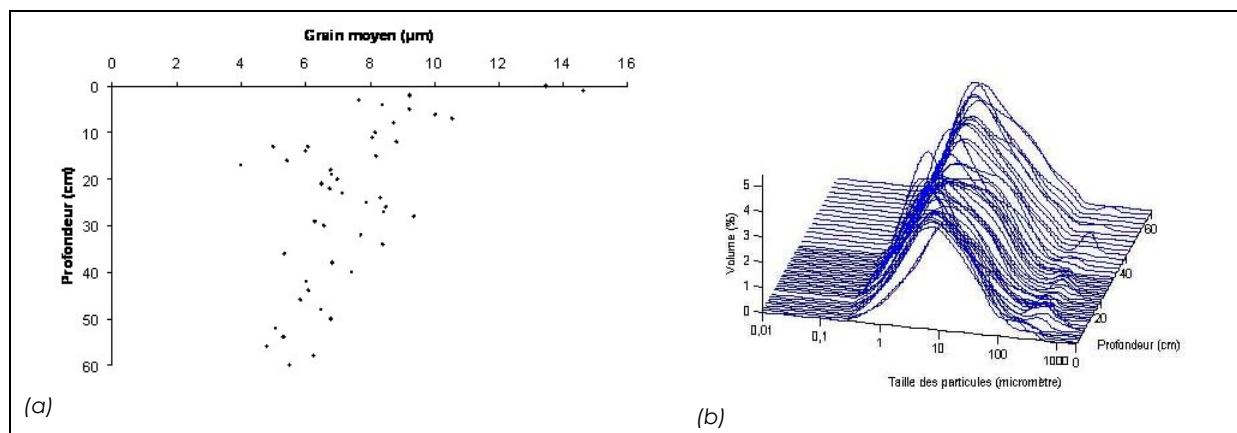


Figure 16 - Résultats des analyses granulométriques du lac de Remoray. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

### 1.3.7) Lac du Vallon

Le lac du Vallon présente un grain moyen fluctuant principalement entre 15  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$  (figure 17 a) mais ce dernier oscille tout au long de la carotte et peut atteindre 30  $\mu\text{m}$ . Il

présente cependant un pic remarquable à 41 µm à 26 cm de profondeur. Le spectre de taille des particules montre toutefois une certaine homogénéité tout au long de la carotte.

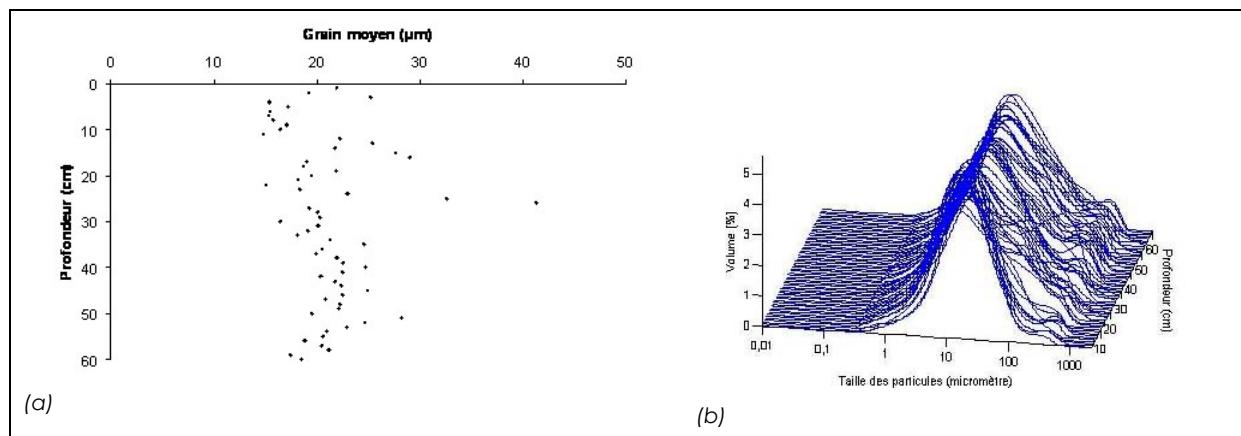


Figure 17 - Résultats des analyses granulométriques du lac du Vallon. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

### 1.3.8) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

Enfin, le lac de Vens 1<sup>er</sup> a un grain moyen compris entre 10 µm et 20 µm (figure 18 a). Il présente également un pic à 62 µm autour de 55 cm de profondeur, correspondant probablement à un apport de sédiments.

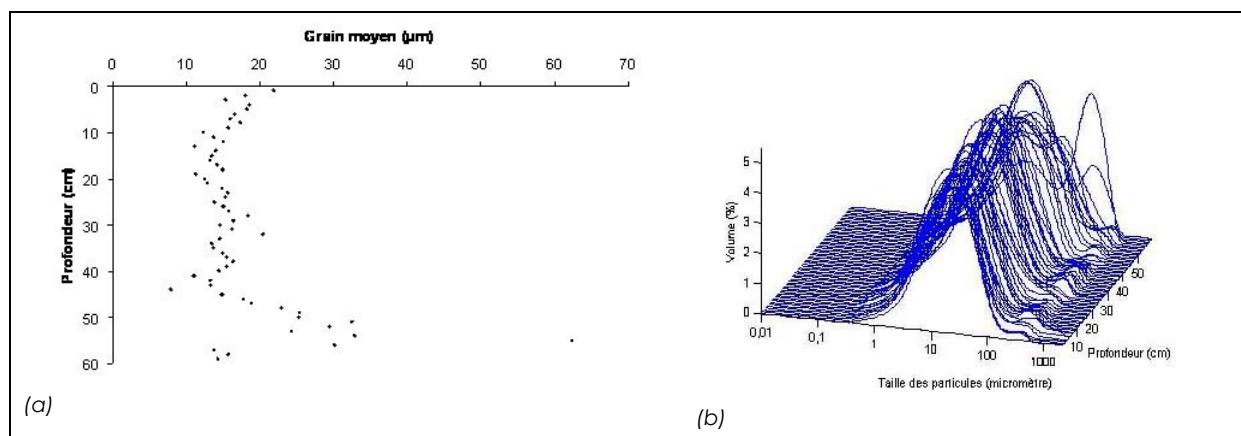


Figure 18 - Résultats des analyses granulométriques du lac de Vens. (a) Evolution du grain moyen du sédiment en fonction de la profondeur, (b) évolution du volume relatif de chaque taille de grain en fonction de la profondeur.

## 2) Analyse des paramètres physico-chimiques et biologiques au sein des carottes

### 2.1) Physico-chimie des sédiments

#### 2.1.1) Caractérisation des lacs en fonction de leurs paramètres physico-chimiques

Cette analyse vise à caractériser les lacs en fonction de leurs paramètres physico-chimiques. Sept paramètres ont été mesurés dans les tranches des carottes de sédiment : pH,

alcalinité, teneur en silice, teneur en matière organique, phosphore, carbone et azote. Ces deux derniers paramètres ont ensuite permis le calcul du rapport C/N.

La figure 19 présente les résultats de cette analyse inter-groupes réalisée sur le tableau de données physico-chimiques de l'étude, soit 7 paramètres x 160 relevés (20 tranches x 8 lacs). Avec 75% de la variabilité inter-groupes, les lacs sont relativement bien discriminés sur le plan de leur physico-chimie.

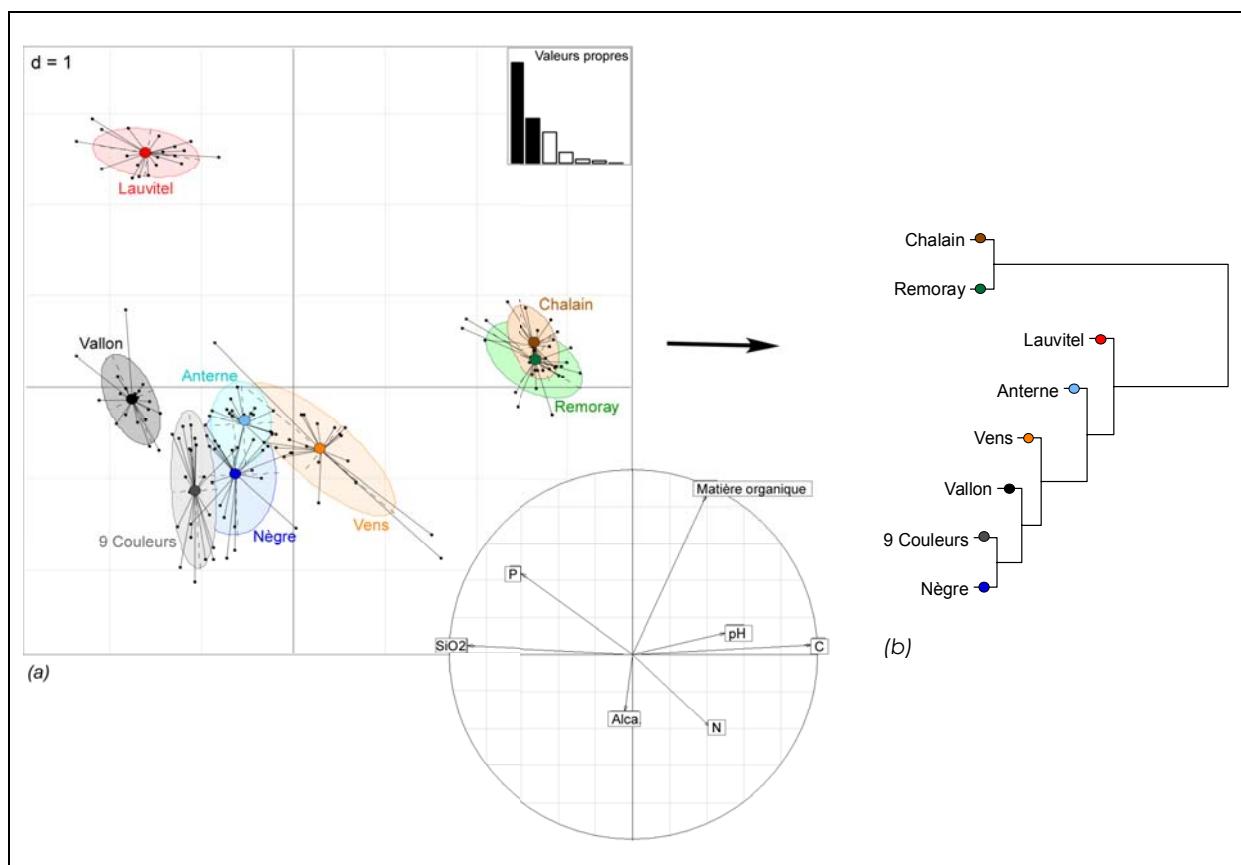


Figure 19 - Analyse inter-groupes réalisée sur le tableau de données physico-chimiques. 75% de l'inertie totale est inter-groupes et 25% est intra-groupes. (a) Positionnement des lacs sur le plan factoriel F1xF2 relativement à leur profil physico-chimique global. Pour chacun des lacs, les petits cercles de couleur représentent le centre de gravité -soit le positionnement moyen- du nuage de points (les tranches de carotte), et les ellipses représentent l'importance de la variabilité. En bas à droite est représenté le cercle de corrélation avec les différents descripteurs physico-chimiques. (b) Dendrogramme issu de l'analyse inter-groupes (méthode de Ward).

L'analyse inter-groupes permet de définir 3 grands groupes : les lacs jurassiens, les lacs alpins et le lac de Lauvitel (cf. figure 19 a et b).

Les lacs jurassiens se caractérisent par : un pH élevé, de fortes teneurs en carbone et matière organique, et des teneurs relativement faibles en phosphore et en silice. Ces observations sont en accord avec les contextes naturels et géologiques : lacs calcaires de moyenne montagne, avec une productivité relativement plus importante, et des teneurs en phosphore et en silice plus faibles que celles des lacs alpins d'altitude. Le lac de Remoray

présente cependant une teneur en azote plus élevée et une teneur en matière organique plus faible dans ses sédiments que le lac de Chalain.

Au sein du groupe des 5 lacs alpins, se distinguent:

- le lac d'Anterne par son pH et sa teneur en silice élevés;
- le lac de Vens 1<sup>er</sup> par sa concentration en azote élevée;

Le lac de Lauvitel se distingue des autres lacs de l'étude, y compris de ceux du groupe alpin, en raison de ses fortes teneurs en phosphore dans les sédiments et de ses faibles valeurs d'alcalinité.

#### 2.1.2) Evolution des paramètres physico-chimiques

La figure 20 représente les analyses individuelles par lacs, issues d'une analyse intra-groupes basée sur le tableau de données physico-chimiques. Ces analyses permettent d'apprécier visuellement la stabilité temporelle des caractéristiques physico-chimiques des lacs. Il est à noter que les histogrammes des valeurs propres sont à la même échelle pour les 8 lacs et donnent ainsi une idée de l'apport de chacun d'entre eux à l'inertie totale du jeu de données.

La figure 21 présente, pour chaque lac et chaque paramètre physico-chimique mesuré, leur évolution le long des 20 segments de carotte. Les lacs sont regroupés sur un même graphique par paramètre, cependant, les courbes ne sont pas directement comparables entre elles, en raison des différentes vitesses de sédimentation.

L'histogramme des valeurs propres du lac des **9 Couleurs** (cf. figure 20a) montre un apport relativement important du lac à la variabilité intra-groupes globale du tableau de données physico-chimiques. Le lac des 9 Couleurs apparaît donc comme un lac relativement fluctuant sur le plan physico-chimique, sans pour autant qu'un sens évolutif ne se dessine clairement (figure 20a). La variabilité de l'alcalinité (représentant le pouvoir tampon du milieu) peut se révéler problématique en cas d'acidification du lac et de faible alcalinité. Le rapport C/N moyen (cf. figure 21h) du lac des 9 Couleurs est le plus faible de l'étude (autour de 8). Des valeurs faibles du rapport C/N dans les sédiments traduit classiquement une origine phytoplanctonique de la majeure partie de la matière organique du sédiment. A noter que la sédimentation au sein du lac des 9 Couleurs est la plus faible parmi les lacs étudiés.

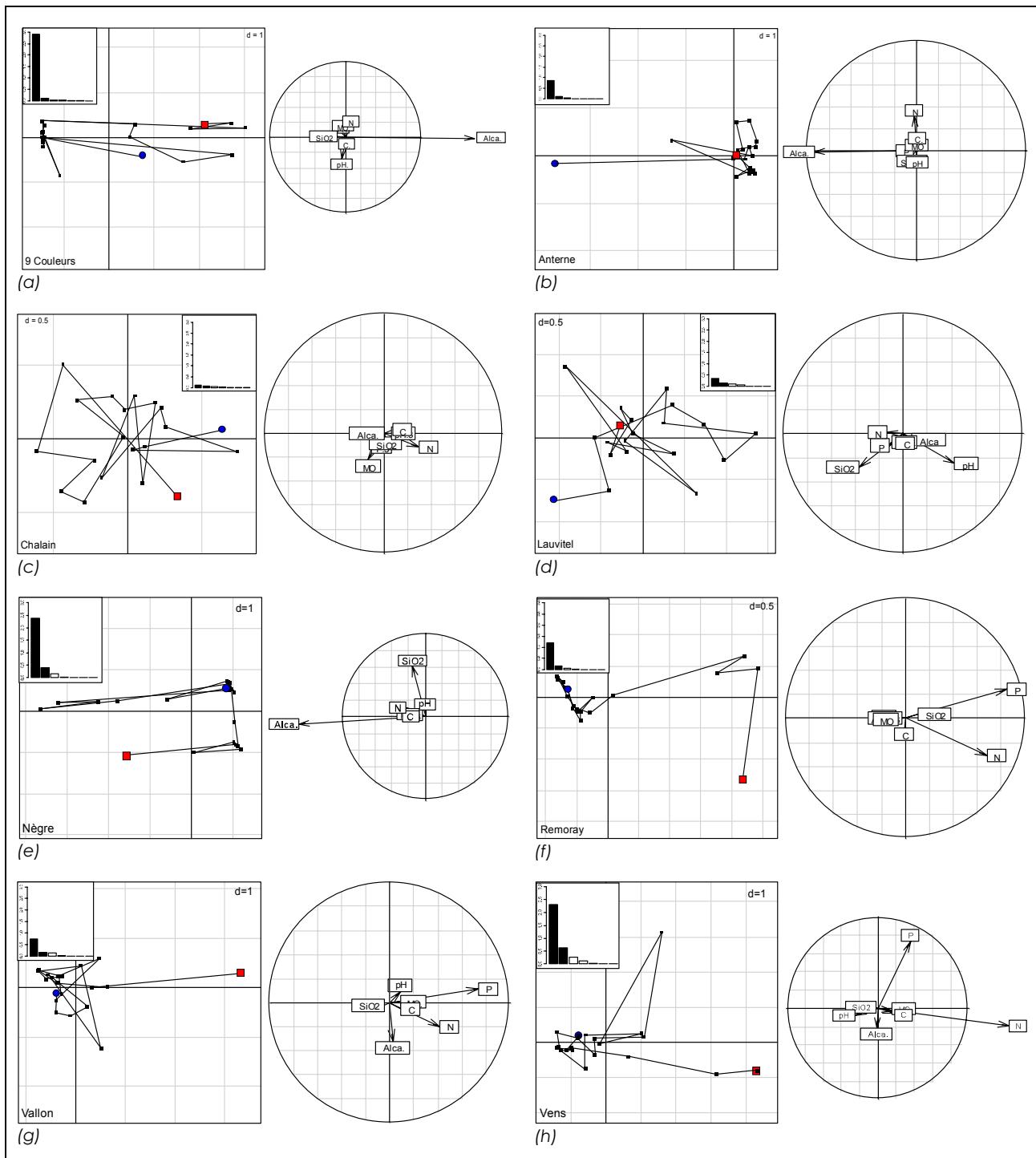


Figure 20 - Analyses séparées par lacs issues d'une analyse intra-groupes basée sur le tableau de données physico-chimiques. Pour chacun des lacs, l'évolution (et la proximité) des profils physico-chimiques est représentée sur un plan factoriel F1xF2. La position la plus récente -la tranche de carotte la plus superficielle- est représentée par un carré rouge, et la position la plus ancienne -la tranche la plus profonde- par un cercle bleu. Le cercle de corrélation des différents paramètres physico-chimiques est représenté sur la droite. 75% de l'inertie (ou variabilité) totale du tableau est inter-groupes et 25% est intra-groupes. Les histogrammes de valeurs propres sont à la même échelle et donnent une idée de l'apport de chacun des lacs à la variabilité totale. (a) lac des 9 Couleurs; (b) lac d'Anterne; (c) lac de Chalain; (d) lac de Lauvitel; (e) lac Nègre; (f) lac de Remoray; (g) lac de Vallon; (h) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

La figure 21c permet d'observer que le lac d'**Anterne** présente un pH de sédiment relativement élevé pour un lac alpin (autour de 9, soit les valeurs les plus fortes des 8 lacs étudiés), ceci s'expliquant par le contexte géologique schisto-marneux de son bassin versant. Sur la figure 21g nous pouvons observer une diminution de moitié des teneurs en azote à partir de la lame 6. Cette baisse des teneurs en azote correspond à une zone de turbidites détectée lors de l'analyse radiochronologique et considérée comme extérieure à la sédimentation lacustre. Il ne s'agit donc probablement pas d'une évolution du niveau trophique du lac. Cette observation est également valable pour le segment 16. Le rapport C/N (cf. figure 21h) augmente à partir du relevé 7, consécutivement à la baisse des teneurs en azote. Cependant, la présence d'une zone de turbidites, trahissant une hétérogénéité dans la sédimentation, ne permet pas de conclure sur une tendance et une datation précise. Nous pouvons toutefois noter que la valeur C/N du relevé 1, non incluse dans la zone de turbidites, est de loin la valeur la plus forte (80) sur le lac d'Anterne. Ce relevé se caractérise également par une faible teneur en matière organique. D'après Restituito<sup>23</sup> (1984), un rapport C/N élevé dans les sédiments associé à une quantité relativement faible de matière organique, met en évidence soit la présence d'un niveau de décomposition très rapide, soit la présence de sédiments d'origine allogène. L'augmentation de la teneur en carbone dans ce relevé penche pour la deuxième hypothèse. Le lac d'Anterne apparaît néanmoins relativement stable, ses fluctuations physico-chimiques ne montrant pas d'évolution particulière (figure 20).

Le lac de **Chalain** a une amplitude de variabilité physico-chimique relativement contenue (cf. figure 19), sans tendance évolutive apparente (cf. figure 20c). La figure 21 confirme cette stabilité des paramètres physico-chimiques. On peut cependant noter une augmentation importante de la teneur en phosphore au niveau des segments les plus superficiels (du segment 4 au 1), soit les années 1950, correspondant au début des activités de loisir et notamment à la création de campings à proximité du lac. Les valeurs du rapport C/N sont les plus fortes obtenues sur l'ensemble des lacs d'étude (de 75 à 145) et montre une tendance à l'augmentation au cours du temps avec 4 grands pics. Un rapport C/N important implique qu'une grande partie de la matière organique provient du bassin versant sous la forme de débris organiques<sup>24</sup>. Nous pouvons également observer une diminution de ce rapport au niveau des segments 1 et 2, due à une augmentation de la teneur en azote, reflétant l'enrichissement en nutriments constaté précédemment.

<sup>23</sup> Restituito F., 1984. Contribution à l'étude du sédiment d'un lac oligomésotrophe d'origine volcanique (Lac Pavin, France). Hydrobiologia 109, 229-234.

<sup>24</sup> Obeng-Asamoah, E.K., 1976 in Restituito F., 1984. Contribution à l'étude du sédiment d'un lac oligomésotrophe d'origine volcanique (Lac Pavin, France). Hydrobiologia 109, 229-234.

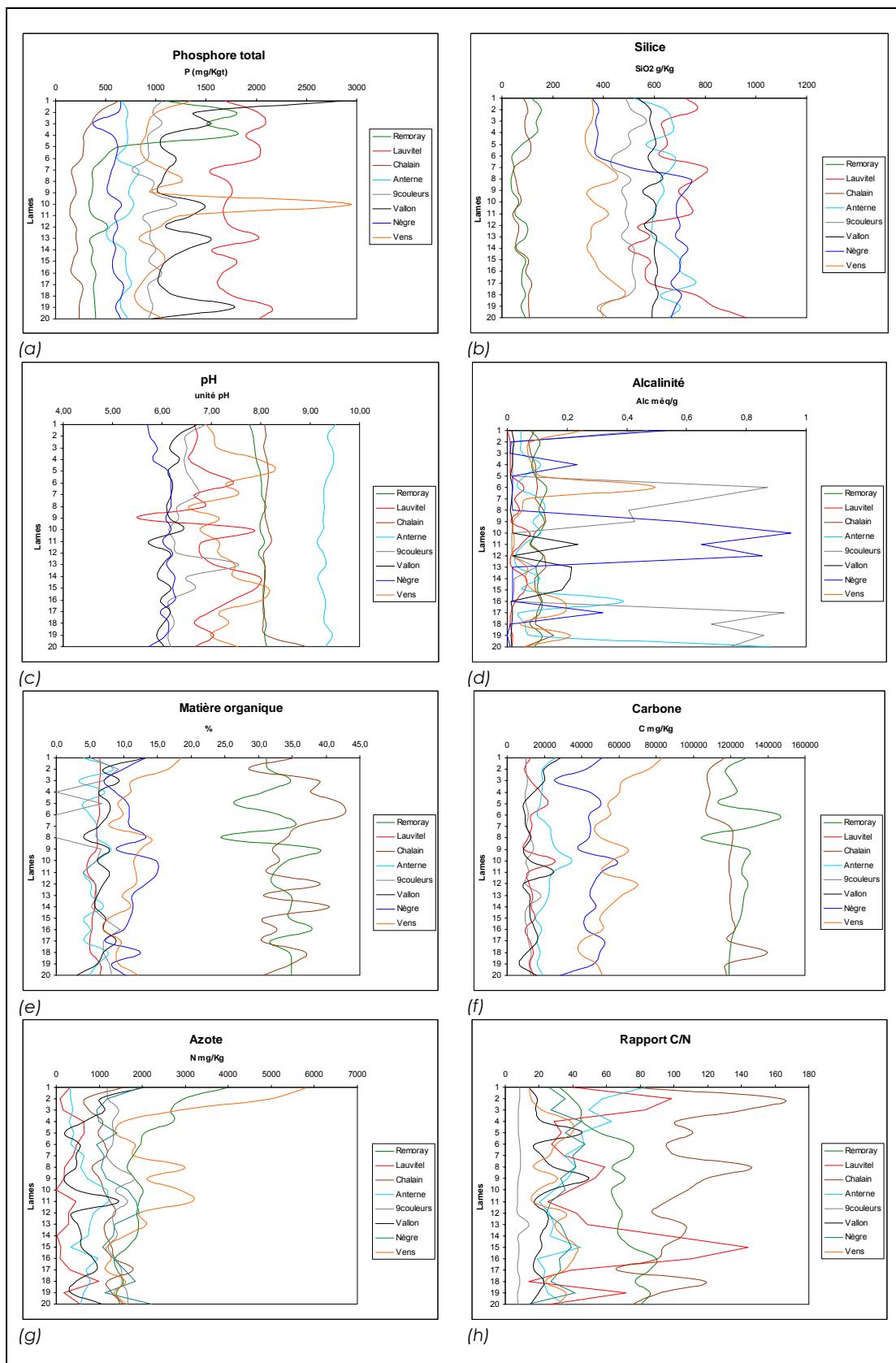


Figure 21 - Profils physico-chimiques longitudinaux des carottes de sédiment. A noter que les lacs ont tous des vitesses de sédimentation différentes et qu'il n'y a donc pas de synchronisme entre les différentes courbes. (a) phosphore total; (b) silice; (c) pH; (d) alcalinité; (e) matière organique; (f) carbone; (g) azote; (h) rapport C/N.

Le lac de **Lauvitel** a un profil physico-chimique bien caractéristique par rapport aux autres lacs étudiés (cf. *figure 19*), avec cependant une faible amplitude de variabilité, sans tendance évolutive particulière (cf. *figure 20d*). Nous pouvons noter que le lac de Lauvitel présente des teneurs en phosphore dans ses sédiments globalement plus élevées que les autres lacs étudiés (*figure 21a*). Le faible pourcentage de matière organique dans les sédiments du lac de Lauvitel et le rapport C/N élevé (56 en moyenne) implique soit une décomposition rapide, soit la présence de sédiments d'origine allogène<sup>25</sup>. La faible teneur en azote dans l'ensemble de la carotte pourrait traduire le phénomène de « faim d'azote » et donc une vitesse de décomposition rapide.

Le lac **Nègre** un profil physico-chimique relativement variable dans le temps (cf. *figure 19*), avec cependant, à la vue de la dispersion de ses points, aucune tendance significative (cf. *figure 20e*). Ces variations se retrouvent au niveau de la *figure 21d*, avec des pics marqués des valeurs d'alcalinité. Les segments 12 à 10 montrent également un enrichissement du lac avec de fortes teneurs en azote, carbone et matière organique, correspondant à la zone de sédimentation hétérogène (cf. § radiochronologie). A noter également une chute des teneurs en silice de moitié au niveau des segments 6 à 1.

Le lac de **Remoray** a une faible amplitude de variabilité de son profil physico-chimique (cf. *figure 19*), montrant cependant une tendance évolutive relativement marquée s'amorçant au niveau du 6<sup>e</sup> segment, correspondant aux premières décennies du XX<sup>ème</sup> siècle (cf. *figures 20 et 21*). Les teneurs en phosphore en particulier présentent une très forte augmentation, avec des valeurs triplées entre les lames 5 et 4 (années ~1940). Il est à noter au niveau du segment 1 une diminution de moitié par rapport aux valeurs précédentes, correspondant aux années 1980. Les teneurs en azote présentent également une brusque augmentation à partir du relevé 5 (années 1930). La baisse des teneurs en phosphore dans les sédiments à partir des années 1990 correspond quant à elle à la création de la réserve naturelle de Remoray en 1980, au début de la mise aux normes des bâtiments agricoles du bassin versant du lac avec stockage des effluents d'élevage en 1993, et de la mise en œuvre d'une station d'épuration (cf. Mat.&Méth. §1.6).

Le lac de **Vallon** présente une variabilité de son profil physico-chimique relativement moyenne (cf. *figure 19*), avec cependant les 3 segments les plus superficiels montrant une évolution des teneurs en phosphore (cf. *figures 20 et 21*). Le segment 1, relevé le plus superficiel, montre également une forte augmentation, d'un facteur ~3, de sa teneur moyenne en azote. Nous pouvons également observer une augmentation des teneurs en

---

<sup>25</sup> Restituto F., 1984. Contribution à l'étude du sédiment d'un lac oligomésotrophe d'origine volcanique (Lac Pavin, France). *Hydrobiologia* 109, 229-234.

carbone, matière organique et du pH, ainsi qu'une baisse du rapport C/N, traduisant vraisemblablement un enrichissement du milieu dès le début des années 1970. Enfin, l'alcalinité présente 2 pics très marqués, l'un situé sur les relevés 15, 14 et 13, l'autre sur le relevé 11. Ces pics sont synchrones avec des baisses de pH, et seraient temporellement situés au début du XVII<sup>ème</sup> et début XVIII<sup>ème</sup>.

Tout comme le lac de Vallon, le lac de **Vens 1<sup>er</sup>** présente une faible variabilité temporelle de son profil physico-chimique (cf. *figure 19*), avec cependant une évolution trophique ciblée au niveau des 3 derniers segments, bien que de moindre importance que le lac de Vallon (cf. *figures 20 et 21*). Ces augmentations des teneurs en azote, carbone et matière organique, traduisent un enrichissement récent (deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle) du milieu (incidence du refuge ?).

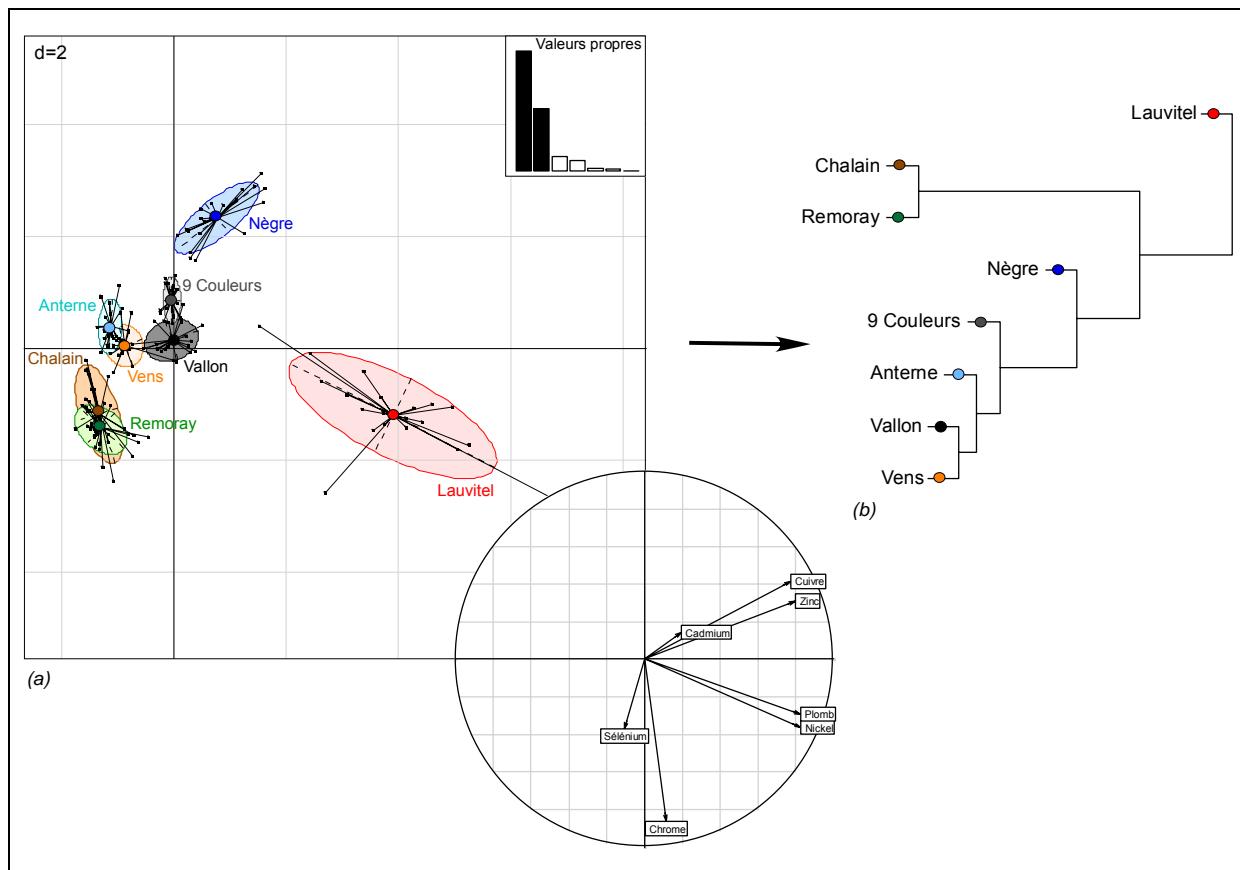
## 2.2) Micropolluants

### 2.2.1) Caractérisation des lacs en fonction de leurs teneurs en micropolluants.

Cette analyse vise à caractériser les lacs sur le plan de leur teneur récente et historique en micropolluants dans les sédiments. Huit micropolluants (métaux lourds) ont été mesurés dans les tranches de carottes de sédiment, cuivre (Cu), chrome (Cr), nickel (Ni), cadmium (Cd), zinc (Zn), plomb (Pb), sélénium (Se) et arsenic (As). La *figure 22* présente les résultats de cette analyse inter-groupes réalisée sur le tableau de données micropolluants de l'étude, soit 8 métaux lourds x 160 relevés (20 tranches x 8 lacs). Les lacs se caractérisent relativement bien du point de vue de leur teneur en micropolluants (67% de l'inertie totale de ce tableau est inter-groupes), et, le lac de Lauvitel mis à part, leur amplitude de variabilité est relativement faible.

A la vue de la *figure 22*, on peut observer 4 groupes sur le plan factoriel F1xF2: les lacs jurassiens (Chalain et Remoray), le lac de Lauvitel, le lac Nègre et les autres lacs alpins. Ces groupes sont caractérisés par (cf. *figures 23 et 24*):

- lacs jurassiens: de fortes teneurs en chrome;
- lac de Lauvitel: présente des pics de teneur en nickel, plomb, cuivre, zinc et cadmium par rapport aux autres lacs;
- lac Nègre: présente des pics de teneurs en cadmium et en cuivre;
- autres lacs alpins: aucune caractéristique particulière.



## 2.2.2) Evolution temporelle des teneurs en micropolluants

La figure 23 représente les analyses individuelles par lacs, issues d'une analyse intragroupes basée sur le tableau de micropolluants. Ces analyses permettent d'apprécier visuellement la stabilité temporelle des lacs. Il est à noter que les histogrammes des valeurs propres sont à la même échelle pour les 8 lacs et donnent ainsi une idée de l'apport de chacun d'entre eux à l'inertie totale du jeu de données. La figure 24 présente, pour chaque lac et chaque paramètre mesuré, leur évolution le long des 20 segments de carotte. Les lacs sont regroupés sur un même graphique par paramètre, cependant, les courbes ne sont pas directement comparables entre elles, en raison des différentes vitesses de sédimentation.

Les figures 23a, b, c, f et g, correspondant respectivement aux lacs des **9 Couleurs**, **Anterne**, **Chalain**, **Remoray** et **Vallon**, montrent une faible variabilité temporelle de leur teneur en micropolluants et aucune tendance évolutive particulière.

Le lac de **Lauvitel** présente des relevés relativement dispersés (cf. figure 22), avec cependant aucune tendance évolutive définie (cf. figures 23 et 24). Un relevé sort notamment du groupe, il s'agit du relevé 8 correspondant à la deuxième moitié des années 1950 et qui se caractérise par trois grands pics de teneur :

- en zinc : 1,477mg/g
- en plomb : 0,794mg/g
- en sélénium : 0,003mg/g

et trois teneurs relativement élevées par rapport aux autres lacs :

- en cuivre : 0,128mg/g
- en chrome : 0,045mg/g
- en nickel : 0,248mg/g

Les relevés du lac **Nègre** présentent une forte dispersion sur le plan factoriel F1xF2 (figure 23e), essentiellement due à des oscillations des teneurs en cadmium, variant entre un taux très faible et un taux indétectable, et à une augmentation des teneurs en cuivre. La figure permet de voir que les oscillations du cadmium sont récurrentes dans l'histoire du lac, alors que la période récente (à partir du segment 7, correspondant approximativement au début XX<sup>ème</sup> siècle) est marquée par une augmentation continue du cuivre.

Sur la figure 23 h, le lac de **Vens 1<sup>er</sup>** montre une variabilité temporelle relativement faible de son profil. Nous notons toutefois une évolution des profils en micropolluants au niveau des 3 derniers segments, s'expliquant principalement par une très forte augmentation des teneurs en cadmium (deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle) et une augmentation relative du sélénium (segment 1). La figure 24 montre pour le lac de Vens 1<sup>er</sup> peu de variations des teneurs dans le sédiment en cuivre, chrome et nickel, avec cependant une augmentation des teneurs en zinc à partir du relevé 4 (deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle) et en plomb à partir du relevé 3 (début du XX<sup>ème</sup> siècle). Nous pouvons enfin noter que bien qu'il y ait des filons de plomb, de zinc et de cuivre à proximité du lac de Vens 1<sup>er</sup>, les mesures de micropolluants ne montrent pas de valeur particulièrement élevée pour ces métaux par rapport aux autres lacs étudiés.

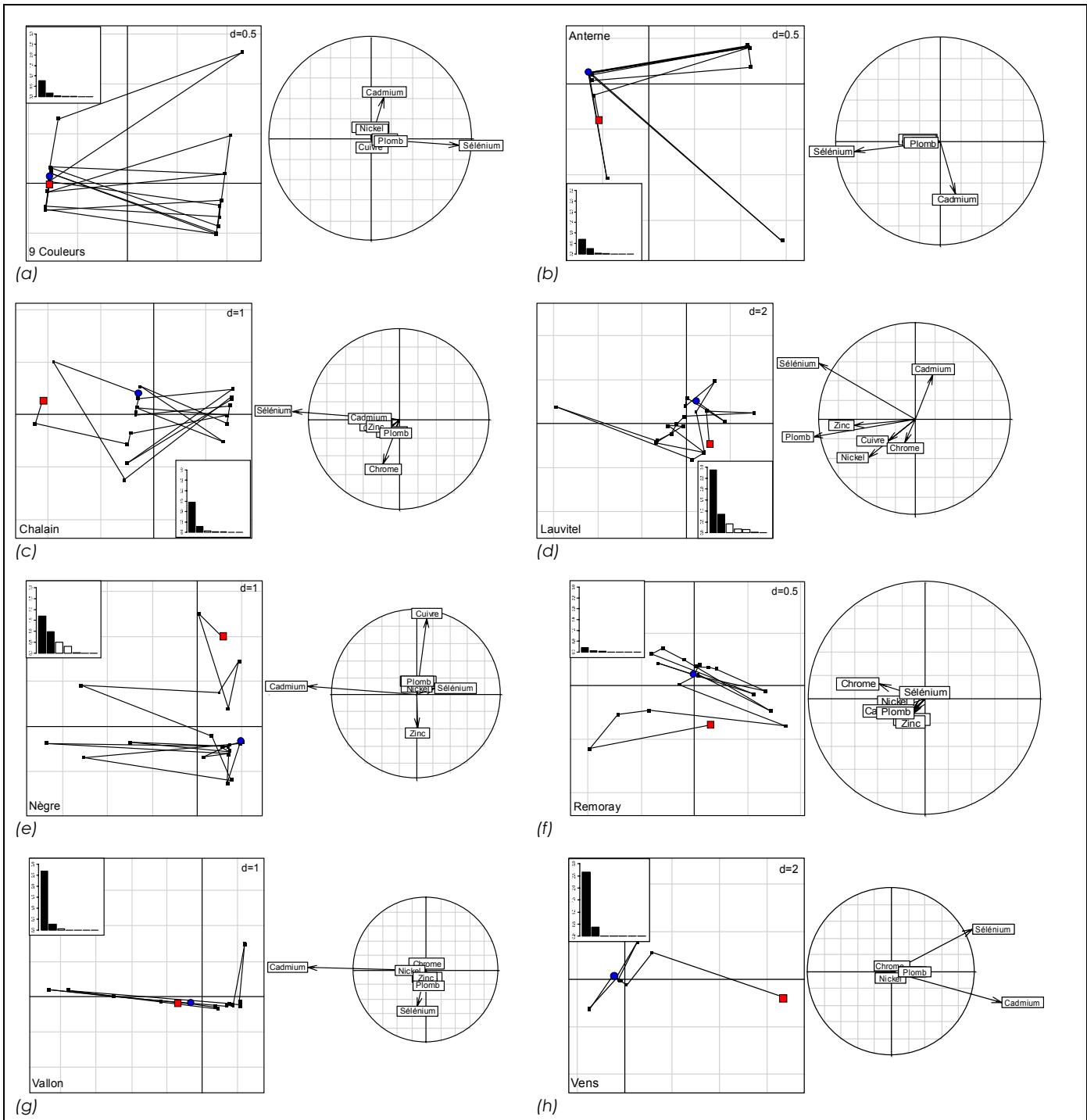


Figure 23 - Analyses séparées par lacs issues d'une analyse intra-groupes basée sur le tableau de données de micropolluants. Pour chacun des lacs, l'évolution (et la proximité) de leur teneur en micropolluants est représentée sur un plan factoriel F1xF2. La position la plus récente -la tranche de carotte la plus superficielle- est représentée par un carré rouge, et la position le plus ancienne -la tranche la plus profonde- par un cercle bleu. Le cercle de corrélation des différents métaux est représenté sur la droite. 67% de l'inertie (ou variabilité) totale du tableau est inter-groupes et 33% est intra-groupes. Les histogrammes de valeurs propres sont à la même échelle et donnent une idée de l'apport de chacun des lacs à la variabilité totale. (a) lac des 9 Couleurs; (b) lac d'Anterne; (c) lac de Chalain; (d) lac de Lauvitel; (e) lac Nègre; (f) lac de Remoray; (g) lac de Vallon; (h) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

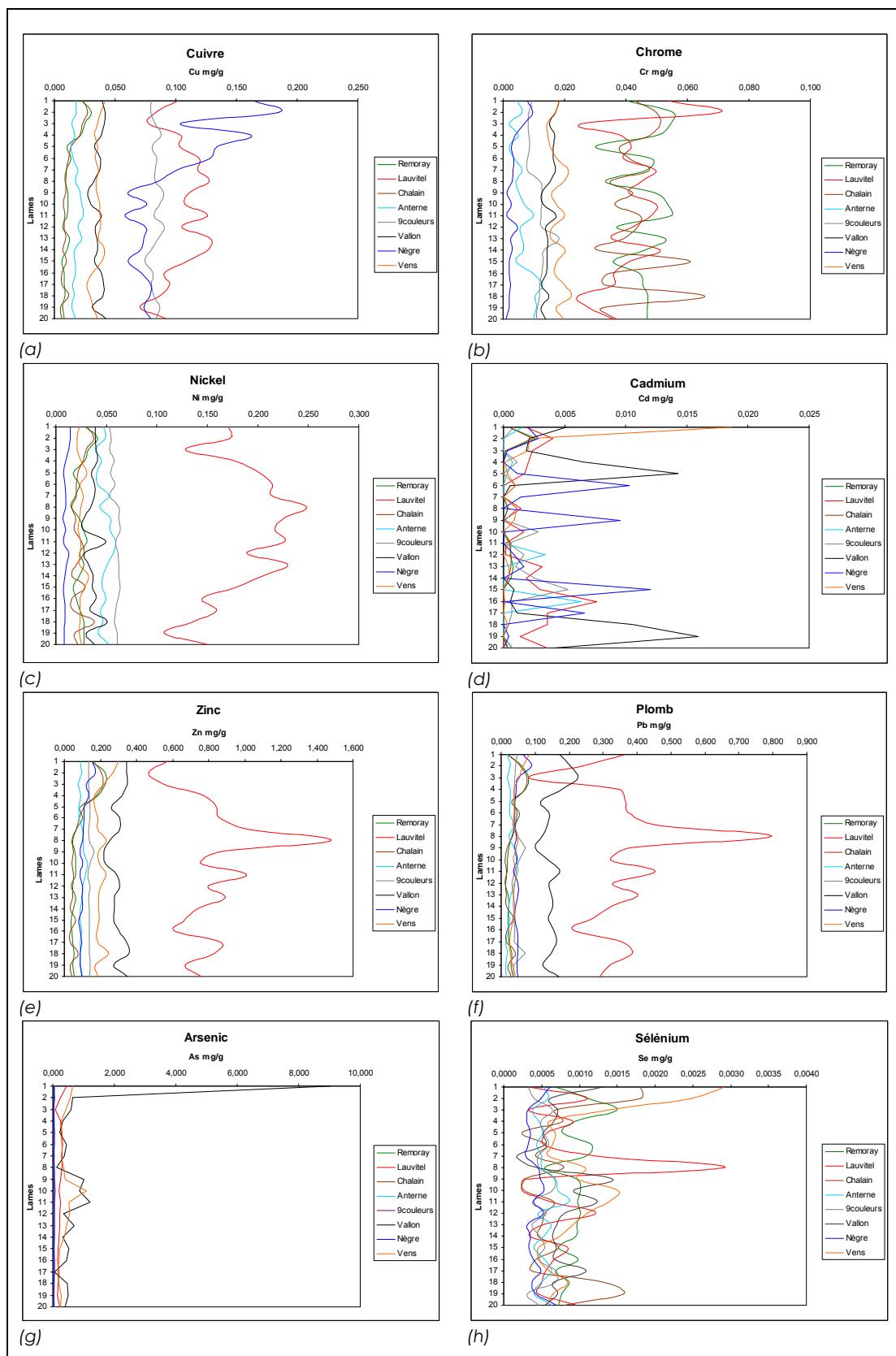


Figure 24 - Profils longitudinaux des teneurs en métaux des carottes de sédiment. A noter que les lacs ont tous des vitesses de sédimentation différentes et qu'il n'y a donc pas de synchronisme entre les différentes courbes. (a) cuivre; (b) chrome; (c) nickel; (d) cadmium; (e) zinc; (f) plomb; (g) arsenic; (h) sélénium.

## 2.3) Etude des pigments photorécepteurs et accessoires dans les sédiments

### 2.3.1) Préambule

L'analyse stratigraphique des pigments photorécepteurs et accessoires fossiles le long des carottes de sédiments lacustres permet de caractériser globalement les peuplements phytoplanctoniques historiques ainsi que leurs structures. Le tableau V présente les pigments analysés faisant office de marqueurs propres aux grands groupes phytoplanctoniques. A noter que dans certains cas, ces informations peuvent manquer de précision en raison de phénomènes de dégradation accrue de ces biomarqueurs pigmentaires. Par exemple, la fucoxanthine, pigment marqueur des diatomées, a tendance à mal se conserver dans les sédiments profonds<sup>26</sup>. Le lac d'Anterne n'est pas inclus dans l'analyse; les niveaux de pigments fossiles détectés dans les segments de la carotte de sédiment étant négligeables.

L'analyse des données pigmentaires est réalisée en deux temps, les pigments caroténoïdes et les chlorophylles b et c étant étudiés séparément de la chlorophylle a et de ses dérivés. Les graphiques des profils longitudinaux des teneurs en chlorophylle a et dérivés et des pigments caroténoïdes le long de la carotte sont présentés figure 25.

La chlorophylle a est commune à l'ensemble des groupes algaux, et représente donc une bonne image de l'importance de la biomasse phytoplanctonique globale (estimation de la production primaire). Les phéopigments et phéophorbides sont des produits dérivés de la dégradation de la chlorophylle a (le plus souvent dus au broutage par le zooplancton ou à la sénescence du phytoplancton). Ils traduisent donc l'intensité de la dégradation du phytoplancton. A la vue de la figure 25 la chlorophylle a et ses dérivés montrent des profils de réponse similaires, avec cependant un différentiel quantitatif. L'addition de la chlorophylle a et de ses dérivés peut donc dans certains cas donner une meilleure image de l'histoire de la biomasse des peuplements algaux.

L'abondance relative entre chacun de ces pigments dégradés peut varier sensiblement d'un endroit à un autre. Aucun modèle général ne semble apparemment clairement expliquer la dominance de l'un ou de l'autre au sein d'un système lacustre, bien qu'il semble y avoir une relation avec le type d'organisme brouteur ou encore les types de taxons algaux présents<sup>27, 28</sup>.

---

<sup>26</sup> Buchaca, T., Catalan, J., *On the contribution of phytoplankton and benthic biofilms to the sediment record of marker pigments in high mountain lakes*. J Paleolimnol (2008) 40:369-383.

<sup>27</sup> Vernet, M., Lorenzen, C., *The relative abundance of pheophorbide a in temperate marine waters*. Limnol. Oceanogr. (1987) 32(2): 352-358.

A noter cependant que dans le cas des sites d'étudiés, il semble y avoir une relation de dominance de l'un ou de l'autre produit de dégradation de la chlorophylle a avec l'altitude (cf. figure 25). En effet, à la vue des données, les phéophorbides dominent au sein des lacs alpins de haute montagne (9 Couleurs -2841m-, Nègre -2354m-, Vallon -2510m- et Vens 1<sup>er</sup> -2327m-), les phéophytines dominent sur les lacs jurassiens de moyenne altitude (Chalain -488m- et Remoray -850m-), alors qu'ils sont présents en quantités relativement équivalentes au sein du lac de Lauvitel, situé à une altitude intermédiaire (1495 m).

	Diatomées	Chrysophycées	Dinophycées	Cryptophycées	Chlorophycées	Cyanophycées	Eugléniens
Pigments chlorophylliens mesurés	Chlorophylle a	H	H	H	H	H	H
	Chlorophylle b						
	Chlorophylle c	H		H	H		H
	Phéophorbidé						
	Phéophytine						
- Produits de la dégradation de la chlorophylle -							
Caroténoïdes mesurés	Alloxanthine			H			
	Béta-carotène	H			H	H	L
	Canthaxanthine						
	Diatoxanthine	H					H
	Dinoxanthine			H			
	Equinénone						
	Fucoxanthine	H		H			
	Lutéine				H		
	Myroxanthophylle					H	
	Violaxanthine	L			L		
Autres Caroténoïdes	Zéaxanthine				L	H	
	Astaxanthine			H			
	Diadinoxanthine	H		H			
Néoxanthine	Néoxanthine	LL			L	L	L

Tableau v - Pigments associés aux principaux grands groupes d'algues phytoplanctoniques. H: présent en quantité importante, L: présent en faible quantité<sup>28, 30, 31, 32</sup>.

### 2.3.2) Analyse globale et représentation des données

Les grands groupes algaux ont donc des cortèges de pigments caroténoïdes types pouvant leur servir de marqueurs propres. La caractérisation des lacs de l'étude sur le plan du profil de leur cortège de pigments caroténoïdes le long de la carotte de sédiment est présenté figure 25. Cette analyse inter-groupes prend en compte les pigments caroténoïdes de l'ensemble des segments des carottes (présence/absence et abondance relative) et donne une idée de la variabilité intrinsèque à chaque plan d'eau, mais pas le sens de l'évolution temporelle de leurs cortèges pigmentaires. L'analyse montre que l'essentielle de l'inertie globale du jeu de données est due à la variabilité intra-groupes (71%), soit que la plupart des groupes ont du mal à se démarquer franchement d'un point de vue pigmentaire.

<sup>28</sup> E. J. H., Head et al., Accumulation of a pheophorbide a-like pigment in sediment traps during late stages of a spring bloom: a product of dying algae? Limnol.Oceanogr. (1994) 39(1): 176-181.

<sup>29</sup> Brotas,V., Plante-Cuny, M.R., Spatial and temporal patterns of microphytobenthic taxa of estuarine tidal flats in the Tagus Estuary (Portugal) using pigments analysis by HPLC. Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.171:43-57,1998

<sup>30</sup> Hsiu-Ping Li et al., Phytoplankton pigment analysis by HPLC and its application in algal community investigations. Bot. Bull. Acad. Sin. (2002) 43:283-290.

<sup>31</sup> Cotonnec, G. et al, Broutage et sélectivité du copépode *Eurytemora affinis* sur le pool nutritif dans l'estuaire de la Seine. CNRS EP 1750 ELICO, 1998.

<sup>32</sup> Leeben, A. et al., History of anthropogenically mediated eutrophication of Lake Peipsi as revealed by the stratigraphy of fossil pigments and molecular size fractions of pore-water dissolved organic matter. Hydrobiologia (2008) 599:49-58.

L'évolution des cortèges pigmentaires est par contre détaillée figure 27 afin d'appréhender une éventuelle direction dans l'évolution de la variabilité intrinsèque qui peut être importante selon les lacs.

En référence à la figure 25a, les positions moyennes des lacs (représentées par les cercles de couleur) sont relativement groupées du point de vue de leur profil pigmentaire. Cependant, les lacs de Chalain, de Vens 1<sup>er</sup> et Nègre montrent une variabilité intrinsèque relativement importante, avec des relevés se démarquant d'un point de vue pigmentaire. Avec des positions moyennes proches du centre de gravité de la figure 25a, les lacs de Lauvitel, du Vallon, des 9 Couleurs et de Remoray montrent un même profil de réponse global, soit une variabilité contenue avec des cortèges pigmentaires relativement équilibrés (sans dominances notables).

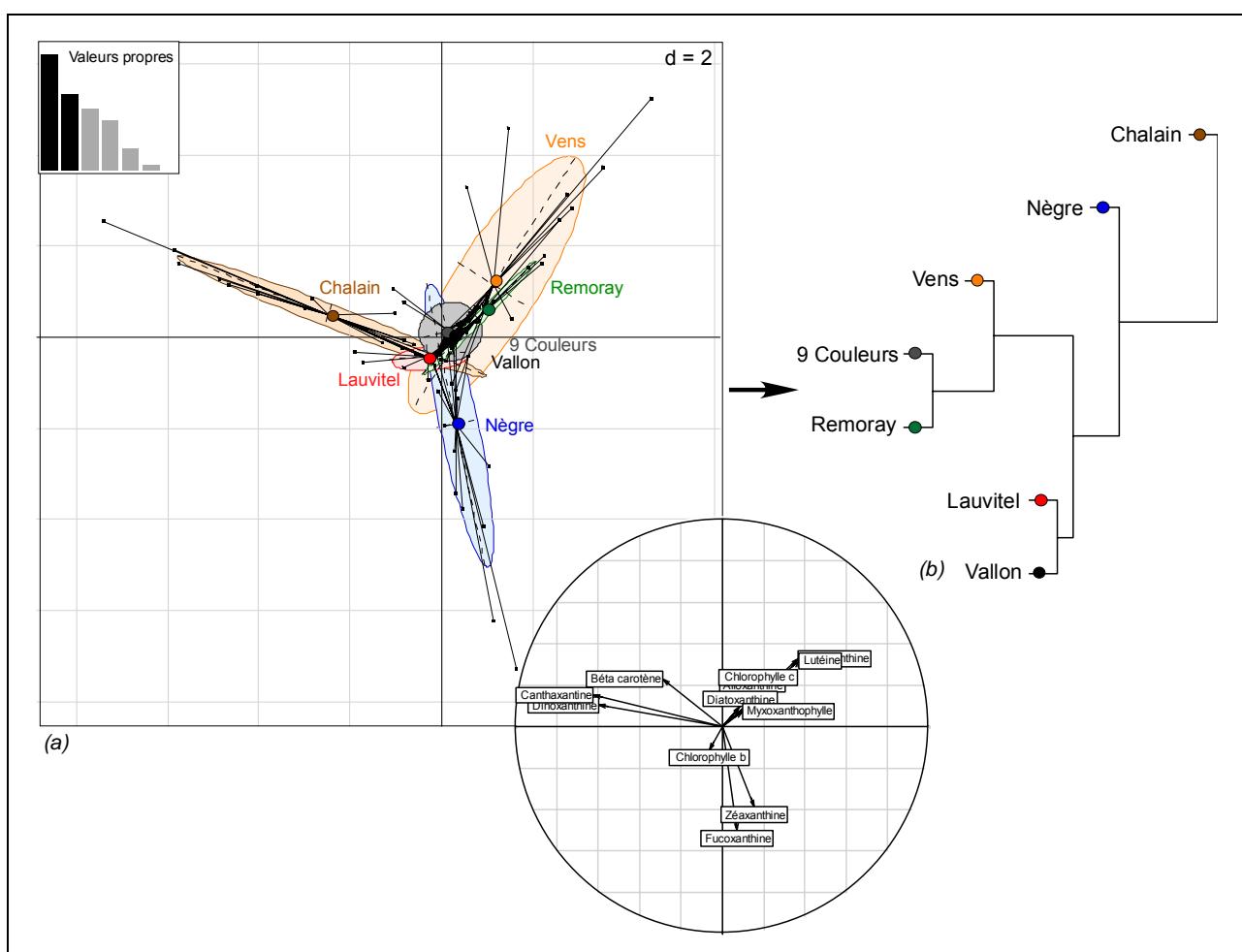


Figure 25 - Analyse inter-groupes réalisée sur le tableau de pigments photorécepteurs et accessoires quantifiés à partir des tranches des carottes de sédiment. 29% de l'inertie (ou variabilité) totale est inter-groupes et 71% est intra-groupes. (a) Positionnement des lacs sur le plan factoriel F1xF2 relativement à leurs profils pigmentaires propres. Pour chacun des lacs, les petits cercles de couleur représentent le centre de gravité -soit le positionnement moyen- du nuage points (les tranches de la carotte), et les ellipses représentent l'importance de la variabilité des profils. En bas à droite est représenté le cercle de corrélation avec les différents pigments pris en compte dans l'analyse. (b) Dendrogramme issu de l'analyse inter-groupes (méthode de Ward).

### 2.3.3) Lac des 9 Couleurs

La figure 26a montre que l'évolution de la production primaire du lac des 9 Couleurs est caractérisée par une relative constance des teneurs en chlorophylle a, à faible taux, et en phéophorbides, à un taux plus important. Deux chutes notables de concentrations des profils pigmentaires sont relevées sur les segments 8 (~années 1600) et 12 (~1375). Ces brusques diminutions, causées par une réduction de la productivité primaire ou encore à une dégradation accrue des biomarqueurs, sont sans doute à rattacher à des événements climatiques ponctuels.

Les pigments caroténoïdes fossiles caractérisant la position moyenne du lac des 9 Couleurs (cf. figure 25a et figure 26a) sont la lutéine, la violaxanthine, l'alloxanthine et la chlorophylle c. Ces marqueurs pigmentaires correspondent à des peuplements types composés de chlorophycées, de diatomées et de cryptophycées. Cette structure algale traduirait un plan d'eau globalement mésotrophe à faible tendance oligotrophe. La relative stabilité des peuplements algaux du plan d'eau se traduit visuellement figures 25a et 27a par une très faible amplitude des fluctuations sans tendance évolutive particulière.

### 2.3.4) Lac de Chalain

La production primaire du lac de Chalain (figure 26b), est relativement stable, avec cependant deux pics notables. Le premier, situé au niveau du segment 14, correspond aux années 1750-1768. Ce pic de production ne peut être mis en parallèle ni avec la physico-chimie, ni avec un évènement historique. Il est par contre concomitant à une augmentation de pigments caroténoïdes tels que l'alloxanthine, la lutéine, la violaxanthine et la myroxanthophylle, ce qui correspondrait à des cortèges phytoplanctoniques plus thermophiles (type crypto-chloro-cyanophycées), peut être dû à un évènement climatique. Le second pic est situé au niveau de la transition des segments 1 et 2, et correspond aux années 1965-2001. Ce pic est concomitant avec des augmentations de phosphore et d'azote et correspond à la date de mise en place d'une base de loisir aux environs immédiats du lac.

Les cortèges pigmentaires fossiles caractérisant la position moyenne du lac de Chalain (cf. figures 26b et 25a) sont, historiquement, l'alloxanthine, la dinoxanthine, la bétacarotène et la canthaxanthine. La canthaxanthine semble plutôt être un marqueur zooplanctonique<sup>33</sup> (et serait donc un marqueur de préation) et éventuellement de quelques cyanophycées.

<sup>33</sup> Leeben, A. et al., History of anthropogenically mediated eutrophication of Lake Peipsi as revealed by the stratigraphy of fossil pigments and molecular size fractions of pore-water dissolved organic matter. Hydrobiologia (2008) 599:49-58.



Figure 26 - Sur la gauche sont présentés les histogrammes des teneurs longitudinales en chlorophylle a, phéophytines, phéophorbides, de la somme chlorophylle a + phéophytines (Ch.a+Ph.) et des pigments non identifiés à travers les tranches de la carotte de sédiment pour chaque lac de l'étude. Les teneurs en pigments caroténoïdes sont présentées sur la droite. (a) Lac des 9 Couleurs; (b) lac de Chalain; (c) lac de Lauvitel; (d) lac Nègre; (e) lac de Remoray; (f) lac de Vallon; (g) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

Ces marqueurs pigmentaires correspondent donc à des peuplements types composés de crypto-dinophycées et diatomées avec potentiellement chlorocyanophycées et eugléniens, structure traduisant un plan d'eau globalement mésotrophe à tendance eutrophe. A noter la très forte augmentation de lutéine (chlorophycées) sur le dernier segment, avec une baisse des autres pigments moins pénalisants en termes de trophie. D'un point de vue évolutif (cf. figures 25a et 27b), les peuplements phytoplanctoniques du lac de Chalain semblent relativement fluctuants avec une certaine sensibilité aux variations du niveau de trophie d'origine anthropique ou naturelle.

### 2.3.5) Lac de Lauvitel

Le lac de Lauvitel a une production primaire relativement stable, avec cependant une augmentation faible mais continue des segment 10 à 1, correspondant à la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle (figure 26c). Les pressions anthropiques étant faibles (randonneurs, prairies d'estive), ce phénomène est à mettre sans doute en relation avec un vieillissement naturel du lac ou à un évènement climatique plus global.

Les cortèges de pigments caroténoïdes fossiles caractérisant de façon globale la position du lac de Lauvitel (cf. figure 26c et figure 25a) sont la lutéine, la violaxanthine, l'alloxanthine, la chlorophylle b, la diatoxanthine et la dinoxanthine. Ces marqueurs pigmentaires correspondent à un peuplement type chlorophycées/ cryptophycées/ dinophycées, et diatomées. Cette structure algale traduirait un plan d'eau globalement mésotrophe. La relative stabilité des peuplements藻aux du plan d'eau se traduit visuellement figures 25a et 27c par une position centrale et une faible amplitude des fluctuations sans tendance évolutive bien caractérisée.

### 2.3.6) Lac Nègre

D'après les analyses radiochronologique (§II 1.2) et granulométrique laser (§II 1.3), les segments 10 à 5 de la carotte du lac Nègre, correspondant aux années 1900, se distinguent fortement. Les deux hypothèses émises sont un phénomène de 'slumping' (apport rapide, massif et important de sédiment) ou la remobilisation du sédiment par un évènement sismique (un séisme relativement important est signalé sur la commune en 1887). A la vue du pic de production au niveau des segments concernés (cf. figure 26d), l'hypothèse du séisme est privilégiée, car un apport important de matière aurait sans doute dilué l'information pigmentaire.

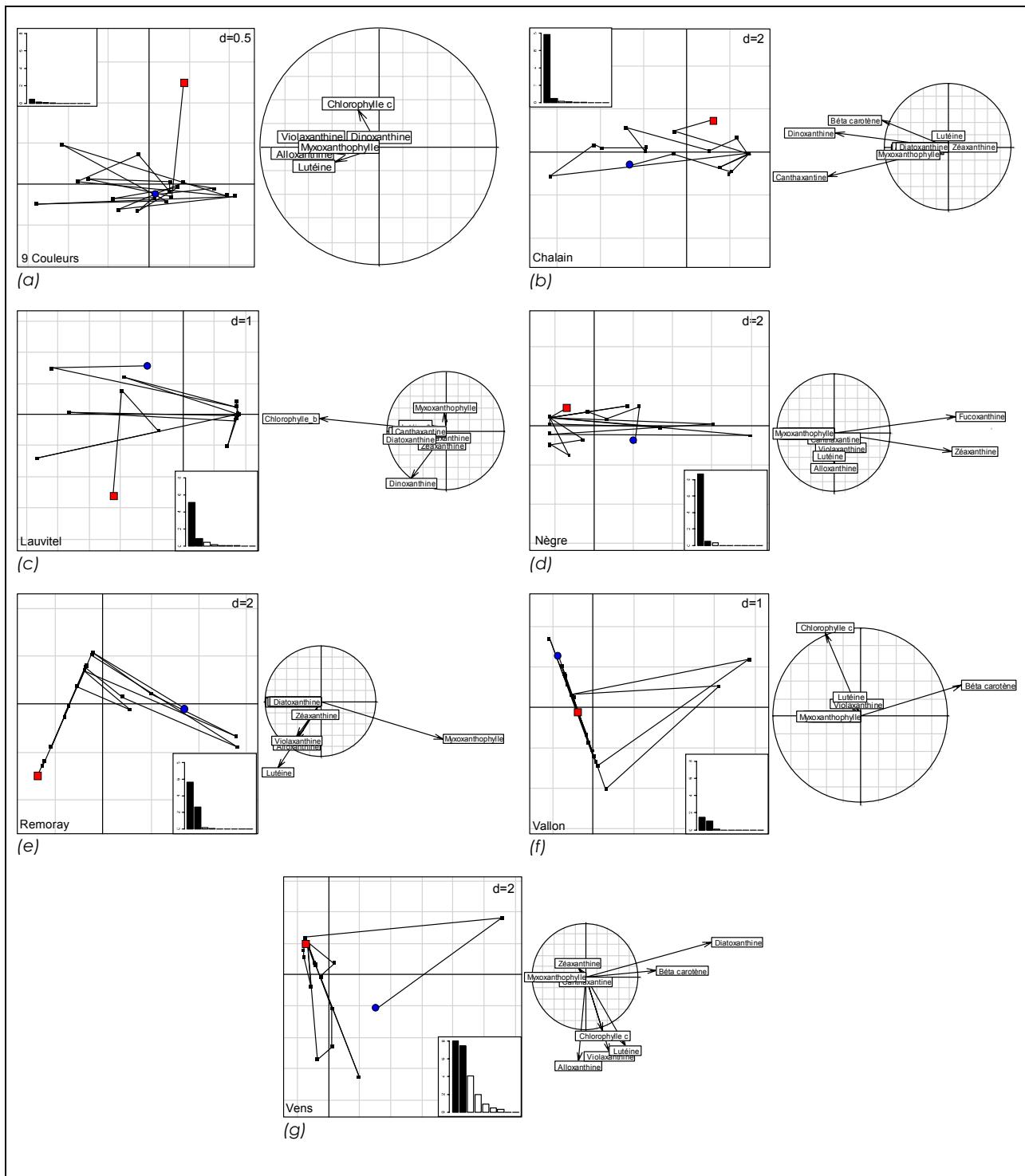


Figure 27 - Analyses séparées par lacs issues d'une analyse intra-groupes basée sur le tableau de pigments photorécepteurs et accessoires quantifiés à partir des tranches des carottes de sédiment. Pour chacun des lacs, l'évolution (et la proximité) de leur profil pigmentaire est représenté sur un plan factoriel F1xF2. La position la plus récente - la tranche de carotte la plus superficielle - est représentée par un carré rouge, et la position le plus ancienne - la tranche la plus profonde - par un cercle bleu. Le cercle de corrélation avec les pigments pris en compte dans l'analyse est représenté sur la droite. 71% de l'inertie (ou variabilité) totale du tableau floristique est intra-groupes. Les histogrammes de valeurs propres sont à la même échelle et donnent une idée de l'apport de chacun des lacs à la variabilité totale. (a) lac des 9 Couleurs; (b) lac de Chalain; (c) lac de Lauvitel; (d) lac Nègre; (e) lac de Remoray; (f) lac de Vallon; (g) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

A première vue (cf. figures 26d et 25a), le lac Nègre est caractérisé par une production globalement faible, entrecoupée de pics relativement importants, modifiant les structures des cortèges pigmentaires (pics de zéaxanthine par exemple). Ces pics ne sont pas concomitants avec les données physico-chimiques, et correspondent globalement aux segments concernées par le phénomène décrit précédemment (segments 10 à 5).

D'après la figure 27d, en excluant les segments concernés par le phénomène, les cortèges pigmentaires du lac Nègre sont stables, sans évolution marquée. Un cortège type est constitué d'alloxanthine, fucoxanthine, violaxanthine, lutéine et zéaxanthine, ce qui correspondrait à un peuplement type de diatomées et de chloro-crypto-cyanophycées, soit comme un milieu oligotrophe à tendance mésotrophe.

#### 2.3.7) Lac de Remoray

En termes de production phytoplanctonique (cf. figure 26e), le lac de Remoray se distingue par une augmentation importante et continue de chlorophylle a à partir du relevé 4 de la carotte (correspondant au début des années 50). Cette augmentation est concomitante avec des augmentations d'azote et de phosphore à cette même période (cf. figures 21a et g et présentation du lac Mat. & Méth. §1.6).

Globalement, les cortèges de pigments caroténoïdes fossiles caractérisant la position moyenne du lac de Remoray (cf. figure 26e et figure 25a) sont la lutéine, la myroxanthophylle, l'alloxanthine et la chlorophylle c. Ces marqueurs pigmentaires correspondent à des peuplements types composés de (en ordre d'importance relative): chlorophycées, cryptophycées, cyanobactéries et diatomées. Ces groupes algaux repères traduisent un plan d'eau riche en nutriments, subissant une évolution trophique<sup>34</sup>. Cet enrichissement du milieu se retrouve visuellement sur la figure 27e, avec les 4 derniers relevés (soit ~50 dernières années) évoluant de façon linéaire vers des positions caractérisées par le cortège pigmentaire lutéine/ violaxanthine/ alloxanthine soit par les groupes chlorophycées/ cryptophycées/ cyanobactéries.

#### 2.3.8) Lac du Vallon

La production primaire du lac de Vallon est régulière mais se caractérise par des pics importants et réguliers répartis tous les 40 à 60 ans (cf. figures 26f et 25a). Ces pics récurrents peuvent être expliqués éventuellement par des phénomènes cycliques écologiques ou climatiques. A noter cependant que le pic comprenant les 4 segments les plus superficiels

---

<sup>34</sup> Barbe, J. et al., Actualisation de la méthode de la diagnose rapide des plans d'eau, CEMAGREF, Lyon, 2003.

(soit une grande partie du 20<sup>e</sup> siècle) sont concomitants avec une augmentation du phosphore et de l'azote.

Les grands pics de production correspondent essentiellement à des pics de chlorophylle c et secondairement de lutéine. Le cortège pigmentaire type du lac de Vallon est donc composé de chlorophylle c, de lutéine et de violaxanthine, correspondant à des peuplements dominés par les diatomées, accompagnées de chlorophycées et, en moindre mesure, de cryptophycées et de cyanophycées. La figure 27f ne montre pas d'évolution marquée des peuplements, et les cortèges pigmentaires traduisent un lac à tendance oligotrophe.

### 2.3.9) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

Les profils pigmentaires du lac de Vens 1<sup>er</sup> sont caractérisés par une grande amplitude de variation, due à de grands pics de production phytoplanctonique (cf. figures 26g et 25a). Ces pics sont concomitants avec une forte augmentation du phosphore, de l'azote, du carbone et de la matière organique, ce qui laisse penser à un apport exogène de nutriments durant ces périodes. Le premier se situe entre les lames 8 et 13, soit entre le début du 16<sup>e</sup> siècle et le milieu du 18<sup>e</sup>. Le second pic couvre le 20<sup>e</sup> siècle.

Le cortège pigmentaire type du lac de Vens 1<sup>er</sup> est composé d'alloxanthine, de violaxanthine, de lutéine, de diatoxanthine et de chlorophylle c. Un peuplement type serait donc composé de chlorophycées, de cryptophycées et de diatomées, avec quelques périodes de production plus importante, caractérisant un lac plutôt oligo-mésotrophe. En termes d'évolution, le lac de Vens 1<sup>er</sup> ne semble pas évoluer dans une direction trophique particulière malgré les grandes amplitudes de la variabilité de ses peuplements (cf. figure 27g). L'augmentation importante des nutriments, d'origine incertaine, peut par contre faire évoluer ce lac rapidement d'un point de vue trophique.

## 2.4) Analyse par l'étude des traits écologiques des diatomées

### 2.4.1) Préambule

L'objectif de cette analyse est de caractériser et de classer les plans d'eau sur le plan de leur fonctionnalité traduite par les traits écologiques des taxons échantillonnés. Les traits écologiques représentent un ensemble d'informations qualitatives et quantitatives associées à l'écologie des organismes, et permettent ainsi de calculer le profil écologique global d'un écosystème. Chaque trait, considéré comme une variable, est lui-même subdivisé en différents niveaux ou modalités. Les traits écologiques retenus et leurs modalités sont listés figure 29c.

Cette démarche analytique par les traits d'histoire de vie permet de s'affranchir des limites biogéographiques des taxons. L'information qui en découle est souvent bien plus parlante car elle permet de comparer des stations distinctes sur le plan de leur typologie naturelle. En effet, en utilisant les organismes comme descripteurs fonctionnels, cela permet d'évaluer ou de cibler l'impact des perturbations tout en s'affranchissant des fluctuations naturelles temporelles ou spatiales des communautés vivantes. Cette démarche s'axe sur une logique d'étude des relations de combinaisons de traits traduisant l'état ou la fonctionnalité des plans d'eau étudiés.

L'analyse repose sur le logiciel OMNIDIA<sup>35</sup> vers. 5.1(2008), la base de données la plus complète à ce jour portant sur les traits écologiques des diatomées, en considérant que les traits écologiques de la base OMNIDIA sont applicables aux lacs d'altitude. L'information peut cependant être partielle, car toutes les diatomées recensées dans le logiciel n'ont pas forcément une information renseignée pour tous les traits. Un profil donné pour un lac peut donc dans certains cas reposer sur un nombre variable de taxon pris en compte en fonction du trait considéré. La figure 28 donne une idée de l'information disponible et de la proportion de taxons pris en compte dans les analyses portant sur les traits écologiques des diatomées. Les résultats doivent donc être relativisés dans certains cas lorsqu'ils reposent sur un nombre trop restreint de taxons.

Les profils sont en général à considérer en regard de la part d'information disponible pour un trait. Ainsi, le lac de Lauvitel est le lac qui présente les peuplements de diatomées les mieux renseignés : 86% des taxons en moyenne. Viennent ensuite les lacs des 9 Couleurs et de Remoray (plus de 70% de taxons renseignés en moyenne par trait). Le premier a cependant une information déficiente pour le trait 'oxygénation' et le deuxième pour la trophie. A noter que, pour le lac des 9 Couleurs, le calcul des profils est à mettre en parallèle avec les faibles abondances de diatomées sur certaines tranches de la carotte (cf. Résultats & discussion §2.5.1). Ainsi sur certaines tranches, les profils peuvent n'être basés que sur quelques individus. Cette précaution concerne également le lac d'Anterne.

Ces problèmes d'abondances de diatomées sur les lacs des 9 Couleurs et d'Anterne semblent avoir deux origines distinctes. Pour le premier lac, il semble que ces faibles densités soient à mettre en lien avec sa faible productivité. Sur le lac d'Anterne, il semble par contre y avoir un problème de dissolution des frustules qui peut être assez rapide (comm. pers. F. Arnaud, laboratoire EDYTEM, Université de Savoie). Les sédiments du lac conserveraient ainsi mal les diatomées.

---

<sup>35</sup> Lecointe, C., Coste, M., Prygiel, J., "OMNIDIA" software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia* (1993) 269/270:509-513.

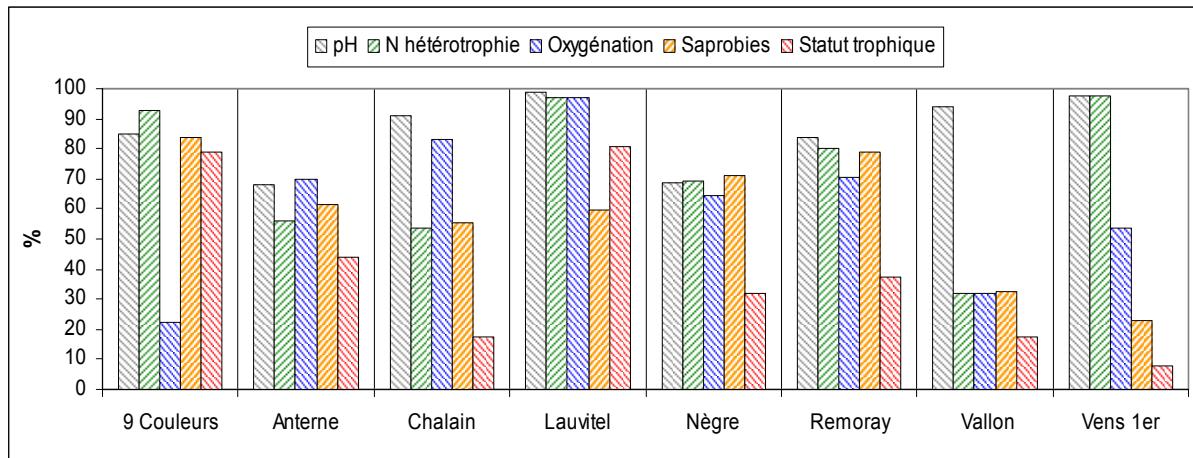


Figure 28 – Pourcentage par lacs des taxons dont l'information pour un trait écologique donné est disponible sur OMNIDIA.

#### 2.4.2) Analyse globale et représentation des données

Sur la figure 29, les lacs sont positionnés sur le plan factoriel F1xF2 de l'analyse inter-groupes en fonction de leurs fonctionnalités traduites par leurs peuplements diatomiques. La variabilité des profils fonctionnels des différents segments de carotte peut être très importante, comme sur le lac d'Anterne, ou relativement contenue, comme sur le lac du Vallon par exemple. Etant donné l'ampleur de la variabilité de certains lacs (50% de l'inertie totale seulement est inter-groupes), le rapprochement des lacs présentant le plus de similitudes est d'autant plus relatif (cf. figure 29a et b). Trois groupes fonctionnels peuvent cependant être différenciés : le groupe 1 représenté par Lauvitel, le groupe 2 représenté par 9 Couleurs et Anterne, et le groupe 3 comprenant tous les autres lacs qui se différencient moins facilement dans l'analyse globale. A noter que le groupe 1 comprend les 2 lacs présentant les profils les plus variables en fonction de leurs segments de carotte, et correspondent également aux lacs présentant les abondances de diatomées les plus faible. Des analyses individuelles par lac sont présentées dans les paragraphes suivants. Les évolutions des profils écologiques des lacs sont présentées figure 30 afin d'appréhender une éventuelle direction dans l'évolution de leur variabilité intrinsèque.

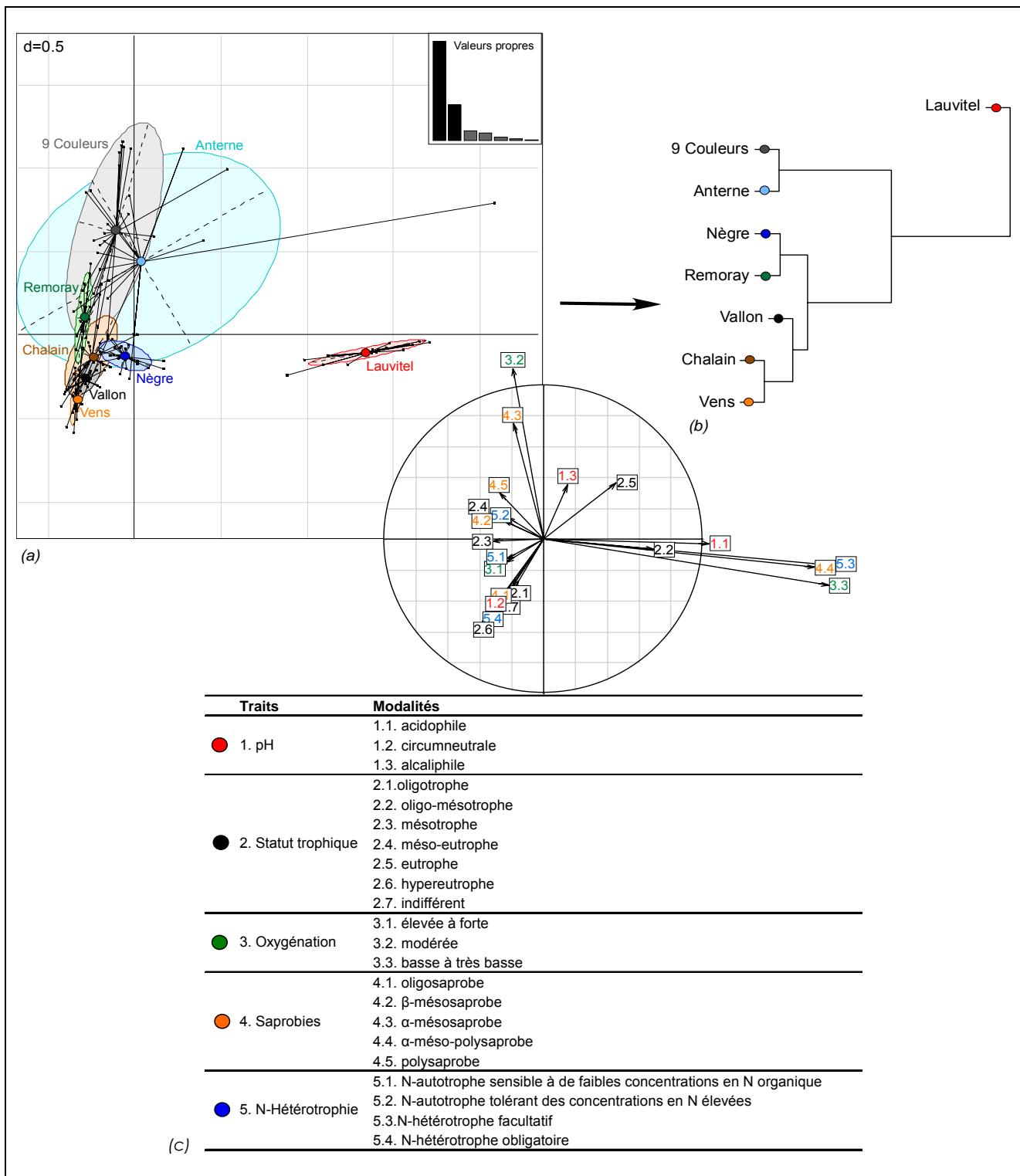


Figure 29 - Analyse inter-groupes réalisée sur le tableau de données de traits écologiques et physiologiques des peuplements diatomiques en abondances relatives. 50% de l'inertie (ou variabilité) totale est inter-groupes et 50% est intra-groupes. (a) Positionnement des lacs sur le plan factoriel F1xF2 relativement à leur fonctionnalité traduite par le profil global de traits de leurs peuplements diatomiques. Pour chacun des lacs, les petits cercles de couleur représentent le centre de gravité -soit le positionnement moyen- du nuage de points (les tranches de carotte), et les ellipses représentent l'importance de la variabilité. En bas à droite est représenté le cercle de corrélation avec les différentes modalités de traits. Les codes des traits et de leurs modalités sont indiqués dans la table 'c'. (b) Dendrogramme issu de l'analyse inter-groupes (méthode de Ward) groupant les lacs sur la base des traits écologiques de leurs peuplements diatomiques. (c) Table des traits et de leurs modalités utilisés dans l'analyse.

#### 2.4.3) Lac des 9 Couleurs

La figure 29a montre une amplitude de variabilité de profil relativement importante selon les segments de carotte analysés. Ce lac ayant des abondances en diatomées relativement faibles, cette variabilité repose sans doute sur le fait que les profils reposent sur un faible nombre de taxons. Le profil écologique global du lac des 9 Couleurs est déduit en se basant sur le profil moyen des segments (le centre de gravité du nuage de points) et les modalités de traits dominantes à travers la carotte de sédiment. Le profil type du peuplement diatomique moyen du lac des 9 Couleurs est donc défini comme:

- pH: circumneutral;
- trophie: méso-eutrophe;
- oxygénation: preferendum pour élevée-forte/modérée;
- sapробie:  $\beta$ -mésosaprobe à  $a$ -mésosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

L'évolution du profil écologique traduit par les peuplements diatomiques à travers les segments de la carotte de sédiment du lac des 9 Couleurs peut être visualisée sur la figure 30a. L'amplitude de la variabilité est relativement importante par rapport aux autres lacs, mais il ne semble pas y avoir de tendance évolutive particulière.

#### 2.4.4) Lac d'Anterne

Tel qu'observé sur la figure 29a, le lac d'Anterne montre une amplitude de variabilité de profil importante entre les différents segments. Tout comme le lac des 9 Couleurs, cette variabilité repose sans doute sur le fait que les profils reposent sur un faible nombre de taxons. Le profil écologique global du lac d'Anterne déduit en se basant sur le profil du peuplement diatomique moyen des segments et les modalités de traits dominantes, donne comme profil écologique d'un peuplement diatomique type:

- pH: alcaliphile (repose sur un substrat schisto-marneux);
- trophie: indifférent;
- oxygénation: preferendum pour modérée;
- sapробie:  $\beta$ -mésosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

L'évolution du profil écologique traduit à travers les segments de la carotte de sédiment du lac d'Anterne peut être visualisée sur la figure 30b. L'amplitude de la variabilité est très importante par rapport aux autres lacs, mais aucune tendance évolutive ne se dessine.

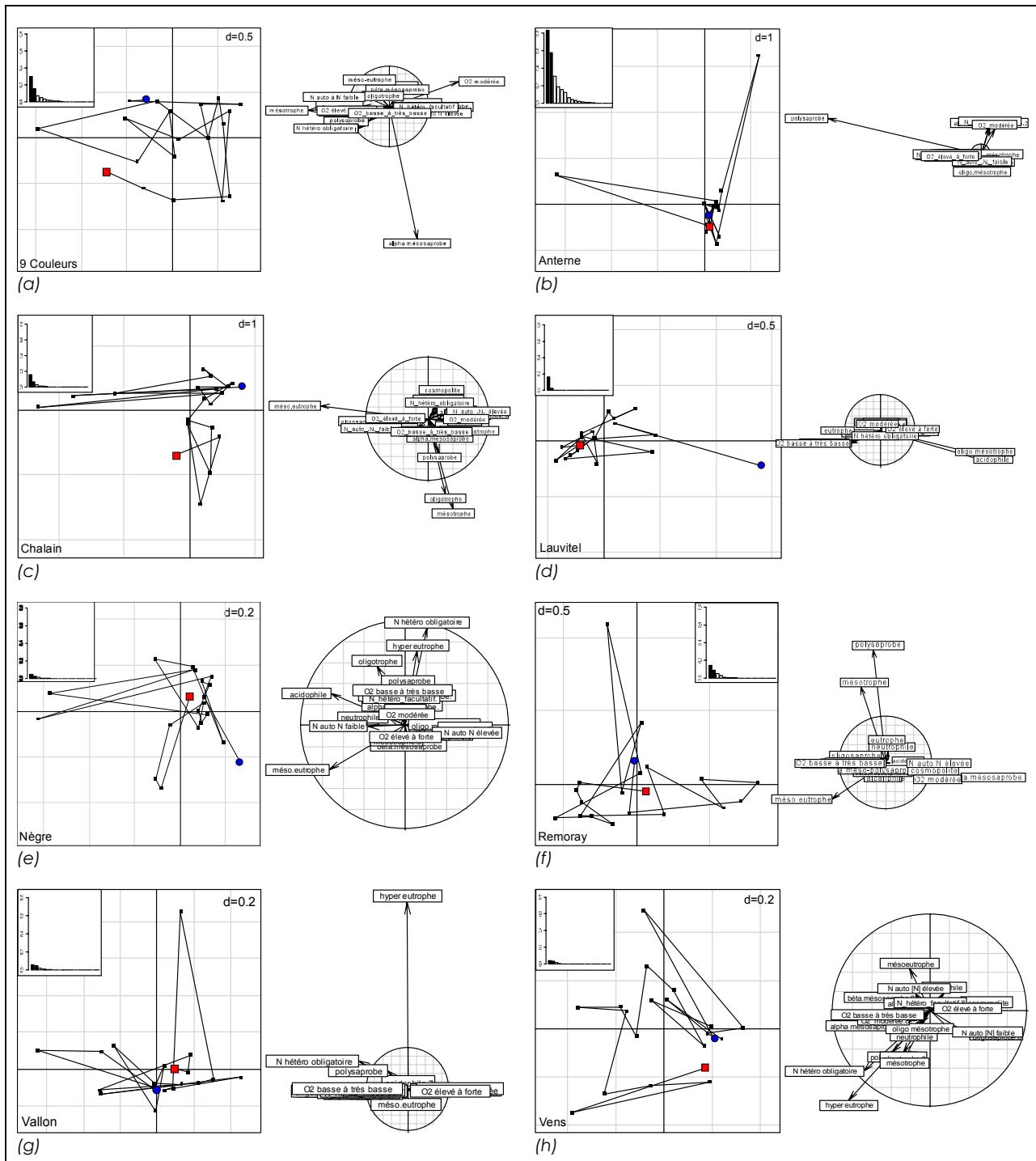


Figure 30 - Analyses séparées par lacs issues d'une analyse intra-groupes basée sur le tableau de traits écologiques et physiologiques des peuplements diatomiques. Pour chacun des lacs, l'évolution (et la proximité) de la fonctionnalité des lacs traduite par les traits est représentée sur un plan factoriel F1xF2. La position la plus récente -la tranche de carotte la plus superficielle- est représentée par un carré rouge, et la position le plus ancienne -la tranche la plus profonde- par un cercle bleu. Le cercle de corrélation des différents paramètres physico-chimiques est représenté sur la droite. 50% de l'inertie (ou variabilité) totale du tableau est inter-groupes et 50% est intra-groupes. Les histogrammes de valeurs propres sont à la même échelle et donnent une idée de l'apport de chacun des lacs à la variabilité totale. (a) lac des 9 Couleurs; (b) lac d'Anterne; (c) lac de Chalain; (d) lac de Lauvitel; (e) lac Nègre; (f) lac de Remoray; (g) lac de Vallon; (h) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

#### 2.4.5) Lac de Chalain

La figure 29a montre une amplitude de variabilité de profil écologique moyenne entre les segments de carotte, et se positionne proche du centre de gravité de la figure, traduisant un profil sans caractéristique particulière le différentiant des 4 autres lacs du groupe. Le profil écologique global du lac de Chalain, déduit en se basant sur le profil moyen des segments et les modalités de traits dominantes à travers la carotte de sédiment, donne comme profil écologique d'un peuplement diatomique type:

- pH: circumneutral;
- trophie: indifférent;
- oxygénation: preferendum pour élevée-forte;
- sapробie: oligosaprobe à β-mésosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

L'évolution du profil écologique traduit par les peuplements diatomiques à travers les segments de la carotte de sédiment peut être visualisée sur la figure 30c. L'amplitude de la variabilité est modérée par rapport aux autres lacs, mais les profils écologiques ne laissent transparaître aucune tendance évolutive particulière.

#### 2.4.6) Lac de Lauvitel

Tel qu'observé sur la figure 29a, le lac de Lauvitel montre une amplitude de variabilité de profil écologique modérée et se singularise bien par rapport aux autres lacs. Ses caractéristiques mésologiques particulières (caractère marnant, profondeur, configuration ...) se traduisent certainement au niveau du profil écologique moyen de son peuplement diatomique. Le profil écologique global du lac de Lauvitel, déduit en se basant sur le profil du peuplement diatomique moyen à travers les segments et les modalités de traits dominantes, donne comme profil écologique type :

- pH: acidophile;
- trophie: oligo-mésotrophe et eutrophe;
- oxygénation: preferendum pour basse à très basse;
- sapробie: α-méso-polysaprobe;
- N-hétérotrophie: N-hétérotrophe facultatif.

L'évolution temporelle du profil écologique, au travers des segments de la carotte de sédiment (cf. figure 30d), ne montre aucune tendance évolutive.

#### 2.4.7) Lac Nègre

La figure 29a montre une amplitude de variabilité de profil écologique relativement faible entre les segments de carotte, et se positionne proche du centre de gravité de la figure, traduisant un profil global proche de la position moyenne des autres lacs. Le profil écologique global du lac Nègre, déduit en se basant sur le profil moyen des segments et les modalités de traits dominantes à travers la carotte de sédiment, donne comme profil écologique type de peuplement diatomique :

- pH: circumneutral;
- trophie: indifférent;
- oxygénation: preferendum pour élevée à forte;
- saprobie: oligosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

L'évolution du profil écologique traduit par les peuplements diatomiques à travers les segments de la carotte de sédiment peut être visualisée sur la figure 30e, et ne montre pas de tendance évolutive claire.

#### 2.4.8) Lac de Remoray

La figure 29a montre une amplitude de variabilité de profil écologique entre ses segments de carotte relativement modérée comparativement aux autres lacs. Il se positionne proche du centre de gravité de la figure, le positionnant comme ayant une position moyenne par rapport aux autres lacs. Le profil écologique global de ses peuplements diatomiques, en se basant sur le profil moyen des segments et les modalités de traits dominantes, donne comme profil écologique type:

- pH: circumneutral à alcaliphile;
- trophie: mésotrophe;
- oxygénation: preferendum pour élevée à forte;
- saprobie:  $\beta$ -mésosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

La figure 30f ne montre pas de direction particulière dans l'évolution du profil écologique des peuplements diatomiques à travers les segments de la carotte.

#### 2.4.9) Lac du Vallon

La figure 29a montre une faible amplitude de la variation entre les profils écologiques des différents segments de carotte, et se positionne comme ayant un profil global proche de la position moyenne des autres lacs. Le profil écologique global du lac du Vallon, basé sur le profil moyen des différents segments et sur les modalités de traits dominantes à travers la carotte de sédiment, donne comme profil écologique type de son peuplement diatomique:

- pH: circumneutral;
- trophie: indifférent;
- oxygénation: preferendum pour élevée à forte;
- saprobie: oligosaprobe à  $\beta$ -mésosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

La figure 30f ne montre pas de direction particulière dans l'évolution du profil écologique des peuplements diatomiques à travers les segments de la carotte.

#### 2.4.10) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

L'amplitude de la variabilité des profils écologiques telle qu'illustrée dans la figure 29a montre une faible dispersion des segments de carotte, et se positionne proche du centre de gravité de la figure. Ce dernier point traduit un profil global proche de la position moyenne des autres lacs. Le profil écologique global du lac, déduit en se basant sur le profil moyen des segments et les modalités de traits dominantes à travers la carotte de sédiment, donne comme profil écologique type de son peuplement diatomique :

- pH: circumneutral;
- trophie: indifférent;
- oxygénation: preferendum pour élevée à forte;
- saprobie: oligosaprobe à  $\beta$ -mésosaprobe;
- N-hétérotrophie: N-autotrophe tolérant des [N] élevées.

L'évolution du profil écologique traduit par les peuplements diatomiques à travers les segments de la carotte de sédiment peut être visualisée sur la figure 30g, et ne montre pas de tendance évolutive claire.

2.4.11) Analyse de la relation entre la caractérisation des lacs par les traits écologiques de leurs peuplements diatomiques et par leur physico-chimie

Une analyse de co-inertie a été réalisée entre les deux analyses inter-groupes réalisées sur le tableau de traits écologiques et le tableau de physico-chimie. Le coefficient de corrélation associé à la co-inertie (RV) est de 0,49. Il traduit une corrélation moyenne entre les structures des deux tableaux. Les lacs ne se groupent donc que très grossièrement de la même manière suivant que leur analyse soit réalisée par la physico-chimie ou par le biais des traits écologiques des diatomées. La figure 31a présente les résultats de l'analyse de co-inertie et illustre donc le meilleur compromis de co-structure entre les deux tableaux.

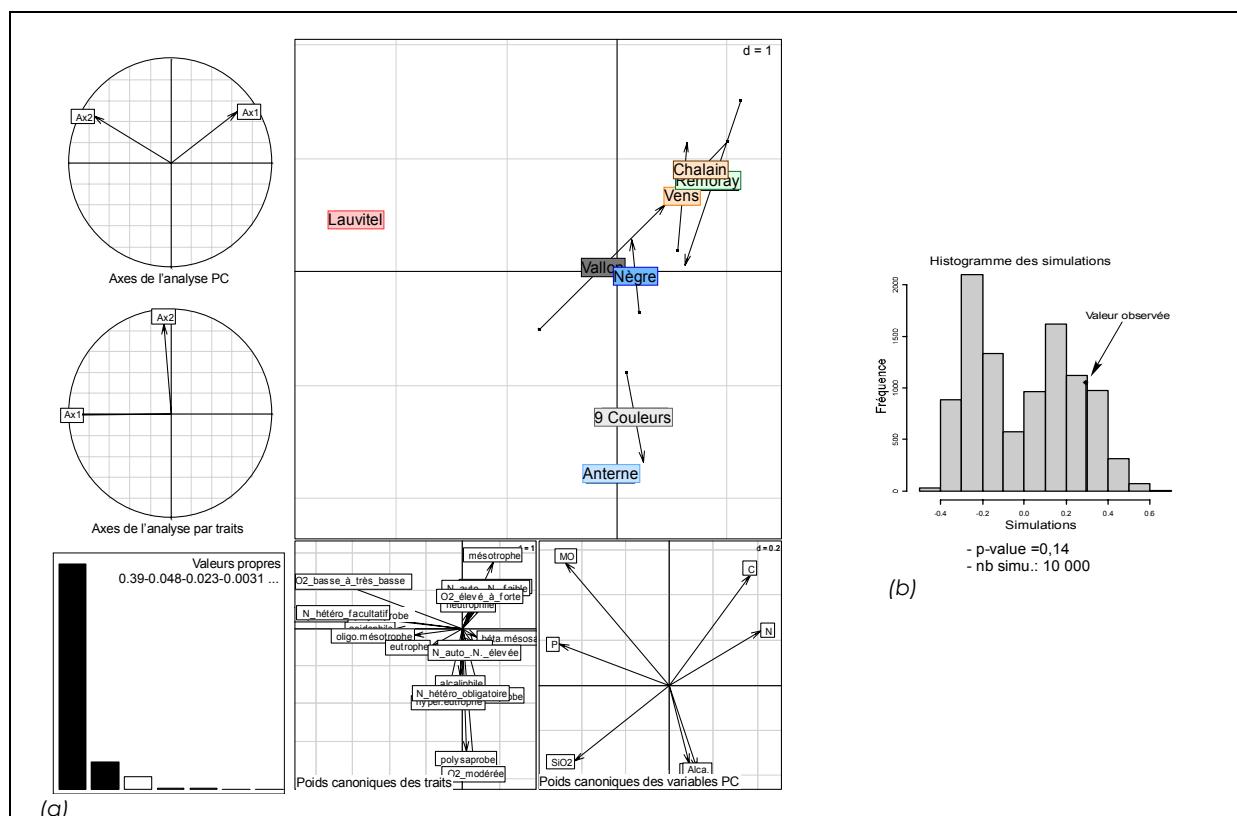


Figure 31 - Etude de la relation entre la caractérisation des lacs par leur fonctionnalité traduite par les traits écologiques et physiologiques de leurs peuplements diatomiques et la caractérisation des lacs par leur physico-chimie. (a) Analyse de co-inertie entre les deux analyses inter-groupes réalisées sur le tableau de traits et le tableau de physico-chimie. Avec un  $RV=0,49$ , les structures des deux tableaux montrent une tendance de corrélation. En haut à droite, sont représentées sur le plan factoriel F1xF2 les positions relatives des lacs en prenant en compte leur fonctionnalité traduite par les traits et leur physico-chimie. Cette figure représente donc le meilleur compromis de co-structure entre les deux tableaux. (b) Test de Mantel réalisé entre les matrices de distance issues des analyses inter-groupes réalisées sur le tableau de PC et sur le tableau floristique. Avec  $p=0,14$ , une relative tendance de congruence entre les 2 matrices de distance est observée.

2.5) Caractérisation spatiale et évolutive des lacs par l'étude des peuplements diatomiques fossiles.

### 2.5.1) Evolution des indices biocénotiques

#### 2.5.1.1) Préambule

Quatre indices biocénotiques ont été calculés pour les lacs sur l'ensemble des lames de diatomées (représentant les segments ou les tranches du carottage) :

- la richesse ( $S$ );
- l'abondance totale ( $Q$ ) tous taxons confondus;
- l'indice de diversité de Shannon & Weaver ( $H'$ );
- l'indice d'équitabilité de Pielou ( $J'$ ).

Ces quatre indices sont des descripteurs de la structure des communautés. Leur suivi sur l'ensemble d'une carotte permet d'appréhender l'évolution des peuplements diatomiques au sein d'un même lac.

#### 2.5.1.2) Lac des 9 Couleurs

Le lac des 9 Couleurs présente sur la figure 32 des lames avec très peu d'individus par gramme de sédiment et une richesse par lame très faible (5 taxons en moyenne). Les lames 1 et 9 présentent cependant des abondances bien plus élevées que les autres et une richesse taxinomique également bien plus importante (25 taxons). A l'exception de ces 2 lames, le lac de 9 Couleurs présente un sédiment pauvre en frustule de diatomées, aussi bien en abondance qu'en richesse. La plupart des lames ont un indice  $J'$  proche ou égal à 1, traduisant la présence de taxons très peu abondant.

Ceci reflète une très faible productivité du lac de 9 couleurs en termes de diatomées notamment, avec cependant une certaine robustesse dans la structure de sa communauté diatomique.

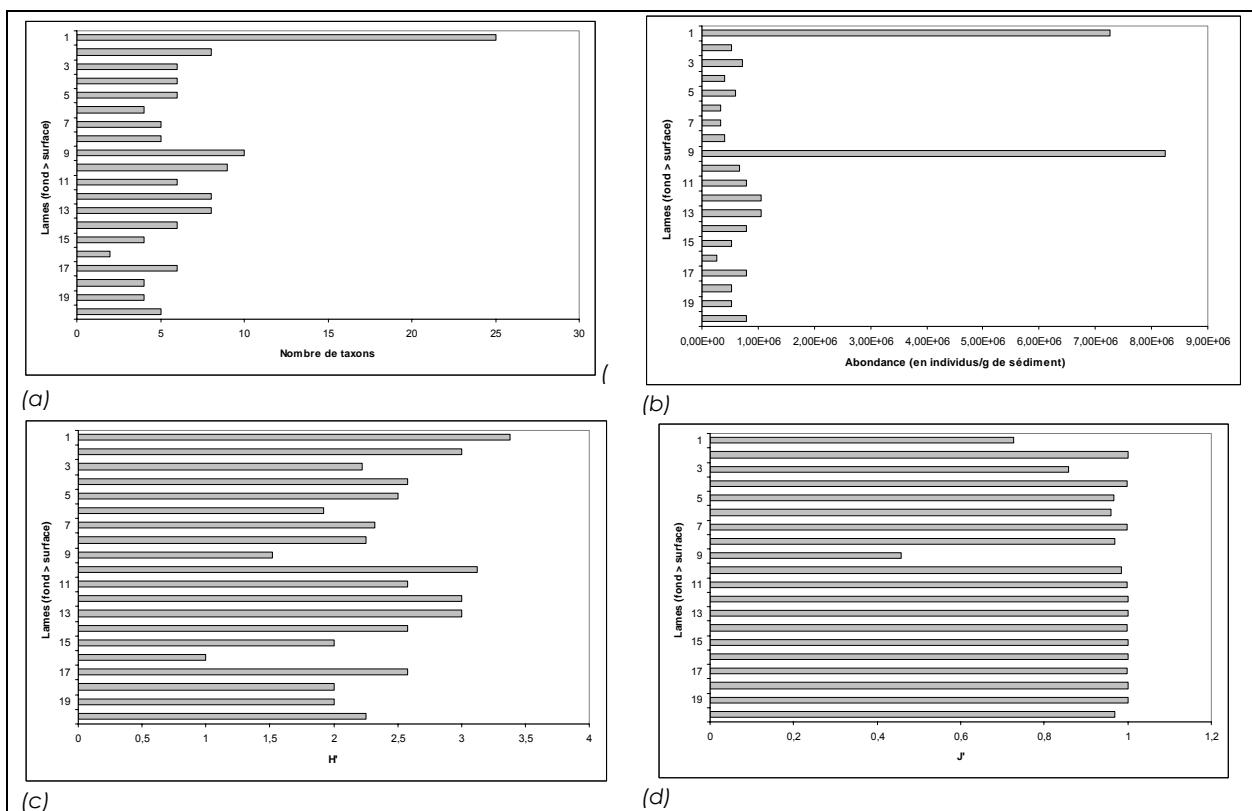


Figure 32 – Evolution des indices biocénotiques du peuplement de diatomées du lac des 9 Couleurs au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse  $S$  ; (b) évolution de l'abondance totale  $Q$  (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver  $H'$  ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou ( $J'$ ).

### 2.5.1.3) Lac d'Anterne

Le lac d'Anterne (cf. figure 33) présente les lames les plus pauvres en taxons (moins de 5 par lame pour 75% des lames) et en abondance (moins de  $5 \times 10^4$  individus/g de sédiment pour près de 90% des lames). Les lames 11, 13 et 18 ne contiennent aucune diatomée. Ce dernier cas n'a été observé que pour le lac d'Anterne. Seule la lame 1 présente un peuplement de diatomées caractérisé par une trentaine de taxons et une forte abondance.

De même que pour le lac des 9 Couleurs, les lames ont toutes des valeurs de  $J'$  proches ou égales à 1, traduisant des peuplements équilibrés, avec cependant des taxons représentés par un faible nombre d'individus. L'examen des différentes lames permet d'observer une certaine homogénéité dans la structure des peuplements.

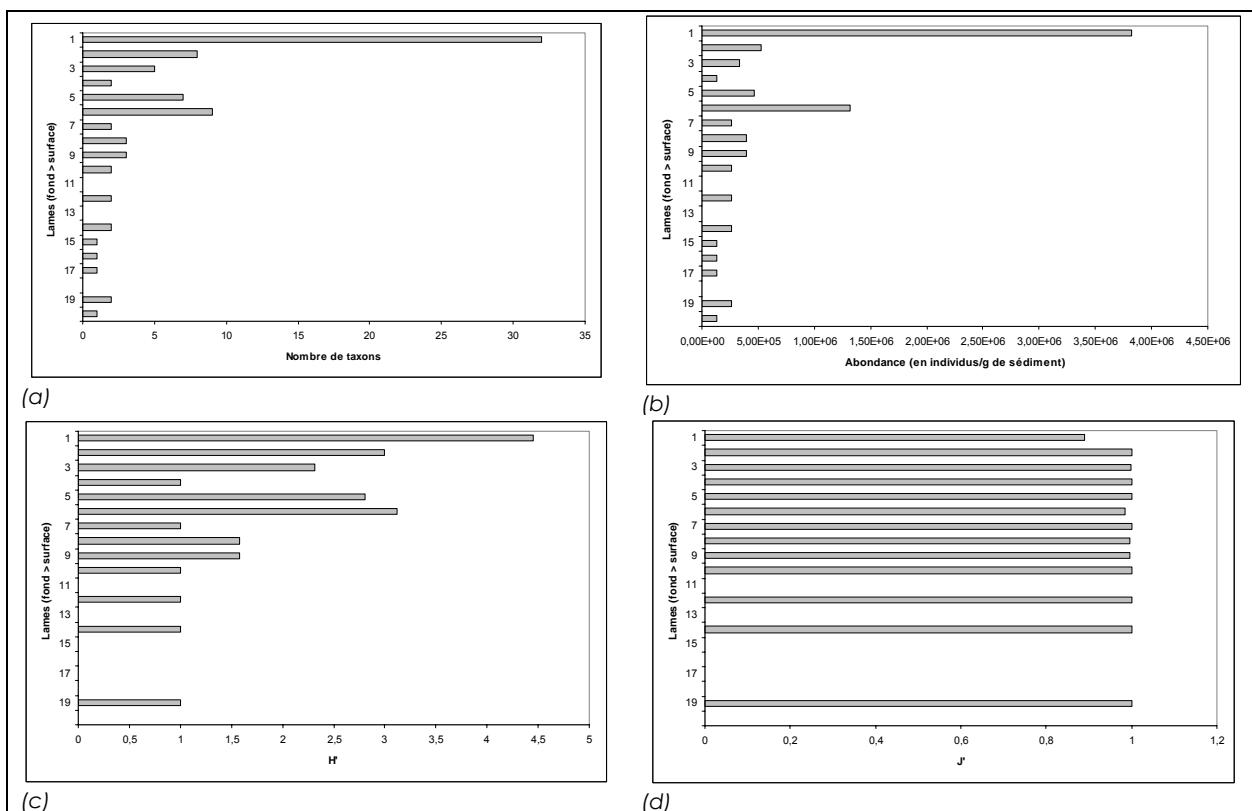


Figure 33 – Evolution des indices biocénotiques du peuplement de diatomées du lac d'Anterne au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver H' ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou (J').

#### 2.5.1.4) Lac de Chalain

La figure 34 montre pour le lac de Chalain, une diminution de la richesse taxinomique dans les couches superficielles du carottage. En effet, celle-ci descend en dessous de 30 taxons à partir de la lame 5 (correspondant aux années ~1920). De la même manière, l'équitabilité qui reste moyenne sur la moitié profonde de la carotte, augmente vers les lames supérieures pour atteindre une valeur proche de 1 pour la lame 1. Ceci, mis en parallèle avec la chute de l'abondance totale le long de la carotte du fond vers la surface, traduit une chute voire une disparition d'espèces dominantes pour aller vers un peuplement moins riche, moins abondant mais plus équilibré.

Deux lames se distinguent cependant du reste de la carotte en termes d'abondance, de diversité et d'équitabilité. Il s'agit des lames 17 (~période 1696-1714) et 4 (~période 1930-1948), qui voient la sur-dominance de deux taxons : *Cyclotella cyclopancta* et *C. ocellata*. Cette dernière a un statut trophique méso-eutrophe et son expansion est à rapprocher d'un pic en azote concomitant sur le lac de Chalain (cf. Figure 21).

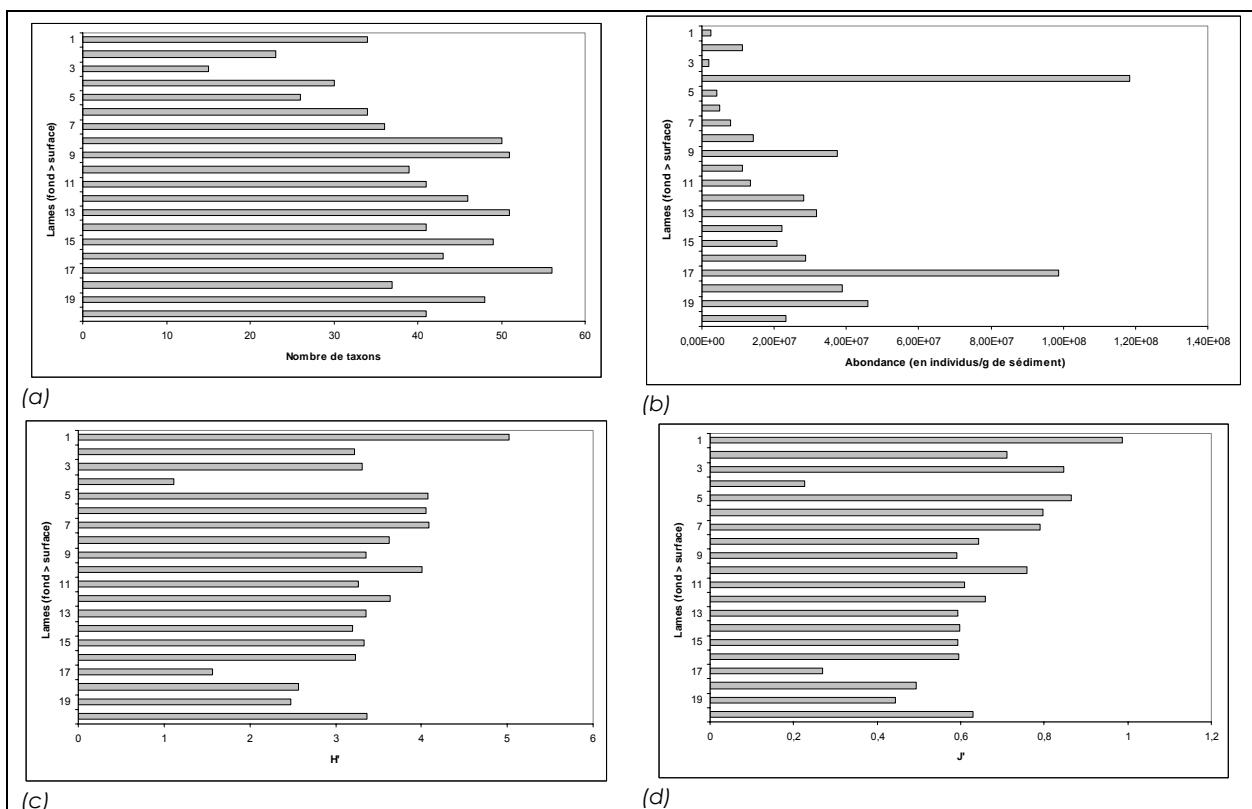


Figure 34 – Evolution des indices biocénétiques du peuplement de diatomées du lac de Chalain au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver H' ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou (J').

### 2.5.1.5) Lac de Lauvitel

Le lac de Lauvitel présente une richesse taxinomique et une abondance élevées sur l'ensemble des lames de la carotte (figure 35). Quelques lames semblent cependant se distinguer de par leur abondance. Il s'agit des lames 4, 7, 8 et 9 qui présentent une abondance plus importante, et des lames 11, 12 et 14 qui, au contraire, présentent des abondances moindres. Les valeurs de J' sont quant à elles plutôt moyennes sur l'ensemble de la carotte (entre 0,3 et 0,4). Ceci traduit la présence d'espèces clairement dominantes dans tous les peuplements. Il s'agit de *Cyclotella meneghiana* et *Achnanthes minutissima* qui représentent à elles deux près de 80% des peuplements.

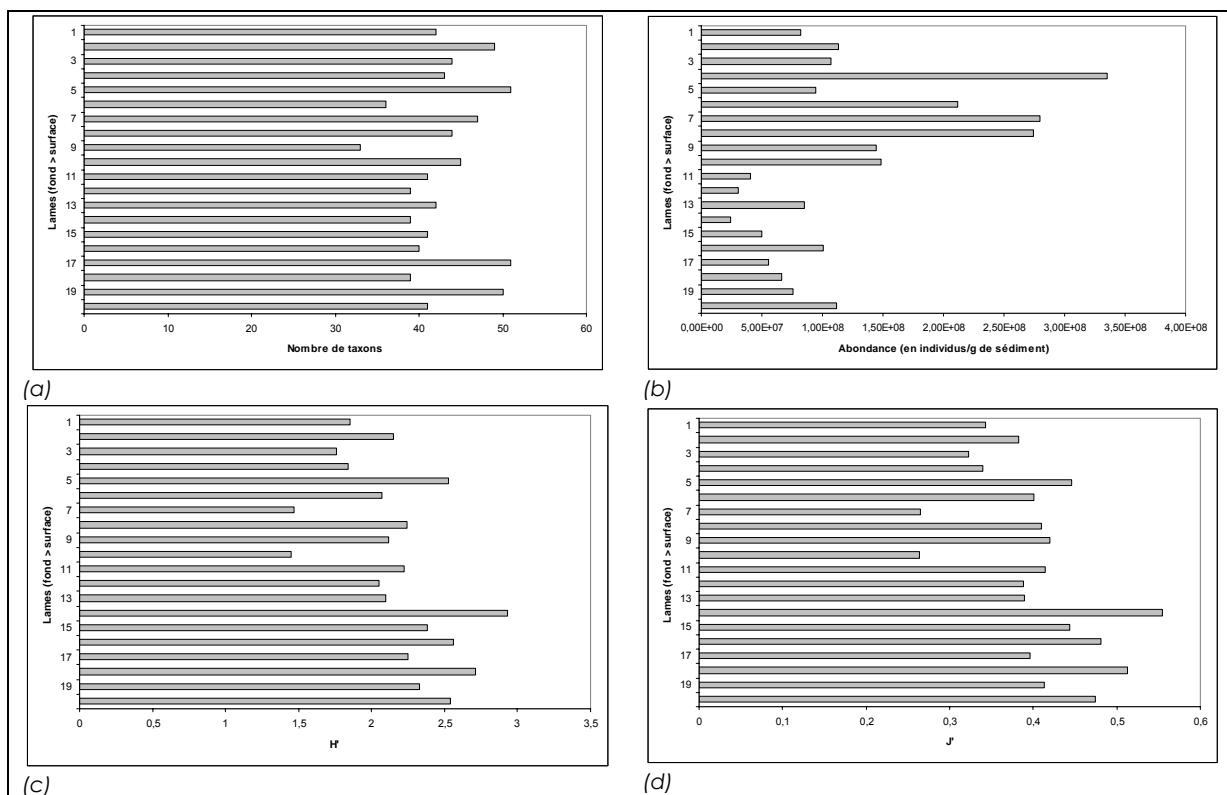


Figure 35 – Evolution des indices biocénotiques du peuplement de diatomées du lac de Lauvitel au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver H' ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou (J').

### 2.5.1.6) Le lac Nègre

Le lac Nègre se caractérise par une richesse taxinomique et une abondance totale très fortes (cf. figure 36). Ces valeurs sont les plus fortes obtenues sur les huit lacs d'étude. Il présente des pics d'abondance sur les lames 8, 10, 11 et 12, correspondant au début du XX<sup>e</sup> siècle. D'un point de vue physico-chimique, ces segments correspondent à de fortes valeurs d'alcalinité mais aussi d'azote, de carbone et de matière organique, trahissant un enrichissement du lac à cette période. La lame 2 se caractérise au contraire par une très forte chute de l'abondance totale.

Une baisse sensible de l'abondance est observable à partir de la lame 7 (début XX<sup>e</sup>). Les tranches de carottes superficielles montrent une baisse de moitié des teneurs en silice dans les lames superficielles (à partir de 1900). Les frustules des diatomées étant siliceuses, le manque de silice disponible peut expliquer cette réduction des effectifs. La lame 7 marque également une augmentation des teneurs en cuivre, micropolluant toxique pour les diatomées entre autres. Cette baisse marque également la séparation des 2 zones de sédimentation relevée sur la carotte du lac Nègre lors de l'analyse radiochronologique.

L'indice d'équitabilité est compris entre 0,6 et 0,7 ce qui traduit un peuplement avec des espèces majoritaires mais qui n'écrasent pas le peuplement.

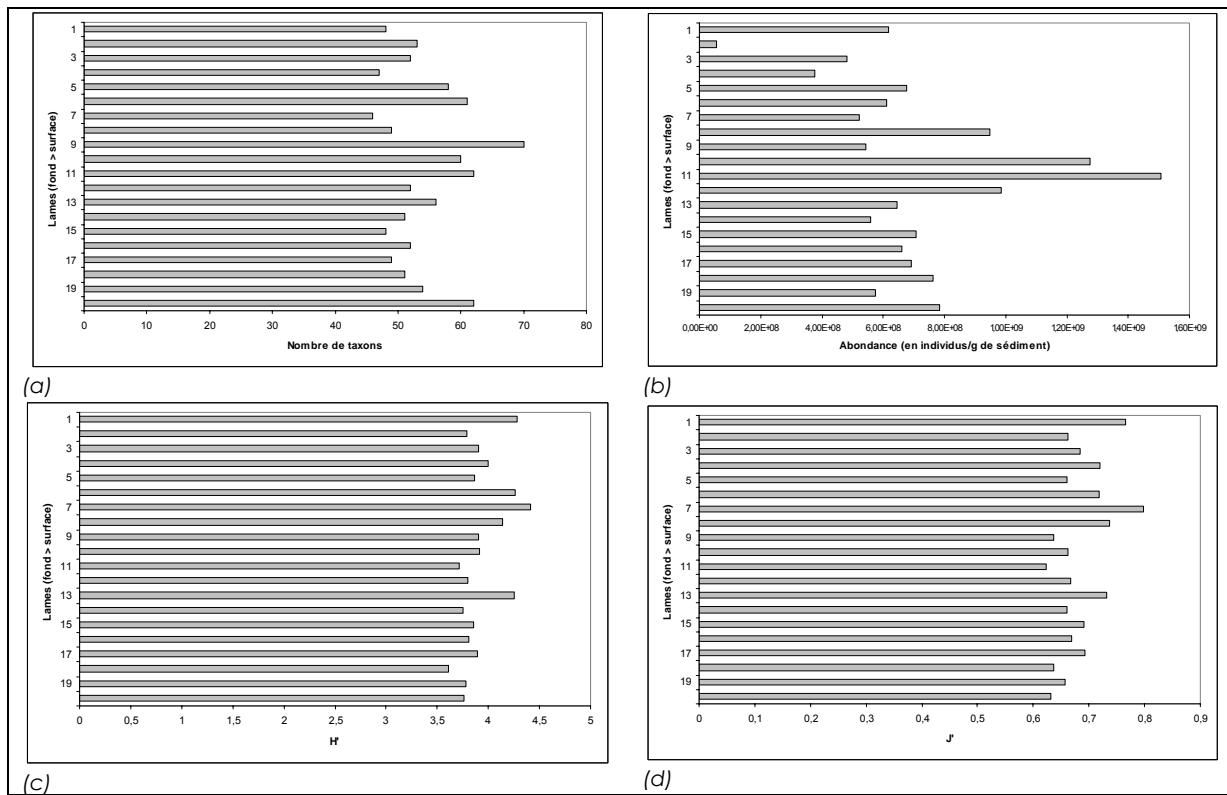


Figure 36 – Evolution des indices biocénotiques du peuplement de diatomées du lac de Nègre au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver H' ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou (J').

### 2.5.1.7) Lac de Remoray

La première observation tirée de la figure 37 est l'effondrement de l'abondance entre les couches superficielles et profondes. La richesse taxinomique chute quant à elle de plus de 20 taxons à moins d'une dizaine.

La lame 1, la plus superficielle, présente une richesse supérieure (42 taxons). Au contraire, l'indice d'équitabilité connaît une hausse de 0,7 à 0,9. Ce résultat concernant la structure des peuplements est cependant à considérer avec précaution vu le faible nombre de diatomées par lame.

Ces changements de structure de peuplement sont à mettre en parallèle avec l'enrichissement du lac en nutriments à partir de la lame 5 (~période 1918-1936) et la baisse en azote et phosphore au niveau de la tranche 1. Le changement de la structure du peuplement (richesse taxinomique et abondance totale) est également concomitant avec les observations visuelles d'une séparation en 2 phases de la carotte de sédiment (cf. Résultats & Discussion §1.1.6).

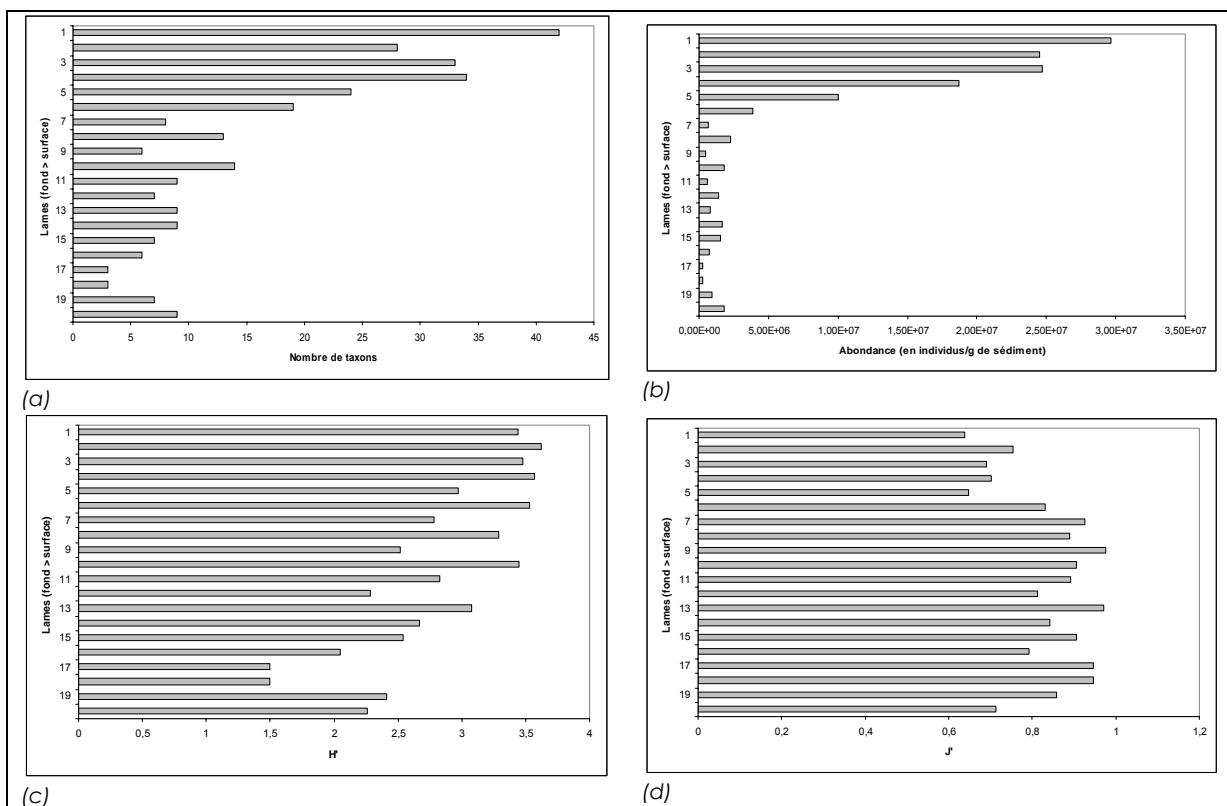


Figure 37 – Evolution des indices biocénétiques du peuplement de diatomées du lac de Remoray au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver H' ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou (J').

### 2.5.1.8) Le lac du Vallon

La figure 38 montre une richesse taxinomique relativement élevée, entre 30 taxons et 40 taxons, pour les peuplements des lames de la carotte de Vallon. L'abondance totale semble très fluctuante entre les lames, avec des pics ne correspondant pas à ceux de la richesse. Ceci se traduit par des espèces qui deviennent plus abondantes dans le cortège floristique sur certaines lames. Enfin, les faibles valeurs de J' montrent un peuplement dominé voire écrasé par 2 espèces, *Cyclotella comensis* et *Achnanthes minutissima* qui représentent 80% des peuplements de la carotte.

La lame 1 présente des valeurs fortes pour les quatre indices : richesse, abondance, diversité et équitabilité. Cette observation peut être mise en relation avec l'enrichissement en nutriments du milieu (cf. Résultats & Discussion § 2.1.2). Cet événement aurait apporté plus de nutriments et de niches écologiques, développant la communauté diatomique au niveau des quatre indices de structure.

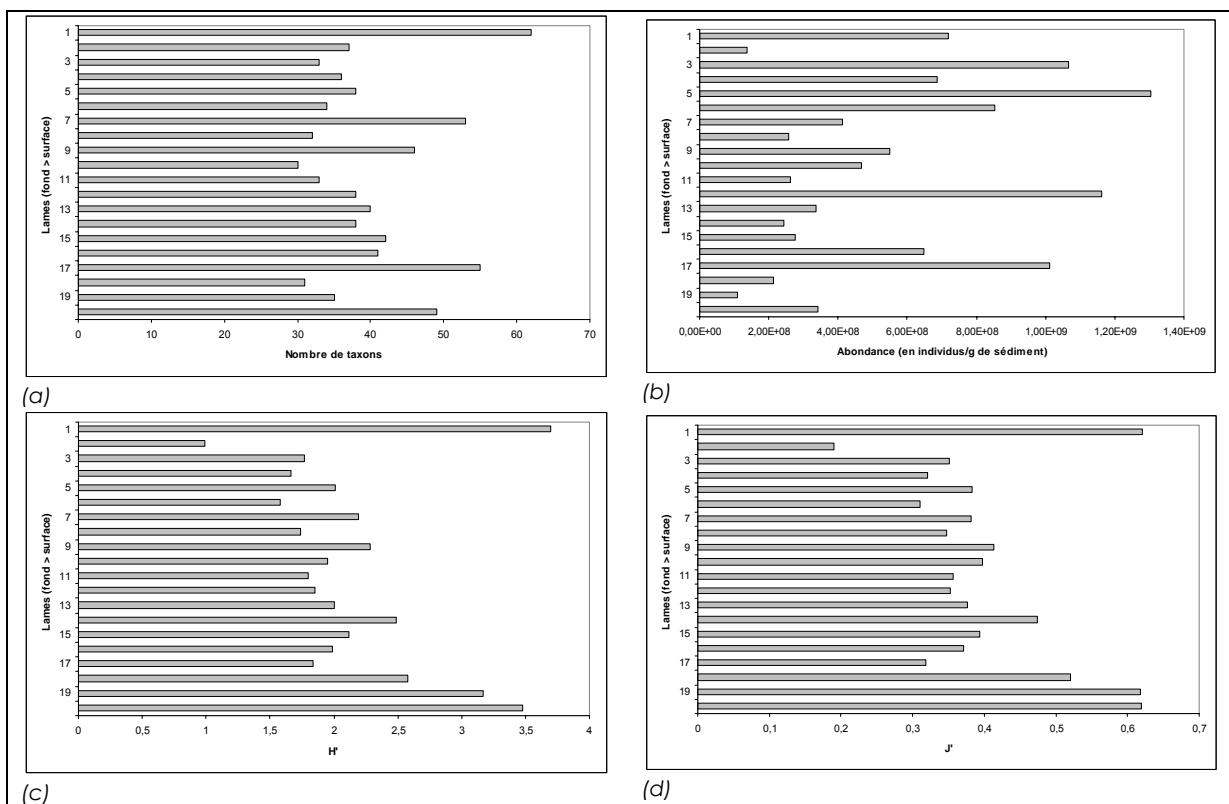


Figure 38 – Evolution des indices biocénotiques du peuplement de diatomées du lac de Vallon au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver  $H'$  ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou ( $J'$ ).

### 2.5.1.9) Lac de Vens 1<sup>er</sup>

Le lac de Vens 1<sup>er</sup> présente sur la figure 39 des richesses taxinomiques élevées sur l'ensemble de la carotte. L'évolution de l'abondance totale est plus difficile à cerner. Il semble qu'il y ait 3 chutes, des lames 18 à 14 (~période 1346-1531), au niveau des lames 5 et 4 (~période 1827-1901), et de la lame 2 (~période 1938-1950).

L'équitabilité présente par contre une évolution remarquable, puisque déjà basse pour les lames 20 à 10, elle est divisée par 2 dans les 9 lames superficielles. Ceci traduit un peuplement déjà dominé par une espèce majoritaire, *Cyclotella comensis* qui représente 60% du peuplement en moyenne sur les lames 20 à 10, et 90% dans les couches plus récentes.

Nous pouvons également noter que la lame 2 présente les valeurs les plus basses pour les 4 indices biocénotiques pris en compte.

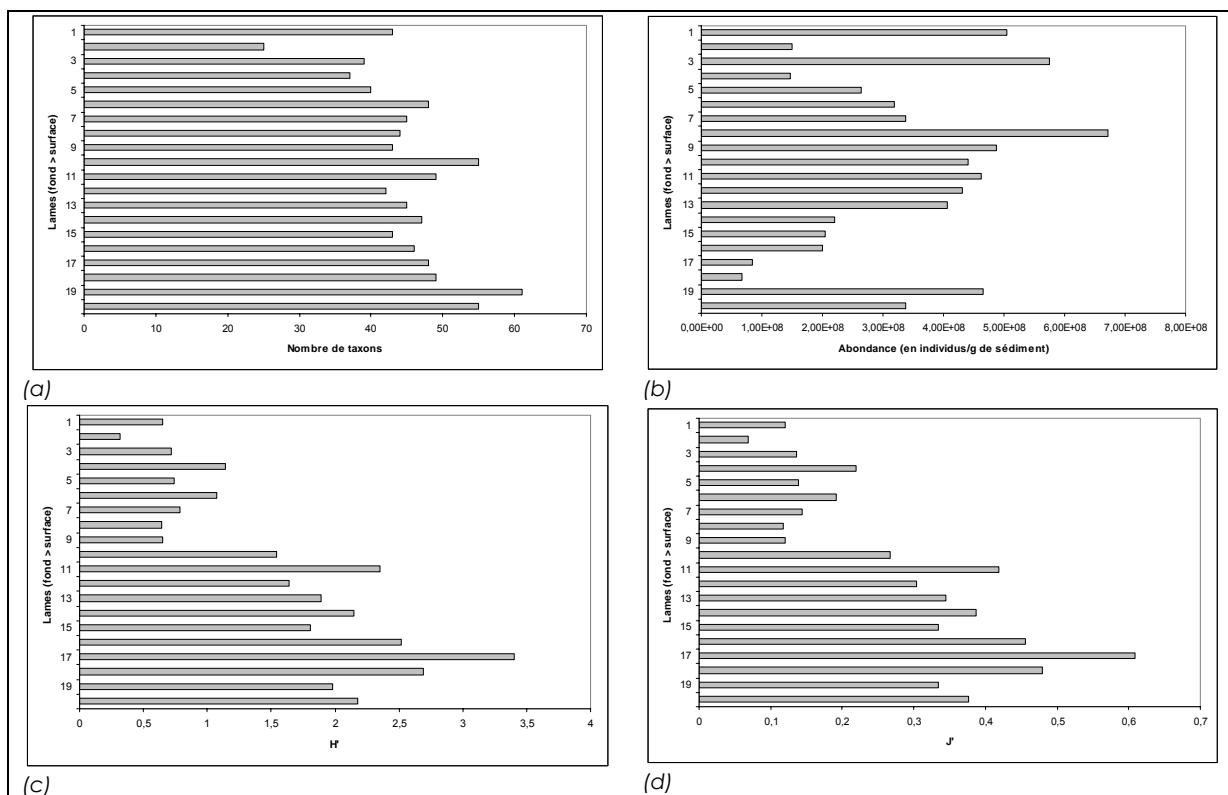


Figure 39 – Evolution des indices biocénotiques du peuplement de diatomées du lac de Vens 1<sup>er</sup> au travers des lames de la carotte. (a) évolution de la richesse S ; (b) évolution de l'abondance totale Q (tous taxons confondus par lame) ; (c) évolution de l'indice de diversité de Shannon et Weaver H' ; (d) évolution de l'indice d'équitabilité de Pielou (J').

## 2.5.2) Analyses des listes floristiques

### 2.5.2.1) Préambule

L'objectif de cette analyse est de pouvoir déterminer si les peuplements diatomiques sont suffisamment constants et caractérisés pour discriminer les lacs entre eux. La présence et l'abondance des taxons étant conditionnées par leur milieu, le but est de pouvoir caractériser des groupes de lacs sur la base de leurs listes floristiques. Dans un deuxième temps, l'évolution temporelle du peuplement de chaque lac étudié sera appréhendée.

Les peuplements diatomiques étant structurés par leur environnement, la corrélation entre les caractérisations floristique et physico-chimique des lacs sera ensuite analysée.

### 2.5.2.2) Analyse globale

La figure 40 présente les résultats de l'analyse inter-groupes réalisée sur le tableau floristique quantifié en abondance relative. Le plan factoriel F1xF2 présente ainsi trois groupes de lacs. Le lac de Lauvitel se distingue des autres, formant un groupe à part entière. Les lacs de Vens 1<sup>er</sup> et de Vallon forment un deuxième groupe se séparant de par leurs cortèges

floristiques des lacs Nègre, de Chalain, de Remoray, des 9 Couleurs et d'Anterne. Ces deux derniers lacs se distinguent par une variabilité importante, illustrée sur la figure 40a par des ellipses de couleurs.

Le dendrogramme issu de cette analyse inter-groupes, figure 40b permet d'affiner ces observations visuelles. Il présente :

- le groupe constitué des lacs de Vens 1<sup>er</sup> et Vallon;
- le lac de Lauvitel et son peuplement caractéristique;
- les lacs de 9 Couleurs et d'Anterne qui se distinguent par la forte variabilité de leurs peuplements respectifs;
- le lac Nègre;
- et le groupe jurassien constitué des lacs de Chalain et de Remoray.

La définition de peuplements-types par lac fait l'objet d'une analyse à part entière dans le paragraphe suivant.

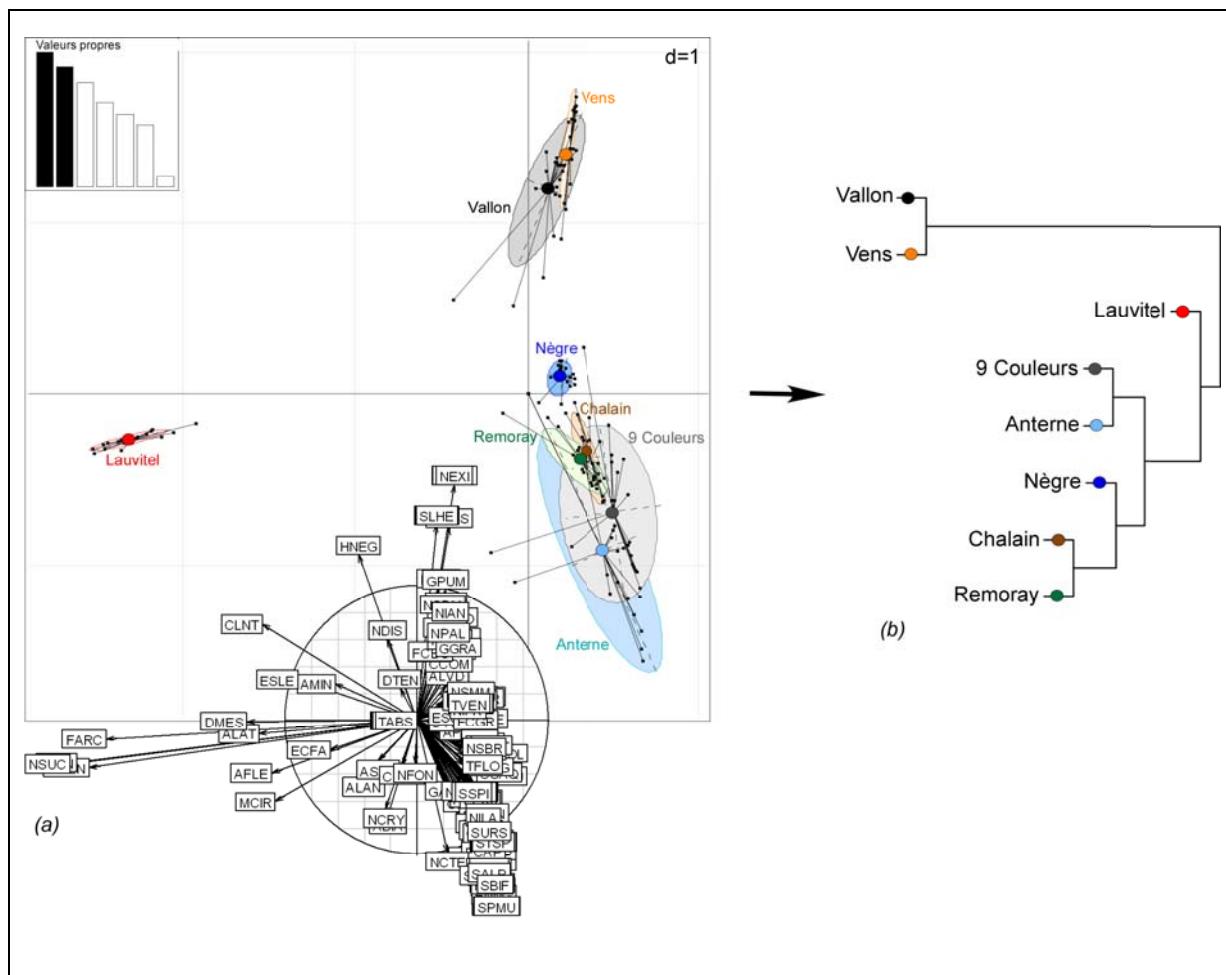


Figure 40 - Analyse inter-groupes réalisée sur le tableau floristique quantifié en abondances relatives. 18% de l'inertie (ou variabilité) totale est inter-groupes et 82% est intra-groupes. (a) Positionnement des lacs sur le plan factoriel FlxF2 relativement à leur peuplement en diatomées. Pour chacun des lacs, les petits cercles de couleur représentent le centre de gravité -soit le positionnement moyen- du nuage de points (les tranches de la carotte), et les ellipses représentent l'importance de la variabilité des peuplements. En bas à droite est représenté le cercle de corrélation des taxons (b) Dendrogramme issu de l'analyse inter-groupes (méthode de Ward).

### 2.5.2.3) Analyse de l'évolution des peuplements diatomiques

La figure 41 présente des analyses retracant l'évolution des peuplements diatomiques pour chacun des lacs. Les positionnements des relevés sur les plans factoriels permettent d'appréhender rapidement la variabilité temporelle de son peuplement et de discerner une éventuelle tendance évolutive. On peut ainsi constater l'absence de tendance évolutive bien marquée du point de vue des peuplements floristiques de l'ensemble des 8 lacs.

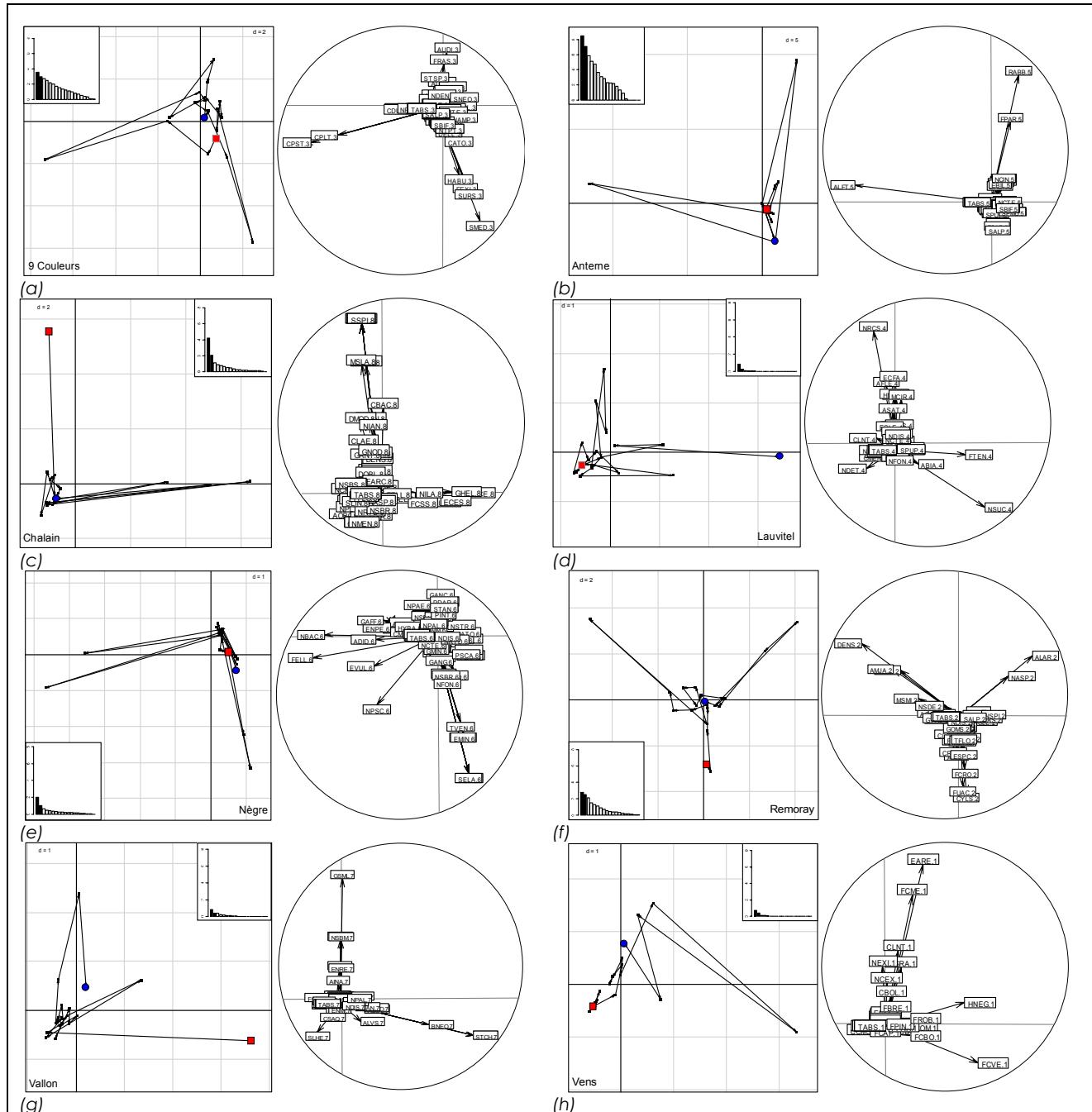


Figure 41 - Analyses séparées par lacs issues d'une analyse intra-groupes basée sur le tableau floristique quantifié en abondances relatives. Pour chacun des lacs, l'évolution (et la proximité) des peuplements est représentée sur un plan factoriel F1xF2. La position la plus récente -la tranche de carotte la plus superficielle- est représentée par un carré rouge, et la position le plus ancienne -la tranche la plus profonde- par un cercle bleu. Le cercle de corrélation avec le code des taxons est représenté sur la droite. 81% de l'inertie (ou variabilité) totale du tableau floristique est intra-groupes. Les histogrammes de valeurs propres sont à la même échelle et donnent une idée de l'apport de chacun des lacs à la variabilité totale. (a) lac des 9 Couleurs; (b) lac d'Anterne; (c) lac de Chalain; (d) lac de Lauvitel; (e) lac Nègre; (f) lac de Remoray; (g) lac de Vallon; (h) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

### 2.5.2.4) Analyse de la relation entre la caractérisation des lacs par leur peuplement diatomique et par leur physico-chimie.

Les paramètres physico-chimiques du milieu influençant directement les communautés diatomiques qui s'y développent, les caractérisations des lacs d'un point de vue floristique et physico-chimiques ont été confrontées. Une analyse de co-inertie a ainsi été réalisée entre les deux analyses inter-groupes réalisées sur le tableau floristique et le tableau de physico-chimie. Le coefficient de corrélation issue de la co-inertie (RV) est de 0,64. Il traduit donc une bonne corrélation entre les structures des deux tableaux. Les peuplements diatomiques des lacs apparaissent comme relativement bien corrélés à leurs données physico-chimiques. Les groupements caractérisés sur la base de la physico-chimie apparaissent comme ayant des peuplements diatomiques caractéristiques. La figure 42a présente les résultats de l'analyse de co-inertie et illustre donc le meilleur compromis de co-structure entre les tableaux floristiques et physico-chimiques.

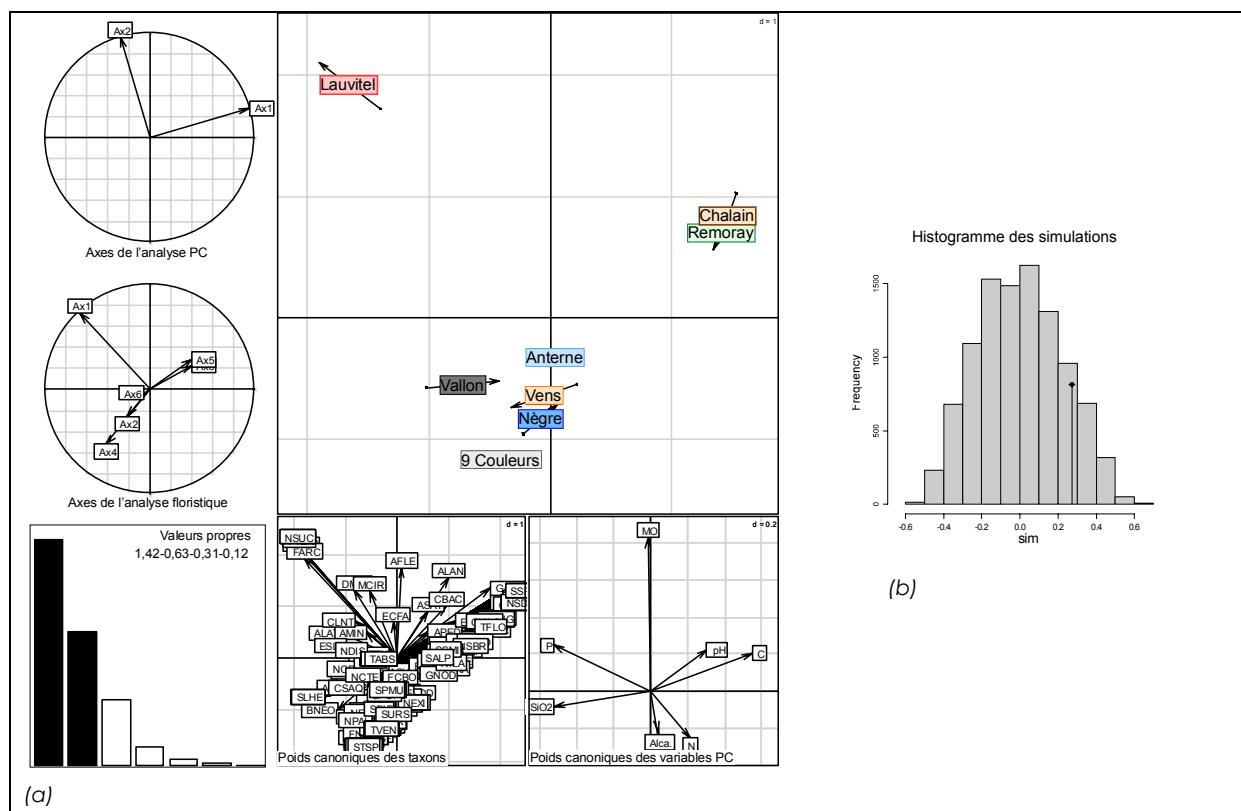


Figure 42 - Etude de la relation entre la caractérisation des lacs par leurs peuplements diatomiques et la caractérisation des lacs par leur physico-chimie. (a) Analyse de co-inertie entre les deux analyses inter-groupes réalisées sur le tableau floristique et le tableau de physico-chimie. Avec un  $RV=0,64$ , les structures des deux tableaux sont relativement bien corrélées. En haut à droite, sont représentées sur le plan factoriel F1xF2 les positions relatives des lacs en prenant en compte leur peuplement diatomique et leur physico-chimie. Cette figure représente donc le meilleur compromis de co-structure entre les deux tableaux. (b) Test de Mantel réalisé entre les matrices de distance issues des analyses inter-groupes réalisées sur le tableau de PC et sur le tableau floristique. Avec  $p=0,12$ , une forte tendance de congruence entre les 2 matrices de distance est observée.

Le plan factoriel de la *figure 42a* permet d'observer trois groupes déjà définis par l'analyse inter-groupes sur les peuplements diatomiques et l'analyse inter-groupes sur les paramètres physico-chimiques.

- le lac de Lauvitel qui se démarque au niveau des peuplements diatomiques, des profils de traits et de la physico-chimie
- les lacs alpins : lacs d'Anterne, de Vallon, de Vens 1<sup>er</sup>, Nègre et des 9 Couleurs.
- Les lacs jurassiens : lac de Chalain et de Remoray.

Un test de permutation de Mantel (*figure 42b*) a été réalisé pour tester la congruence des matrices de distance issues des analyses inter-groupes réalisées sur le tableau floristique et le tableau physico-chimiques. Avec  $p=0,12$  pour 10 000 simulations, une tendance à la congruence est observée entre les deux matrices. Ceci confirme statistiquement la corrélation observée entre les caractérisations physico-chimiques et les peuplements diatomiques des lacs.

### 2.5.3) Définition de peuplements diatomiques types

A la vue de la *figure 41*, en suivant l'évolution des peuplements de diatomées à travers le temps (les segments du carottage), on peut voir que, globalement, pour chacun des lacs, on retrouve un agencement similaire des points sur leur plan factoriel. En effet, une partie des chrono-peuplements se retrouve relativement groupée, alors qu'une autre partie, représentant des peuplements plus exceptionnels dans le temps, se retrouve dispersée.

Les peuplements types sont donc définis par les taxons issus des peuplements les plus proches, soit les plus récurrents à travers le temps (cf. *figure 43*).

Les analyses individuelles de peuplement type par lac sont présentées sur les figures 44 à 51. Ces figures sont subdivisées en 3 parties. La première partie montre la liste floristique type globale pour le lac, avec les pourcentages de dominance globaux des taxons à travers les peuplements sélectionnés *figure 43*. Les espèces dominantes sont soulignées en gris (>1% et >5% du peuplement global), représentant le peuplement type, et les espèces accompagnatrices minoritaires (<1%) sont laissées en blanc. La seconde partie illustre la structure (dominance) et le conservatisme temporel du peuplement type. La troisième partie illustre en histogramme de façon décroissante les dominances taxinomiques présentées en première partie.

A l'analyse globale de ses figures, il est possible de discerner plusieurs types de peuplements:

- Des peuplements dominés par un nombre très restreint de taxons, avec une sur-dominance quasi monospécifique conservée au cours du temps. Ce type de peuplement est représenté par les lacs de Lauvitel (fig. 47), du Vallon (fig. 50) et de Vens 1er (fig. 51). A noter que Vallon et Vens ont la même espèce dominante, *Cyclotella commensis*, représentant 72% et 87% du peuplement respectivement.
- Des peuplements avec une pluri-spécificité plus équilibrée et conservée dans le temps, avec des sur-dominances moins marquées que dans le type de peuplement précédent. Ce type est représenté par les lacs de Chalain (fig. 46), Nègre (fig. 48) et de Remoray (fig. 49).
- Les lacs des 9 Couleurs (fig. 44) et d'Anterne (fig. 45) représente un type à part, avec une fluctuation temporelle des peuplements plus importante et un conservatisme moins tranché qu'au sein des types précédents.

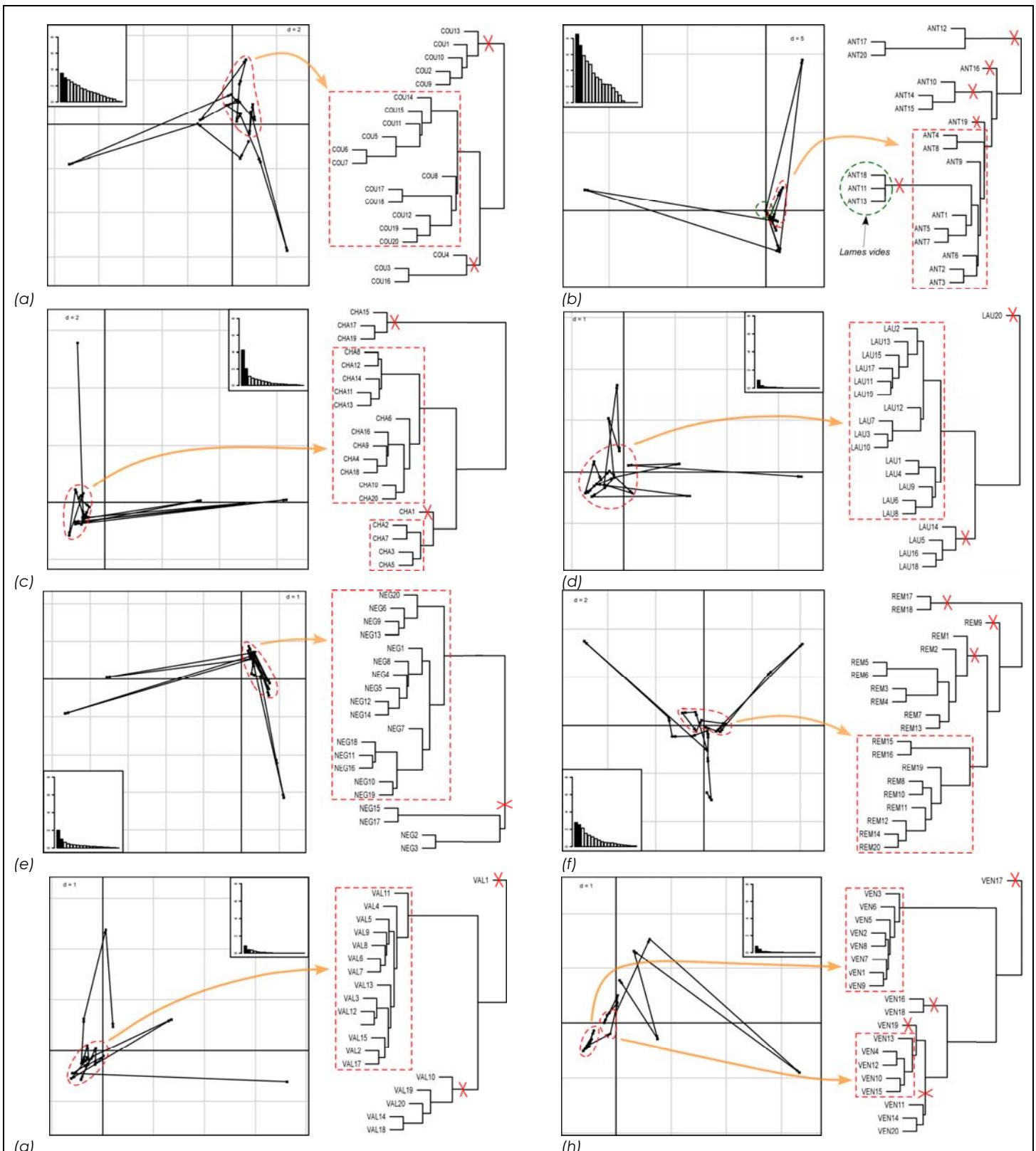


Figure 43 - Plans factoriels F1xF2 d'analyses séparées par lac issues de l'analyse intra-groupes sur le tableau floristique quantifié en abondances relatives. L'évolution des peuplements à travers le temps est représentée pour chacun des lacs. Le(s) groupe(s) de peuplements les plus proches, soit les plus récurrents à travers le temps (ie. la carotte de sédiments), sont isolés et analysés comme représentant le peuplement type de diatomées pour un lac donné. (a) lac des 9 Couleurs; (b) lac d'Anterne; (c) lac de Chalain; (d) lac de Lauvitel; (e) lac Nègre; (f) lac de Remoray; (g) lac de Vallon; (h) lac de Vens 1<sup>er</sup>.

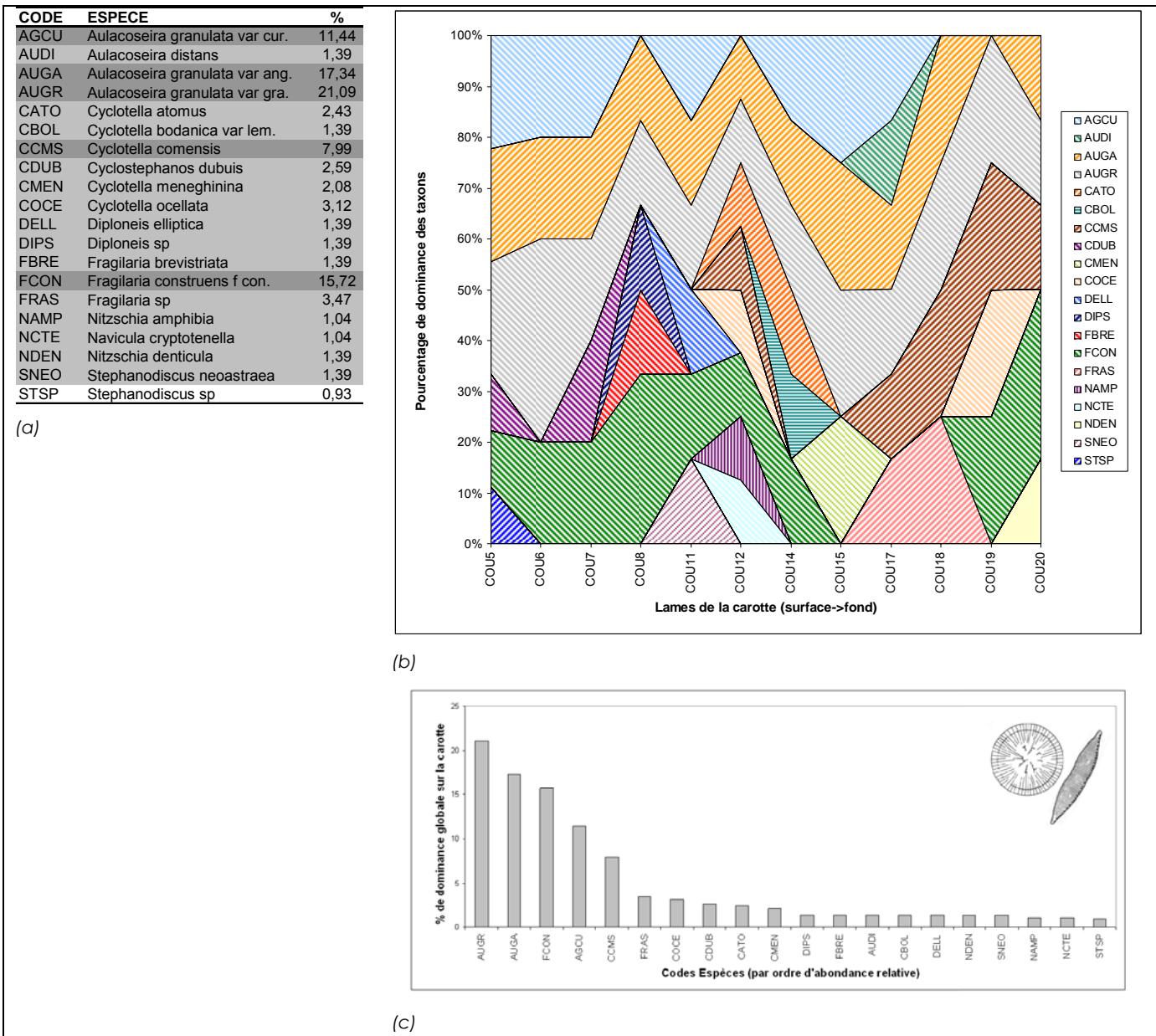


Figure 44 - Cortège type de diatomées pour le lac des 9 Couleurs, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont soulignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - >5 % du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac des 9 Couleurs, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment.

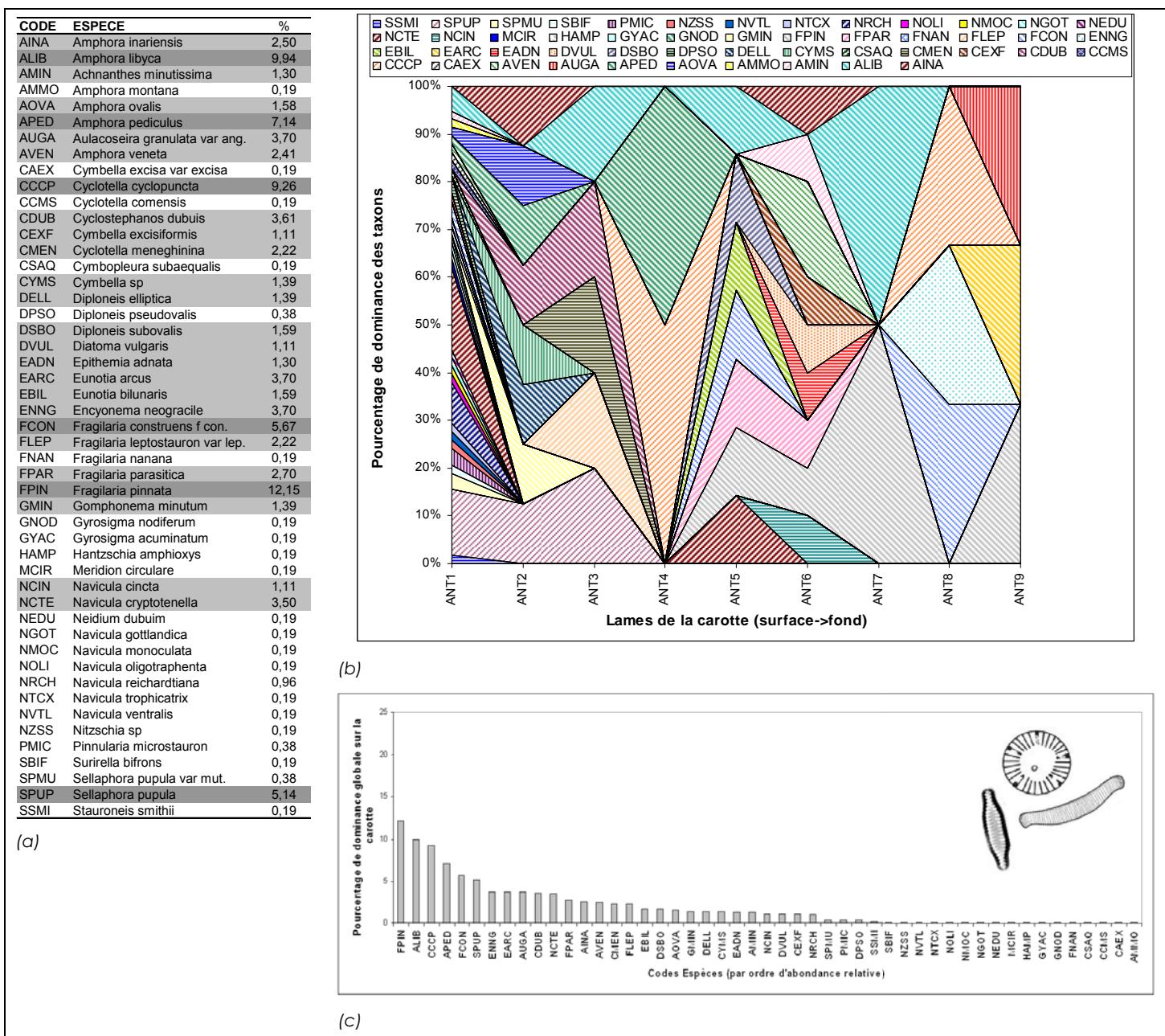


Figure 45 - Cortège type de diatomées pour le lac d'Anterne, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont soulignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - >5 % du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac d'Anterne, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment.

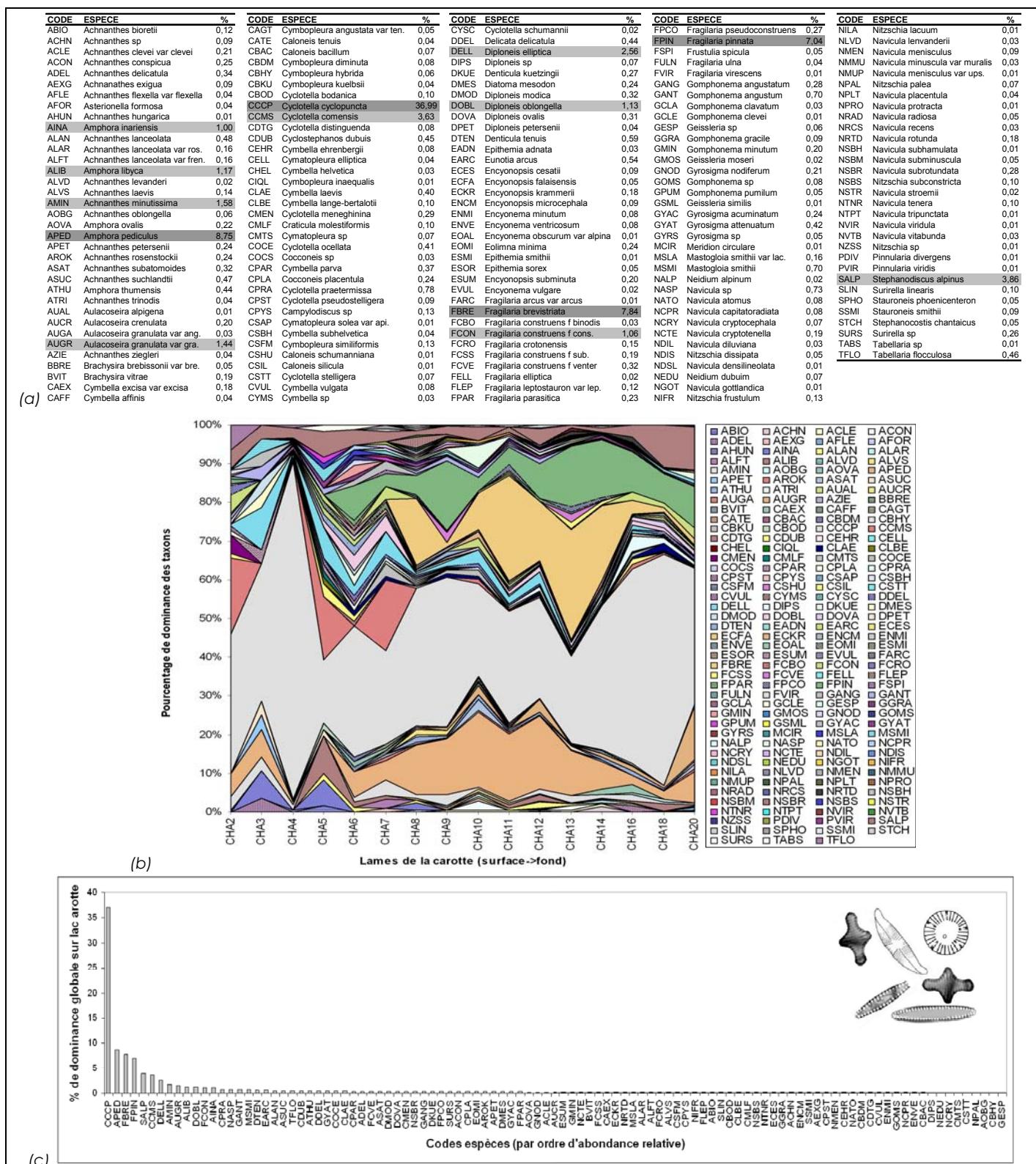


Figure 46 - Cortège type de diatomées pour le lac de Chalain, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont soulignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - > 5 % du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac de Chalain, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment. Par souci de clarté, seuls les taxons représentant plus de 0,05% du peuplement sont représentés..

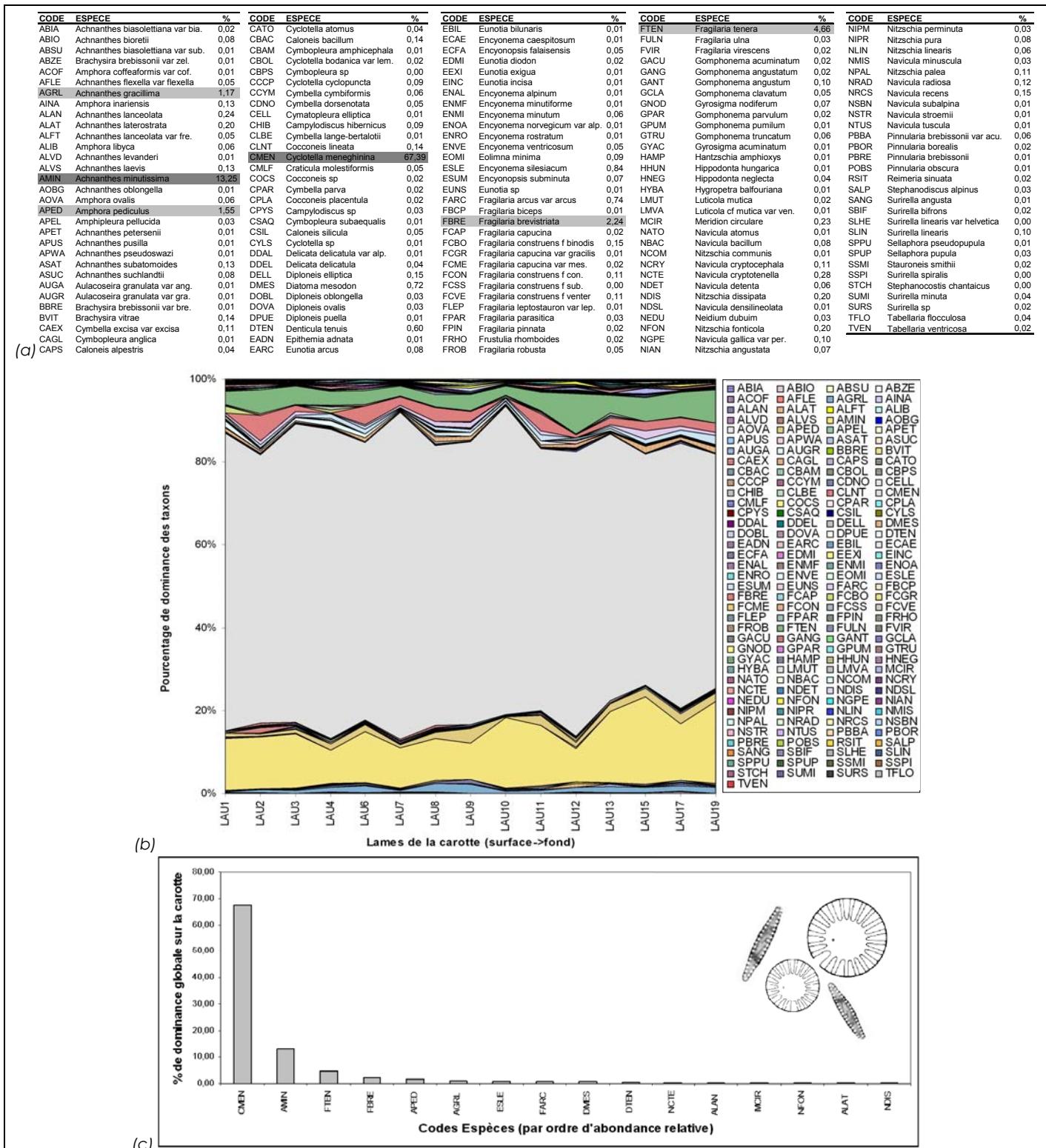


Figure 47 - Cortège type de diatomées pour le lac de Lauvitel, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont soulignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - >5 % du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac de Lauvitel, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment. Par souci de clarté, les taxons représentant moins de 0,02% du peuplement global (soit près de 90% des taxons) n'ont pas été inclus dans la figure.

CODE	ESPECIE	%	CODE	ESPECIE	%	CODE	ESPECIE	%	CODE	ESPECIE	%	CODE	ESPECIE	%
AAMB	Aulacoseira ambigua	0,03	CLBE	Cymbella lange-berthalotii	0,02	ESUM	Enyonopsis subminuta	0,77	HYBA	Hygropetra balfouriana	1,83	NSBM	Navicula subminuscula	0,07
ABIO	Achnanthes bioretii	0,04	CLPD	Caloneis lepidula	0,01	EUNS	Eunota sp	0,02	MCIR	Meridion circulare	0,05	NBRC	Navicula subtordata	0,15
ADID	Achnanthes didyma	0,20	CMLF	Craticula molestiformis	0,50	EVUL	Encyonema vulgare	0,05	NATO	Navicula atomus	0,39	NSEM	Navicula seminulum	2,39
AHUN	Achnanthes hungarica	0,08	CMOL	Caloneis molaris	0,01	FAMO	Fragilaria amroseosae	0,01	NBAC	Navicula baculum	0,01	NSSM	Navicula schmassmanni	2,14
AINA	Amphora inariensis	0,33	COCE	Cyclotella ocellata	0,01	FBRE	Fragilaria brevistriata	9,24	NBRY	Navicula bryophila	0,03	NSTR	Navicula stroemii	0,16
AKRY	Achnanthes kryophila	0,04	CPAR	Cymbella parva	0,22	FCAP	Fragilaria capucina	0,21	NCCO	Navicula cocconeiformis	0,01	NZSS	Nitzschia sp	0,01
ALAN	Achnanthes lanceolata	0,05	CSBH	Cymbella subhelvetica	0,02	FCBO	Fragilaria construens f bin.	1,30	NCRY	Navicula cryptociphala	0,06	PDAR	Pinnularia divergentissima	0,19
ALAP	Achnanthes lapidosa	0,01	CSHI	Cymbella schimkianskii	0,09	FCGR	Fragilaria capucina var gra.	0,76	NCTE	Navicula cryptotenera	0,08	PGIB	Pinnularia gibba	0,01
ALAT	Achnanthes laterostorta	0,20	CSIL	Caloneis silicula	0,03	FCON	Fragilaria construens f con.	2,03	NDET	Navicula detenta	0,02	PINT	Pinnularia interrupta	0,03
ALVD	Achnanthes levanderii	2,74	CSTT	Cyclotella stelligera	0,01	FCPI	Fragilaria capucina var amp.	0,02	NDGT	Navicula digitulus	0,52	PKUT	Pinnularia kuetingii	0,02
ALVS	Achnanthes laevis	0,04	CYHU	Cymbella parva var hun.	0,01	FCRO	Fragilaria crotonensis	0,03	NDIS	Nitzschia dissipata	0,04	PMIC	Pinnularia microstauron	0,10
AMIN	Achnanthes minutissima	4,93	DANC	Diatoma anceps	0,02	FCSS	Fragilaria construens f sub.	0,01	NDME	Nitzschia dissipata var medi	0,01	POBF	Pinnularia obscuriformis	0,02
APET	Achnanthes petersenii	0,22	DDEL	Delicatula delicatula	0,01	FCVE	Fragilaria construens f venti	0,87	NEID	Neidium affine	0,02	PSCA	Pinnularia subcapitata var sub.	0,37
APUS	Achnanthes pusilla	1,13	DMES	Diatoma mesodon	0,03	FEEL	Fragilaria elliptica	0,07	NEHC	Neidium hircynicum	0,00	PSEP	Pinnularia septentrionalis	0,08
ASAT	Achnanthes subatomoides	0,13	DTEN	Denticula tenuis	1,11	FEFI	Fragilaria exigua	0,65	NFON	Nitzschia fonticola	0,11	PSGI	Pinnularia subgibba	0,02
ASCL	Achnanthes succula	0,01	EARC	Eunota arcus	0,01	FLAP	Fragilaria lapponica	0,17	NGAL	Navicula gallica	0,01	PSHO	Pinnularia schoenfelderi	0,02
ASUC	Achnanthes suchlandtii	0,31	EBIL	Eunota bilunaris	0,19	FOLD	Fragilaria oldenburgiana	0,01	NGPE	Navicula gallica var perpusill	0,05	PSRO	Pinnularia subrostrata	0,01
ATRI	Achnanthes trinodis	0,01	ECFA	Encyonopsis falaisensis	0,04	FPAR	Fragilaria parasitica	0,29	NIAN	Nitzschia hantzschiana	0,07	PSTI	Pinnularia stricta	0,02
AUAL	Aulacoseira alpigena	0,15	ECRO	Encyonopsis rostrata	0,01	FPCC	Fragilaria pseudoconstruens	19,34	NIAN	Nitzschia angustata	0,06	PVIF	Pinnularia viridiformis	0,01
AUDI	Aulacoseira distans	0,01	EFAL	Eunota fallax var fallax	0,01	FPIN	Fragilaria pinnata	25,56	NIFR	Nitzschia frustulum	1,51	SLIN	Suriella linearis	0,01
AUGR	Aulacoseira granulata var gra.	0,10	EGAE	Encyonema gaemannii	0,07	FRHO	Frustulia rhomboides	0,01	NINC	Nitzschia inconspicua	0,07	SPHO	Stauroneis phoenicenteron	0,01
AUTI	Aulacoseira italica	0,10	EGLA	Eunota glacialis	0,01	FRQB	Fragilaria robusta	1,04	NIPM	Nitzschia permunita	0,02	SPUP	Sellaphora pupula	0,46
AUVA	Aulacoseira valida	0,81	EINC	Eunota incisa	0,01	FTEN	Fragilaria tenera	0,25	NJAG	Navicula jaeggi	0,02	SSMI	Stauroneis smithii	0,03
BBRE	Brachysira brebissonii var bre.	0,22	EMIN	Eunota minor	0,01	FULN	Fragilaria ulna	0,01	NLAE	Navicula laevissima	0,02	SSTM	Sellaphora stroemii	0,02
BVIT	Brachysira vitrea	0,45	ENMI	Encyonema minutum	1,02	FVIR	Fragilaria virescens	0,01	NLEN	Navicula lenzi	0,02	STAN	Stauroneis anceps	0,24
CAEX	Cymbella excisa var excisa	0,13	ENNO	Encyonema neogracilis	0,22	GACU	Gomphonema acuminatum	0,10	NMIS	Navicula minuscula	0,03	STRP	Stauroneis prominula	0,02
CATE	Caloneis tenuis	0,03	ENPE	Encyonema perpusillum	0,14	GAFF	Gomphonema affine	0,06	NMMU	Navicula minuscula var mur	0,02	SURS	Suriella sp	0,01
CBAC	Caloneis baculum	0,17	ENRO	Encyonema rostratum	0,01	GANC	Gomphocymbella ancylis	0,06	NPAA	Nitzschia paleacea	0,30	TFLO	Tabellaria flocculosa	0,40
CBAM	Cymbopleura amphicephala	0,01	ENVE	Encyonema ventricosum	0,52	GCLA	Gomphonema clavatum	0,02	NPAL	Nitzschia palea	1,16	TVEN	Tabellaria ventricosa	0,11
CBNA	Cymbopleura naviculiformis	0,06	EOMI	Ellimina minima	1,98	GGRA	Gomphonema gracile	0,20	NPSIC	Navicula pseudoscudiformis	0,21			
CCMS	Cyclotella comensis	0,01	EPRA	Eunota praeputia	0,01	GPAR	Gomphonema parvulum	1,18	NRAD	Navicula radiosa	0,25			
CCOM	Cyclotella comta	1,34	ESLE	Encyonema silesiacum	0,87	HVII	Hantzschia vivax	0,01	NRDT	Navicula rotunda	0,15			

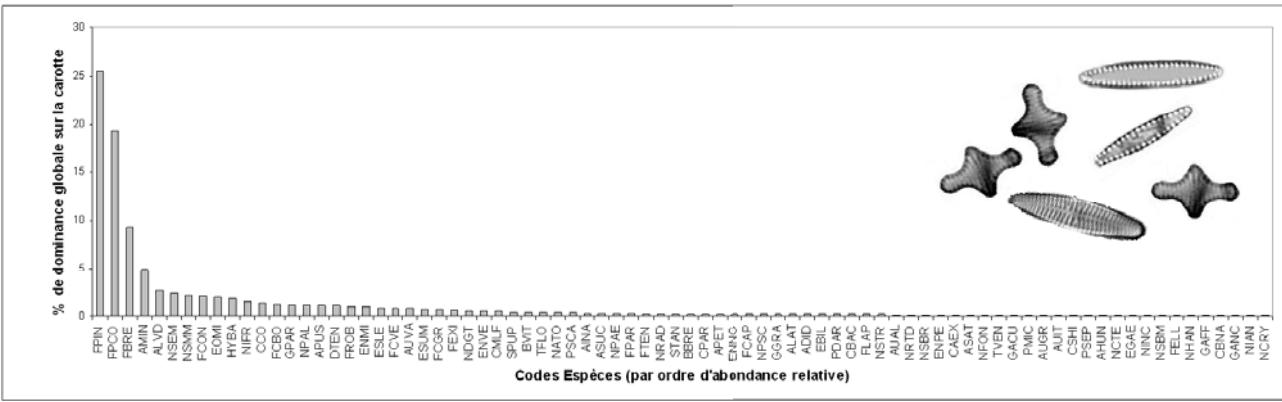
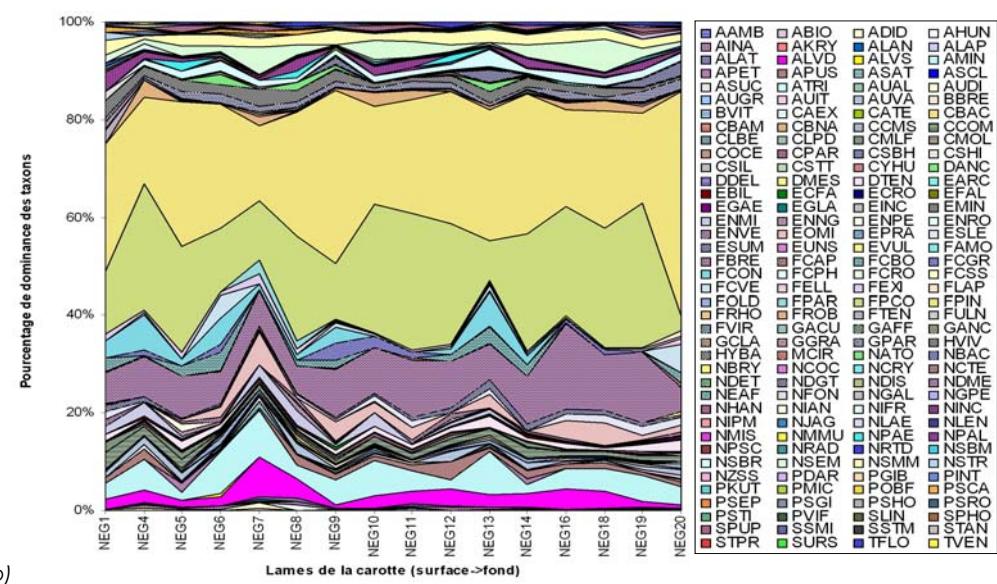


Figure 48 - Cortège type de diatomées pour le lac Nègre, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont soulignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - >5% du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac Nègre, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment. Par souci de clarté, seuls les taxons représentant plus de 0,05% du peuplement sont représentés.

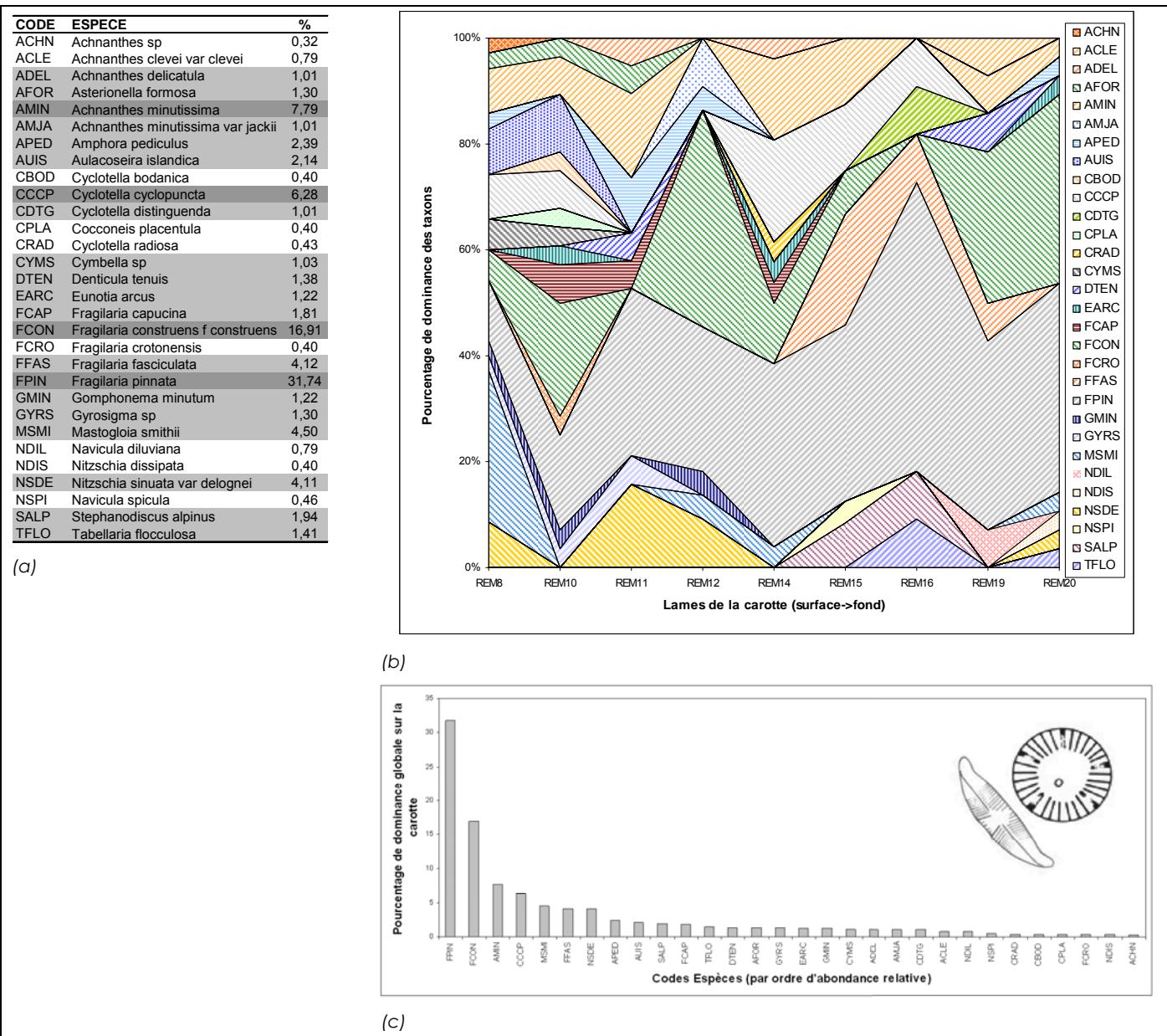


Figure 49 - Cortège type de diatomées pour le lac de Remoray, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont soulignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - >5 % du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac de Remoray, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment.

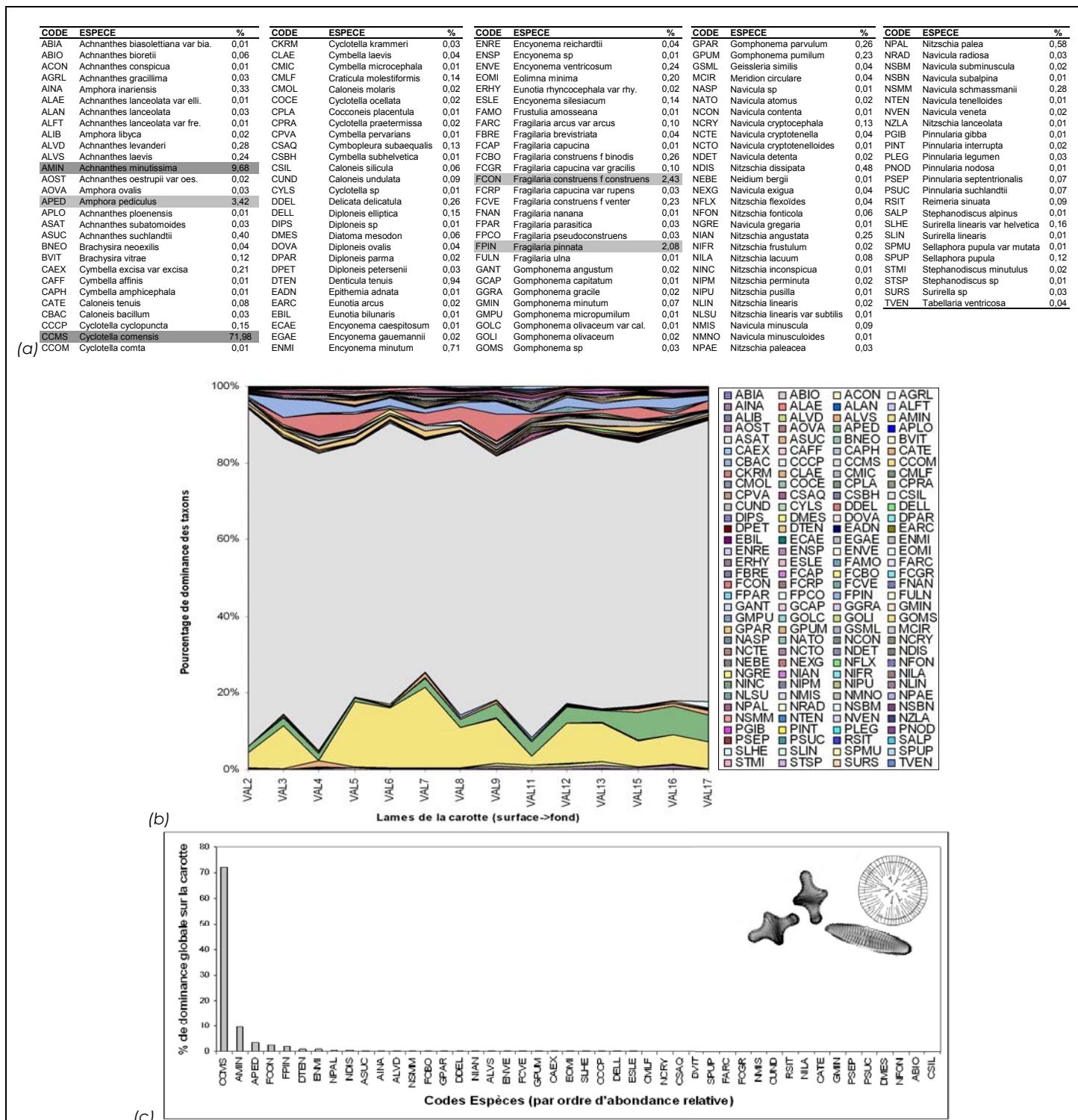


Figure 50 - Cortège type de diatomées pour le lac de Vallon, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants au sein du peuplement global sont surlignés en gris clair - >1% du peuplement - et en gris foncé - >5 % du peuplement); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac de Vallon, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment. Par souci de clarté, seuls les taxons représentant plus de 0,05% du peuplement sont représentés.

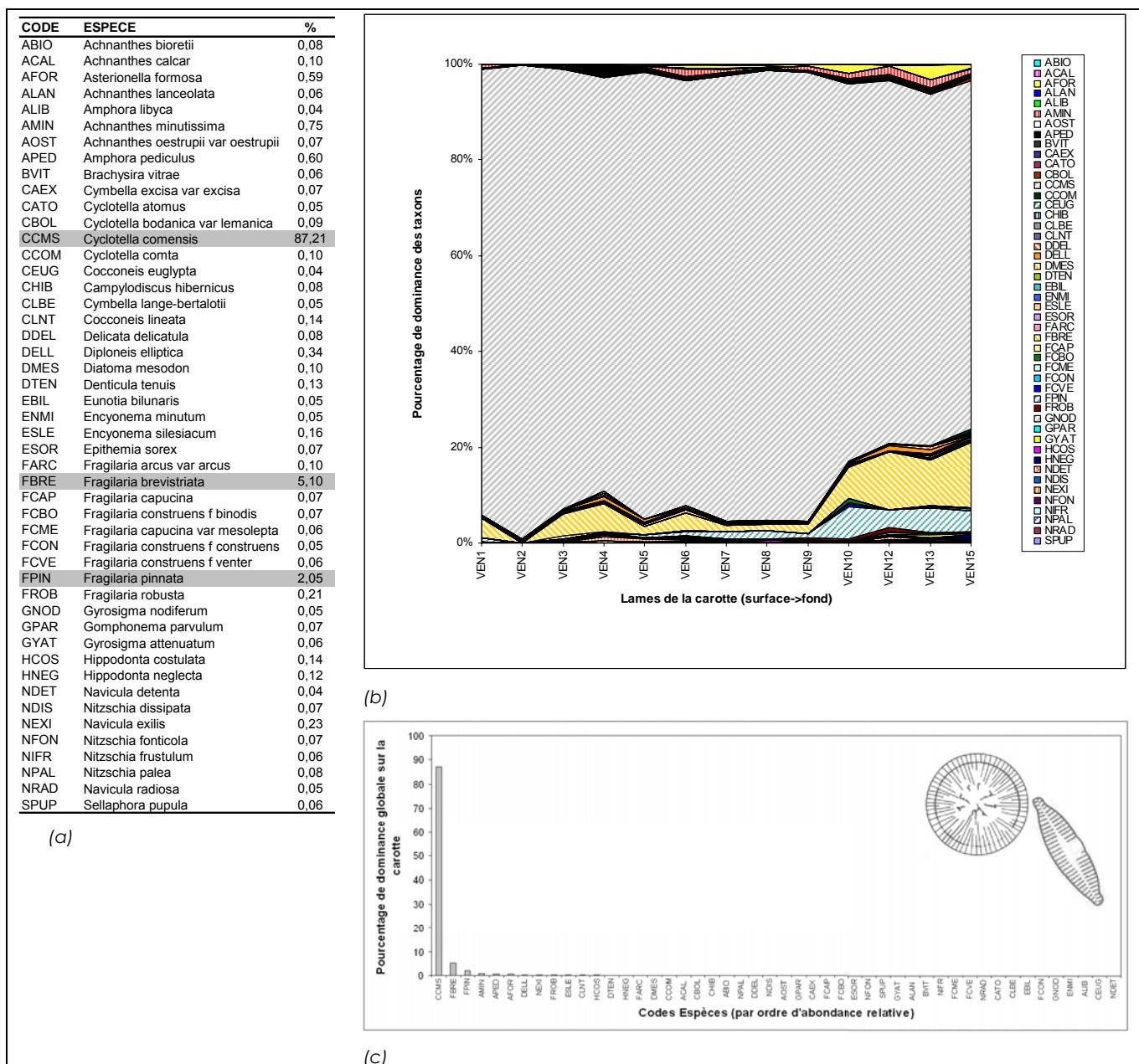


Figure 51 - Cortège type de diatomées pour le lac de Vens, déterminé en isolant les peuplements les plus récurrents à travers les tranches de sédiment issues du carottage. (a) liste floristique et pourcentage de représentation globale des taxons à travers la carotte de sédiment (les taxons dominants - >1% du peuplement global - sont soulignés en gris); (b) illustration de la nature des peuplements à travers la carotte de sédiment, prenant en compte à la fois la présence et l'abondance relative des taxons (cf. jeu de données en annexe); (c) histogramme du cortège d'espèces types du lac de Vens, montrant les taxons dominants et les taxons satellites, basé sur la représentativité et l'abondance globale des espèces le long de la carotte de sédiment.

## IV) CONCLUSION

L'examen combiné des différentes approches mises en œuvre permet d'appréhender l'évolution temporelle des lacs étudiés et de confirmer ou non leurs statut de référence. Il est donc possible de préciser leurs états par type morphologique CEMAGREF<sup>36</sup>:

### Type N1 : Lacs de haute montagne avec zone littorale

- Lac d'**Anterne** : Les caractéristiques physico-chimiques du lac d'Anterne présentent une faible variabilité temporelle sans évolution marquée, avec une absence d'impact de métaux lourds. L'étude des peuplements diatomiques, tant par l'approche taxinomique que fonctionnelle par les traits écologiques, bien que montrant d'importantes fluctuations conforte l'approche physico-chimiques en ne montrant pas de sens évolutif. Le lac d'Anterne constitue donc un référentiel acceptable. Il est toutefois à noter que la typologie CEMAGREF ne prend pas en compte le fond géochimique alcalin qui caractérise le lac d'Anterne au sein des lacs alpins.

### Type N2: Lacs de haute montagne à berges dénudées

- Lac des **9 Couleurs** : Le lac des 9 Couleurs présente la plus faible vitesse de sédimentation relevée par le LSCE dans le massif alpin français. Sa physico-chimie et sa flore diatomique montrent une certaine variabilité temporelle sans aucune direction évolutive particulière. Cependant, ces variations ne ressortent pas au niveau des classes phytoplanctoniques déterminées par l'analyse des pigments fossiles. L'impact des micropolluants est négligeable. Le lac des 9 Couleurs reste bien préservé.
- Lac **Nègre** : Le lac Nègre se caractérise par une grande variabilité sans tendance évolutive de ses caractéristiques physico-chimiques et de sa flore diatomique, d'un point de vue taxinomique et fonctionnel. Les concentrations en pigments fossiles dans le sédiment montrent peu de variabilité et une absence de sens évolutif. Au niveau des contaminations par les micropolluants, le sédiment du lac Nègre présente des pics de teneurs en cuivre et sélénium. Nous pouvons également noter que le lac Nègre se situe au sein d'une zone sismique pouvant avoir des répercussions sur les différents compartiments étudiés. Peu impacté et stable, il semble constituer un état de référence lacustre.
- Lac du **Vallon** : La physico-chimie, l'étude des peuplements diatomiques et des pigments fossiles contenus dans le sédiment du lac du Vallon présentent une variabilité modérée sans réelle tendance évolutive. On constate toutefois une

<sup>36</sup> Aquascope – Gay-Environnement, 2002. Notes sur la typologie des plans d'eau. SEQ Plan d'eau et directive-cadre. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durables – Agences de l'Eau. 11p

augmentation importantes des teneurs en phosphore au niveau des 3 segments de carottes les plus superficiels. Ce plan d'eau reste cependant globalement bien préservé.

- Lac de **Vens 1<sup>er</sup>** : La physico-chimie et l'étude de la structure des peuplements diatomiques caractérise le lac de Vens 1<sup>er</sup> comme stable sans direction évolutive. Au niveau des lames les plus superficielles correspondant à l'époque contemporaine, on observe une augmentation des teneurs en phosphore, azote et carbone. L'étude des pigments fossiles montre des épisodes de productions phytoplanctoniques prononcées, n'entraînant cependant aucune évolution trophique notable du plan d'eau. A l'image du lac du Vallon, le lac de Vens 1<sup>er</sup> reste globalement bien préservé.
- Le lac de **Lauvitel** : le lac de Lauvitel présente la plus forte vitesse de sédimentation de l'étude et son carottage ne couvre qu'une centaine d'année. Il se singularise des autres lacs d'étude par sa physico-chimie et sa flore diatomique qui présentent de faibles variations sans tendance évolutive. A noter au sein de l'ensemble de ses chrono-peuplements de diatomées, la présence d'une diatomée rare : *Achnanthes gracillima*. D'un point de vue géomorphologique, il se démarque des autres lacs d'étude par son caractère marnant (amplitude de marnage jusqu'à 20m) et les berges abruptes de sa cuvette lacustre. L'étude des pigments fossiles présents dans ses sédiments, caractérisés par une faible variabilité et une absence d'évolution, ne le distingue pas des autres lacs. Ses teneurs en cuivre, chrome, nickel, zinc et sélénium, bien que faibles, sont toutefois supérieures à ce que l'on retrouve dans les autres lacs étudiés. En raison de ses singularités le démarquant des autres lacs alpins du même type, le lac de Lauvitel ne constitue donc pas forcément une référence pour le type N2. Cependant, il pourrait faire état de référence pour un sous-type du type N2, défini comme "lacs marnants de haute montagne à berges dénudées".

#### Type N4: Lacs de moyenne montagne calcaire profond à zone littorale

- Le lac de **Chalain**: la flore diatomique, tant au niveau de la fonctionnalité traduite par les traits écologiques que de sa structure, et la physico-chimie du lac de Chalain montrent une faible variabilité temporelle sans tendance évolutive apparente. Nous pouvons toutefois observer des teneurs en matière organique et des valeurs des rapports C/N globalement plus élevées que pour les autres lacs étudiés, traduisant une productivité plus importante du lac de Chalain. L'étude des pigments fossiles ne montre pas non plus de tendance évolutive marquée malgré une variabilité relativement moyenne des structures pigmentaires. On peut toutefois remarquer l'augmentation sensible de lutéine (biomarqueur des chlorophycées) au niveau du segment le plus superficiel, pouvant refléter un impact des campings environnants. Le lac de Chalain semble cependant constituer une bonne référence pour le type N4.

- Le lac de **Remoray**: Le lac de Remoray se caractérise tant par sa physico-chimie, la structure de son peuplement diatomique et l'évolution de ses teneurs en pigments fossiles par une variabilité globalement faible, présentant toutefois un glissement trophique sur les 50 dernières années. Cet enrichissement du milieu ne se traduit toutefois pas au niveau de l'évolution des traits écologiques du peuplement diatomique. A noter que cet enrichissement du lac au cours de la période contemporaine se traduit visuellement par un changement d'aspect de la carotte de sédiment dans sa partie superficielle. Au vue de cette évolution marquée, le lac de Remoray ne semble pas constituer une référence pour le type N4.

En retenant les lacs identifiés précédemment comme références, il est possible de définir des « cartes d'identités lacustres de référence », en déterminant des valeurs et des seuils de référence physico-chimiques pour chacune des typologies CEMAGREF concernées par cette étude. En raison de sa singularité décrite précédemment, le lac de Lauvitel n'est pas inclus comme référentiel au sein du type N2, et fait l'objet d'une analyse particulière appelée « sous-type N2 ». Une valeur de référence est, par définition, une valeur dont l'ordre de grandeur est commun pour un type de plan d'eau donné. Au regard de la petite taille du jeu de données de cette étude (de 1 à 4 lacs seulement pris en compte par typologie), les résultats ci-dessous ne peuvent donc pas être généralisés et sont présentés à titre indicatif.

En considérant que la distribution des valeurs suit une loi normale, il est possible, par type de plan d'eau, de définir une valeur moyenne et un intervalle de confiance à 95% pour chaque paramètre. Les valeurs moyennes et les intervalles de confiance obtenus sont présentés dans le *tableau VI*.

Paramètre	Type N1	Type N2	Sous-type N2	Type N4
	Lac d'Anterne	Lacs des 9 Couleurs, Nègre, du Vallon et de Vens 1er	Lac de Lauvitel	Lac de Chalain
P (mg/g)	692,63 ± 34,71	990,19 ± 80,27	1824,86 ± 88,35	251,59 ± 52,57
SiO <sub>2</sub> (g/kg)	643,96 ± 25,83	512,51 ± 23,68	684,46 ± 53,54	84,12 ± 11,17
pH	9,32 ± 0,05	6,50 ± 0,12	6,95 ± 0,26	8,14 ± 0,09
Alcalinité (méo/g)	0,1256 ± 0,0907	0,1738 ± 0,0515	0,0267 ± 0,0101	0,1004 ± 0,0106
MO (%)	5,57 ± 0,70	8,61 ± 0,69	46,76 ± 0,36	34,93 ± 1,95
C (mg/kg)	20831,85 ± 2192,17	31612,80 ± 4065,70	13721,80 ± 1876,44	117729,00 ± 3427,18
N (mg/kg)	638,00 ± 129,63	1447,55 ± 172,64	316,70 ± 116,82	1181,65 ± 127,31
C/N	37,94 ± 7,59	23,45 ± 2,39	274,01 ± 347,01	104,66 ± 11,30
Cu (mg/g)	0,0179 ± 0,0013	0,0628 ± 0,0065	0,1043 ± 0,0080	0,0118 ± 0,0031
Cr (mg/g)	0,0066 ± 0,0014	0,0118 ± 0,0012	0,0416 ± 0,0050	0,0427 ± 0,0043
Ni (mg/g)	0,0479 ± 0,0026	0,0326 ± 0,0037	0,1848 ± 0,0180	0,0236 ± 0,0032
Cd (mg/g)	0,0007 ± 0,0007	0,0020 ± 0,0008	0,0022 ± 0,0009	0,0003 ± 0,0003
Zn (mg/g)	0,0959 ± 0,0061	0,3610 ± 0,0555	0,8003 ± 0,1000	0,0808 ± 0,0276
Pb (mg/g)	0,0266 ± 0,0047	0,0711 ± 0,0098	0,3536 ± 0,0622	0,0312 ± 0,0088
Se (mg/g)	0,0005 ± 6E-05	0,0007 ± 0,0001	0,0008 ± 0,0003	0,0008 ± 0,0002
As (mg/g)	0,0412 ± 0,0021	0,3462 ± 0,2003	0,2262 ± 0,0358	0,0076 ± 0,0019

Tableau VI : Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 95% des descripteurs physico-chimiques et des teneurs en micropolluants par type de lac selon la typologie CEMAGREF. Pour le type N2, les valeurs ont été calculées en tenant compte des données des 4 lacs considérés.

Afin de pouvoir directement comparer visuellement et rapidement les caractéristiques physico-chimiques des types de lacs entre eux, les bornes des intervalles de confiance à 95% sont normalisées. La figure 52 présente pour chaque type de lac un profil physico-chimique.

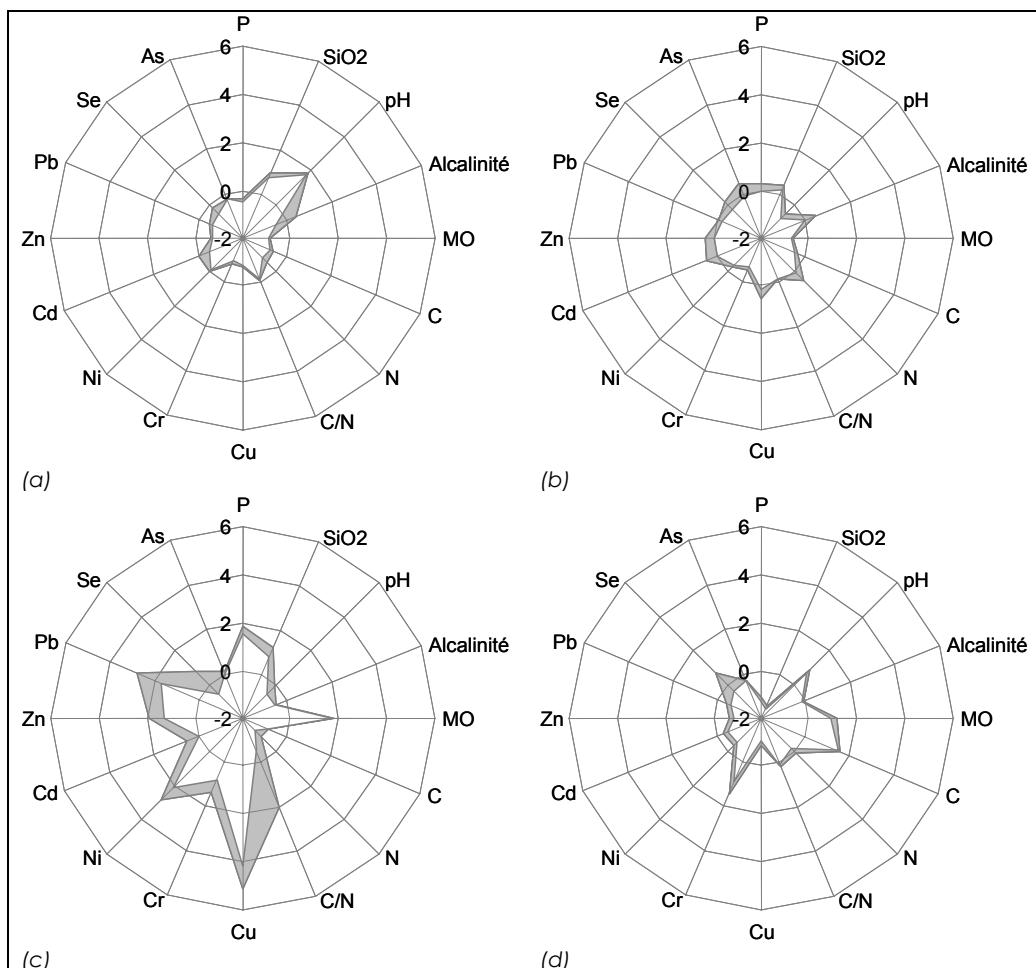


Figure 52 : Représentations graphiques des caractéristiques physico-chimiques et des teneurs en micropolluants des lacs d'étude regroupés par type CEMAGREF. La zone grisée représente l'intervalle de confiance (ou plage de référence) à 95% normalisé pour chaque descripteur. La normalisation est réalisée à partir des valeurs moyennes et des écart-types calculés par paramètre sur l'ensemble des lacs. (a) : Lac de Type N1 : lac d'Anterne, (b) : Lacs de type N2 : lacs des 9 Couleurs, Nègre, du Vallon et de Vens 1<sup>er</sup>; (c) Lac du sous-type N2 : lac de Lauvitel ; (d) : Lac de type N4 : lac de Chalain.

Pour chaque type, nous observons des intervalles de confiance (ou plage de référence) assez restreints sur les paramètres physico-chimiques. A noter que dans cette étude, le type N1 est défini uniquement par le lac d'Anterne, lac caractérisé par un contexte géologique relativement atypique pour un lac alpin (contexte schisto-marneux alcalin). La typologie CEMAGREF ne prenant en compte que très superficiellement le fond géochimique dans la caractérisation des lacs, le type N1 est défini dans cette étude comme ayant un pH élevé (figure 52a), ce qui doit être évidemment relativisé.

Le type N2 (figure 52b), lac de haute montagne à berges dénudées, défini ici par les lacs des 9 Couleurs, Nègre, du Vallon et de Vens 1<sup>er</sup>, présente une assez faible amplitude des plages de référence de l'ensemble des paramètres et semble être bien défini d'un point de vue physico-chimique.

Le sous-type N2 (figure 52c) correspondant au lac de Lauvitel, se caractérise surtout par des teneurs relativement plus importantes en micropolluants et des rapports C/N plus élevés. Ces derniers paramètres montrent des variabilités marquées. Les intervalles de confiance des autres paramètres physico-chimiques sont relativement faibles.

Le type N4 (figure 52d) de référence, représenté dans cette étude par le lac de Chalain, présente des intervalles de confiance faibles pour l'ensemble des paramètres. Il se distingue par de plus fortes teneurs en carbone et en matière organique.

• **Annexe 1 :**  
Etude radiochronologique  
des sédiments des lacs du  
district Rhône-Méditerranée



*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement*

**Etude radiochronologique des sédiments des lacs du district  
Rhône-Méditerranée et Corse.**

( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$ ).



**Responsable scientifique Jean-Louis REYSS (LSCE)**

Unité Mixte de Recherche CEA-CNRS

LSCE-Orme – Bât.709 – Orme des Merisiers – 91191 Gif-sur-Yvette Cedex      Tél. : 01 69 08 77 11 – Fax. : 01 69 08 77 16  
LSCE-Vallée – Bât.12 – avenue de la Terrasse – 91198 Gif-sur-Yvette Cedex      Tél. : 01 69 82 35 35 – Fax. : 01 69 82 35 68

GREBE

LSCE/CNRS - INRA - LSE/ENTPE

## Les outils :

Les mesures par spectrométrie gamma permettent de déterminer simultanément et sans traitement préalable l'activité d'un grand nombre d'isotopes radioactifs sur des échantillons de sédiments séchés.

### **$^{7}Be$ ( $T \frac{1}{2} = 53j.$ )**

C'est un cosmonucléide d'origine atmosphérique apporté par la pluie. Compte tenu de sa courte période sa détection à la surface des carottes sédimentaires témoigne de la présence de celle-ci d'une part et sa distribution dans la colonne sédimentaire permet de mettre en évidence les phénomènes de mélange entre le sédiment de surface et les couches plus anciennes d'autre part.

### **$^{210}Pbexc$ ( $T \frac{1}{2} = 22a.$ )**

Descendant du  $^{226}Ra$  dans la famille radioactive naturelle de l'uranium 238, le  $^{210}Pb$  des sédiments a deux origines :

-la production par son père avec lequel il est à l'équilibre séculaire dans les phases détritiques,

-le flux de  $^{210}Pb$  d'origine atmosphérique provenant du radon qui exhale des roches. Ce dernier qui n'est pas alimenté par son père radioactif décroît dans les sédiments avec sa période propre de 22 ans. Il est appelé  $^{210}Pbexc$ , et la décroissance de son activité est utilisée pour mesurer **les taux de sédimentation** pour les 100 à 150 années passées. Cependant il convient de considérer qu'après une centaine d'années son activité n'est plus que de 3% de ce quelle était au moment du dépôt et les phénomènes de mélange, diagenèse... altèrent les profils. Son utilisation après cent ans n'est donc pas recommandée.

### **$^{137}Cs$ et $^{241}Am$ :**

Ces deux radioéléments artificiels ont été injectés dans l'atmosphère par les activités nucléaires industrielles et militaires. Alors que le Cs a été produit aussi bien lors des essais nucléaires atmosphériques des années soixante que lors de l'accident de Tchernobyl, l'américium n'est pas observé dans les retombées atmosphériques de Tchernobyl. Il est donc possible en mesurant simultanément les 2 radioéléments d'attribuer une origine à un pic de  $^{137}Cs$  dans une carotte : **1963 = $^{137}Cs + ^{241}Am$**  et **1986 =  $^{137}Cs$** . Dans les retombées des années

soixante, le rapport d'activité  $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$  est supérieur à 40 c'est pourquoi la mesure de l'américium est plus difficile et par conséquent moins précise que celle du césium.

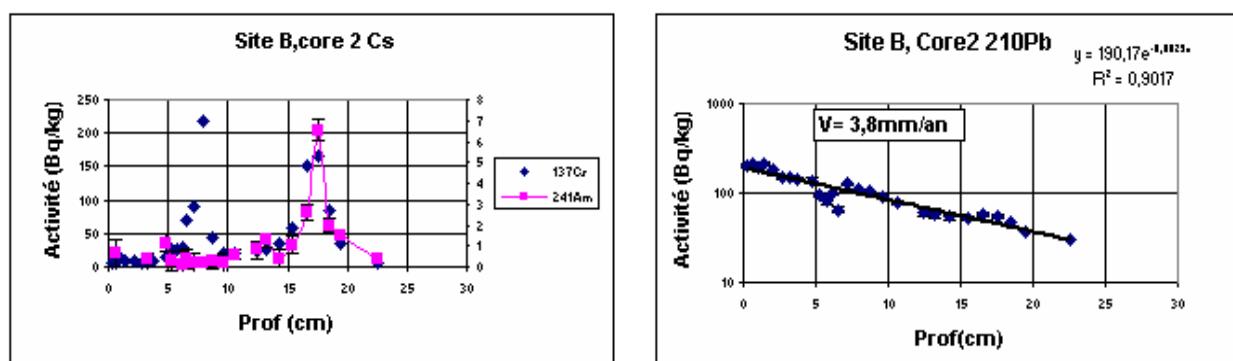
### Les mesures :

Des mesures préliminaires ont été effectuées à Gif sur Yvette à l'aide d'une chaîne de spectrométrie gamma classique pour localiser les pics de  $^{137}\text{Cs}$  en profondeur dans les carottes. Quatre à cinq heures de comptage sont nécessaires pour mesurer le  $^{137}\text{Cs}$ .

Les mesures définitives de spectrométrie gamma ont été réalisées à l'aide des installations très performantes du LSCE au **Laboratoire Souterrain de Modane**. Protégés des interactions du rayonnement cosmique, les détecteurs, de grande efficacité, ont des performances remarquables (bruit de fond quasi nul) qui autorisent des mesures fiables de la radioactivité contenue dans quelques centaines de milligrammes de sédiment. Pour les mesures, le sédiment a été séché à l'étuve à 110°. La mesure d'un échantillon dure 24 heures. Après la mesure gamma, la poudre est disponible pour d'autres expériences

### La démarche expérimentale :

Notre démarche est illustrée par la figure 1. Elle présente les profils d'éléments radioactifs mesurés en spectrométrie gamma sur une carotte profonde du lac du Bourget (73) en juin 2004. Cette carotte peut être considérée comme un « cas d'école » car la sédimentation est très lente et constante comme l'a prouvé l'examen des lames annuelles qui sont régulièrement disposées.



**Figure1.** Distribution des radioéléments dans une carotte sédimentaire du lac du Bourget

Dans cette carotte on observe 2 pics de  $^{137}\text{Cs}$ , un à 7 cm et l'autre à 17 cm, en revanche  $^{241}\text{Am}$  ne présente qu'un pic à 17cm. On peut donc attribuer le pic de  $^{137}\text{Cs}$  à 17cm au

maximum de retombées des expériences nucléaires en 1963. Le pic à 7 cm correspond à l'accident de Tchernobyl en 1986. Ces dates sont en accord avec le taux de sédimentation de 3,8 mm par an déduit de la décroissance du  $^{210}\text{Pb}$  dans la carotte.

### **Remarques concernant les limites de la méthodologie mise en œuvre.**

-Nous avons choisi d'échantillonner avec une maille de 0,5 à 1 cm, pour deux raisons : (1) pour pouvoir disposer d'une quantité suffisante de matière pour la mesure, (2) la nature du sédiment rendrait un échantillonnage en couches plus fines délicate et peu précise. L'inconvénient de cet échantillonnage est que lorsque le taux de sédimentation est très faible : <1mm/an les pics des deux évènements «  $^{137}\text{Cs}$  » seront mal voire pas séparés puisque leur écart n'est que de 23 ans soit 2,5cm pour 1mm/an.

-L'excès de  $^{210}\text{Pb}$  est le résultat de la soustraction de deux activités : celle du  $^{210}\text{Pb}$  total et celle du  $^{226}\text{Ra}$  cela implique donc que ces deux éléments ne sont pas remobilisables au cours des processus diagénétiques qui interviennent après le dépôt sédimentaire. Cette hypothèse n'est pas toujours réalisée car la mobilité de ces deux éléments est connue. De plus on observe souvent des « effets de bord » dus au carottage qui entraînent une pollution des niveaux inférieurs de la carotte par les niveaux de surface, c'est pourquoi nous limiterons en général nos interprétations des profils de  $^{210}\text{Pb}$  à cinq périodes soit à 110 ans.

### **Résultats.**

Les lacs Nègre, Vens 1 et 9 Couleurs sont des lacs d'altitude(> 2000m) dans un environnement granitique et de bassins versants relativement limités : < 500ha) on peut donc s'attendre à des régimes sédimentaires semblables.

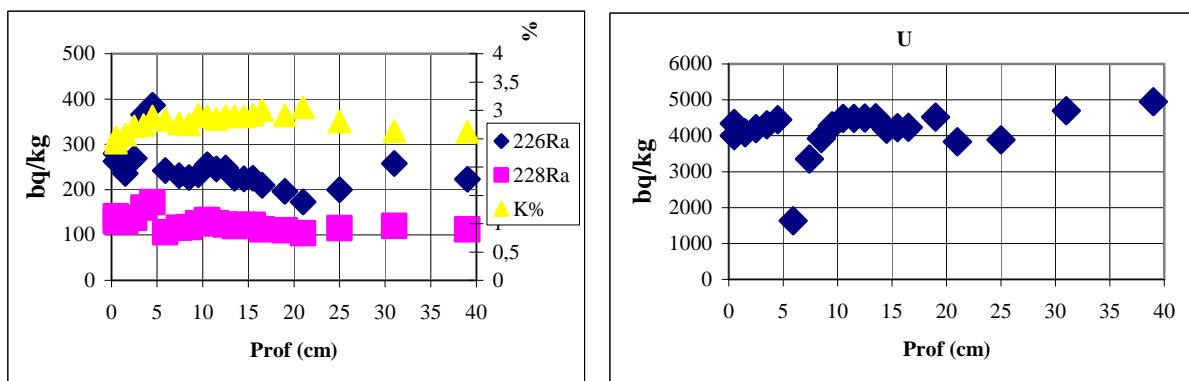
#### Lac Nègre.

Cette carotte est caractérisée par une forte teneur en radioéléments de la famille de l'uranium, de l'ordre de 4500 à 5000bq/kg.. En spectrométrie gamma ces fortes teneurs compliquent le spectre des autres éléments notamment et interdisent la mesure d'éléments qui pourraient être présent à l'état de trace. C'est le cas du  $^{231}\text{Pa}$  et du  $^{7}\text{Be}$  que nous n'avons pas

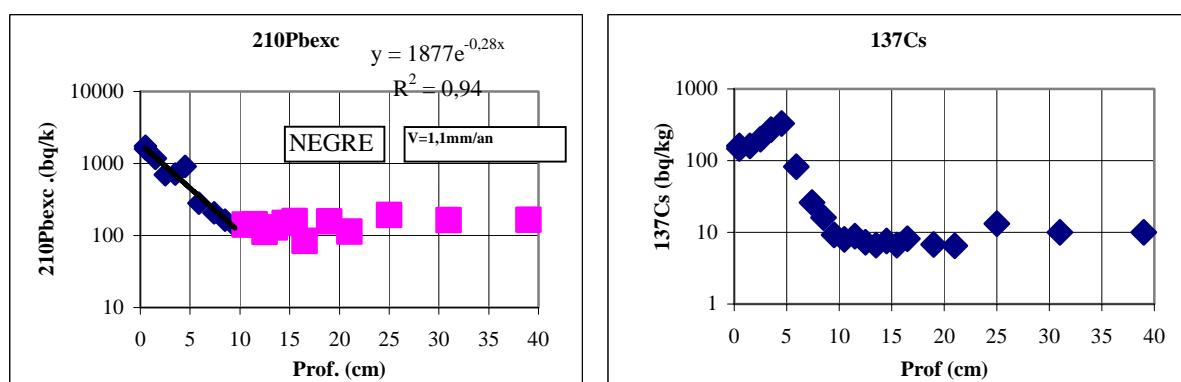
pu mesurer. Nous avons remarqué une couche de couleur claire, bien stratifiée entre 5 et 6,5 cm. Cette couche est caractérisée par une perte en eau de 55% alors quelle est de l'ordre de 70% pour le reste de la carotte, sa teneur en uranium est aussi beaucoup plus faible : 1500bq/kg. Ce niveau correspond donc à un apport sédimentaire différent. Qui perturbe les profils que devrait générer une sédimentation régulière.

Le profil de  $^{137}\text{Cs}$  est marqué par une forte augmentation à partir de 6cm et un maximum à 4,5 cm qui peut être attribué aux test nucléaires de 1963 ce qui correspondrait à un taux de sédimentation de 1mm par an.. Le pic d'activité du à l'évènement Tchernobyl n'est pas visible, probablement à cause de la maille d'échantillonnage qui ne permet pas de le séparer de celui des années soixante.

Le profil de  $^{210}\text{Pbexc}$ . correspond, pour les 10 centimètres supérieurs, à un taux de sédimentation de **1,1 mm par an**, qui confirme nos observations concernant le  $^{137}\text{Cs}$ .



**Figure 3a :** Profils des radiums 226 et 228 en bq/kg et du potassium en % dans la carotte « Nègre »

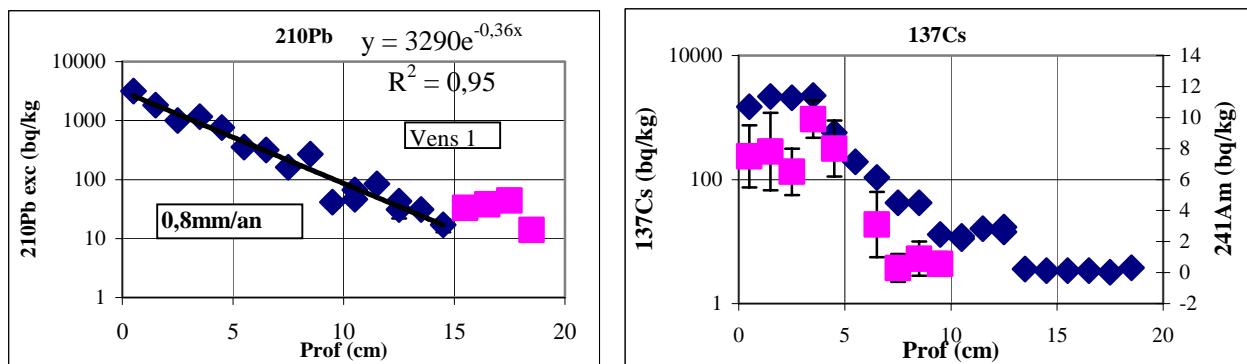


**Figure 3b :** Profils de  $^{210}\text{Pb}$  en excès et de  $^{137}\text{Cs}$  dans la carotte « Nègre »

Pour les niveaux inférieurs, des excès de  $^{210}\text{Pb}$  et de Cs sont visibles et constants entre 40 et 10cm il s'agit soit d'une pollution par les niveaux supérieurs, soit d'un apport massif quasi instantané de sédiment (slumping) il y a une centaine d'années. Cette deuxième hypothèse est plus probable car une pollution due à l'échantillonnage devrait diminuer avec la profondeur **hors** ce n'est pas le cas.

### Vens 1

Comme le montrent les profils de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pbexc}$  (Fig 4) le taux de sédimentation dans ce lac est extrêmement faible, de l'ordre de 1mm/an. Le  $^7\text{Be}$  a été détecté en surface



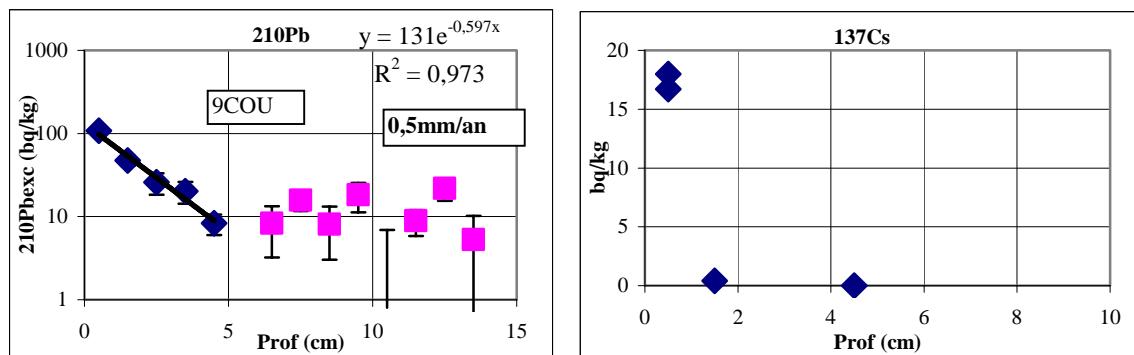
**Figure 4 :** Profils de  $^{210}\text{Pbexc}$  et de  $^{137}\text{Cs}+^{241}\text{Am}$  dans la carotte « Vens 1 »

Les profils de  $^{137}\text{Cs}$  et Am permettent de situer le pic de 1963 à 4cm, par contre comme dans la carotte « Nègres » (Fig 3b) le pic correspondant à Tchernobyl n'est pas visible.

La décroissance exponentielle de l'activité en  $^{210}\text{Pbexc}$  dans la carotte correspond à un taux de sédimentation de **0,8mm/an**, en bon accord avec le pic de  $^{137}\text{Cs}$  de 1964 vers 4cm.

## 9 Couleurs.

La taux de sédimentation dans le lac de 9 Couleurs est probablement extrêmement faible car  $^{137}\text{Cs}$  (Fig.5) n'est détectable que dans le centimètre d'interface. Cependant, la mesure de  $^7\text{Be}$  : 31 Bq/kg dans cette couche prouve que l'interface a bien été prélevée. Le profil de  $^{210}\text{Pbexc}$  pour les 5 cm supérieurs confirme une sédimentation très lente de **0,5mm/an**, c'est la valeur la plus faible que nous ayons mesuré dans le massif alpin français.

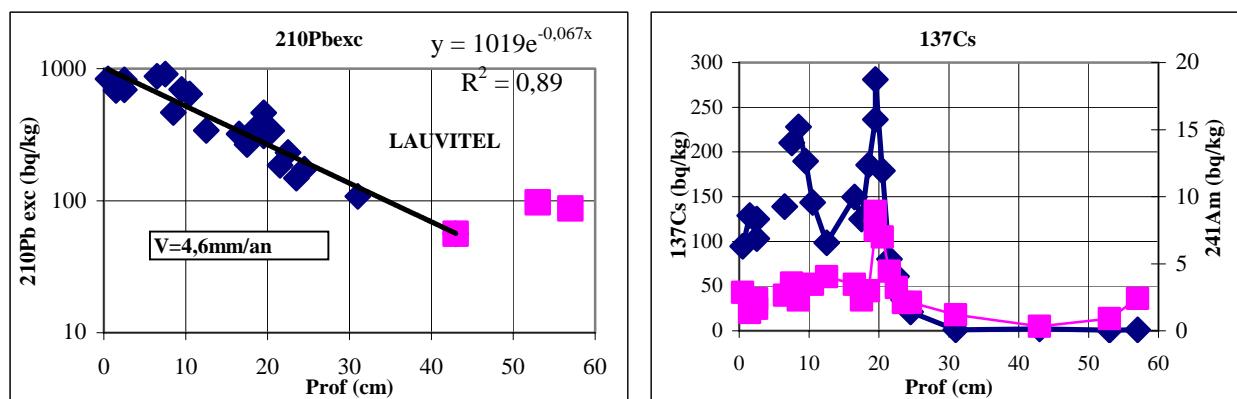


**Figure 5 :** Profils de  $^{210}\text{Pbexc}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  dans la carotte « 9 Couleurs »

## Lauvitel

La carotte sédimentaire présente les 2 pics de radioéléments artificiels : à 20cm un pics de  $^{137}\text{Cs}$  accompagné de  $^{241}\text{Am}$  qui correspond à l'année 1963 ( $\Delta t = 44\text{ans}$ ) et un pic à 9cm attribuable à l'accident de Tchernobyl 1986 ( $\Delta t = 21\text{ans}$ ). L'interface est prélevée comme le montre la teneur en  $^7\text{Be}$  qui est de 40 bq/kg.

Le profil de  $^{210}\text{Pbexc}$  (Fig 6) correspond à un taux moyen de sédimentation de **4,6 mm/an** pour les 40 cm supérieurs



**Figure 6 :** Profils de  $^{210}\text{Pbexc}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{241}\text{Am}$  dans la carotte « Lauvitel »

Remarque : La décroissance du  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  est moins régulière que pour les carottes précédentes avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0,89 alors qu'il était supérieur à 0,95 cela montre que l'hypothèse de flux constants n'est pas réalisée et que le taux de sédimentation est moins régulier que dans les carottes précédentes. Si l'on utilise la cote des pics de Cs on trouve un taux de 4,4 mm/an entre 20 et 9 cm et de 4,1 entre 9 cm et l'interface.

### Vallon.

Les profils d'isotopes artificiels (Fig 7) correspondent à des taux de sédimentation très faibles puisque l'activité est concentrée dans les 6 cm supérieurs. Comme dans le cas des lacs « Nègre » et « Vens » les deux pics ne sont pas résolus. Le pic de  $^{241}\text{Am}$  à 4cm correspond à 1963, alors que l'augmentation d'activité à 1,5 cm peut être attribuée à l'accident de Tchernobyl en 1986. Le  $^{7}\text{Be}$  n'a pas été détecté mais comme pour le lac « Nègre » les fortes teneurs en U et Ra pourraient masquer sa présence attestée dans l'hypothèse d'une collection de l'interface on peut en déduire des taux de 0,85mm/an pour les premiers centimètres et 1,2 mm/an entre 1,5 et 4,5cm.

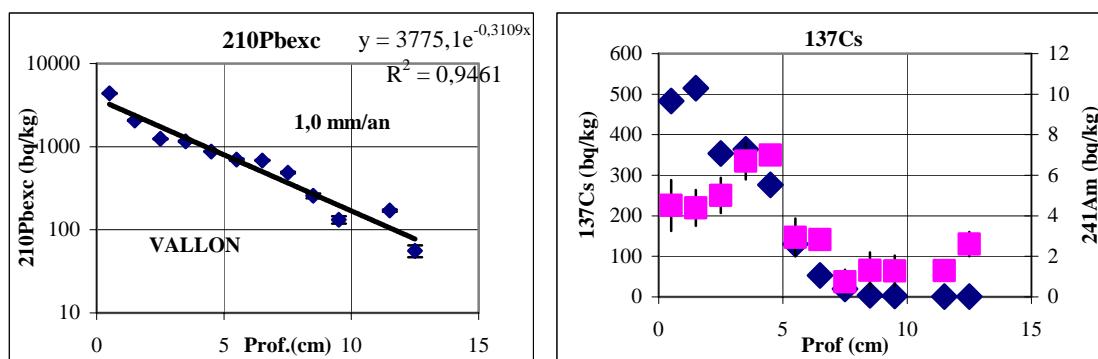
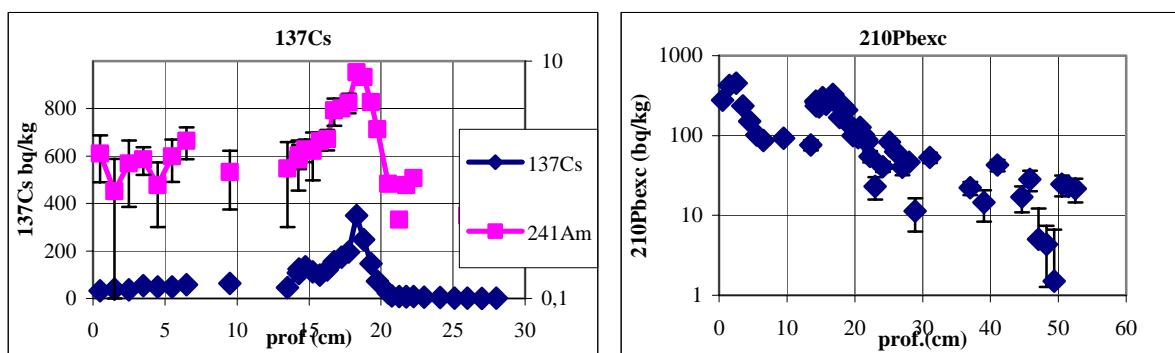


Figure 7 : mesures des la carotte « Vallon ».

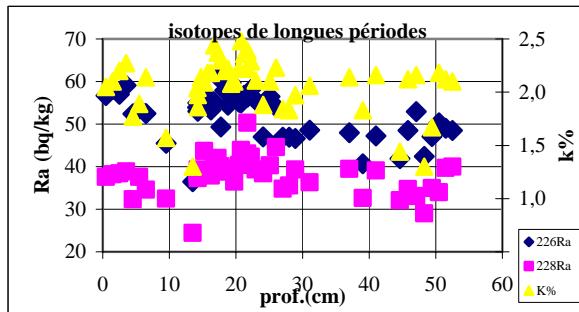
La décroissance du  $^{210}\text{Pb}$  n'est pas très linéaire elle correspond à un taux moyen de **1,0 mm/an**. Ce résultat confirme les taux déduits des isotopes artificiels. Le taux de sédimentation est probablement plus faible à l'extrême surface.

### Anterne. (Carotte ANT 06/4 Août 2006)

Comme on pouvait le prévoir visuellement sur la coupe de la carotte, **le régime sédimentaire n'est pas régulier**, il est interrompu par des événements massifs à plusieurs profondeurs. Les profils d'artificiels et de  $^{210}\text{Pbexc}$  (Fig 8a) montrent de grandes irrégularités qui n'autorisent pas une interprétation chronologique directe. Nous avons reporté dans la figure 8b les profils de radioéléments qui dans les hypothèses impliquées pour nos interprétations devraient être invariable au cours du temps : ceux de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  et K. On constate que certaines zones comme par exemple 6-14 cm présentent des teneurs inférieures à celles de l'interface et que ces zones correspondent à des horizons non laminés dans la carotte. (attention ! la carotte que nous avons étudié n'est peut être pas celle de la photo GREBE) C'est pourquoi nous avons considéré ces épisodes comme étrangers à la sédimentation lacustre régulière et les avons supprimé.



**Figure 8a :** Radionucléides artificiels et  $^{210}\text{Pb}$  dans la carotte « Anterne »

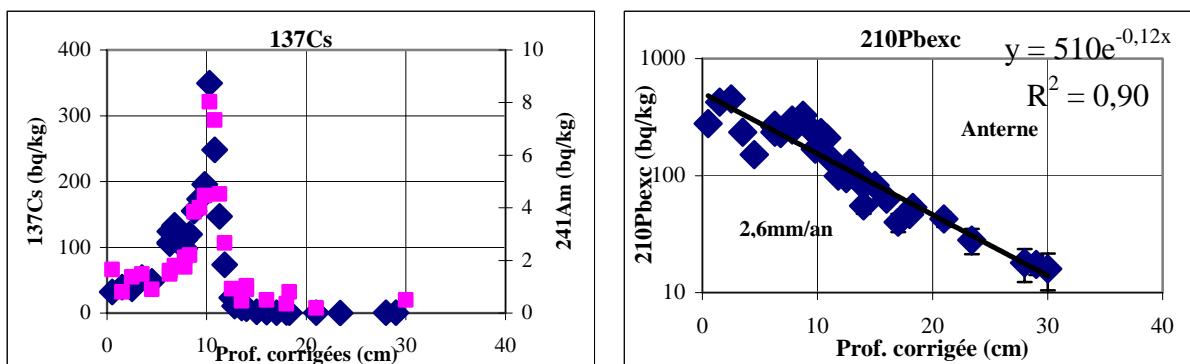


**Figure 8b :** Profils des isotopes de longue période ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ , K) dans la Carotte « Anterne ».

Après suppression des principales zones de **turbidites** : 3-14, 22-24, 33-39 cm la décroissance du  $^{210}\text{Pb}$  est beaucoup plus régulière (Fig.9), elle correspond à un taux de sédimentation moyen hors turbidites de **2,6 mm/an**.

Deux pics de  $^{137}\text{Cs}$  sont visible dans la figure 8c : (1) un pic important à 10 cm accompagné d'un pic de  $^{241}\text{Am}$ , il correspond à l'année 1963, (2) le deuxième pic à 6 cm qui n'est pas accompagné d'une augmentation de l'activité en  $^{241}\text{Am}$  pourrait être l'événement de Tchernobyl

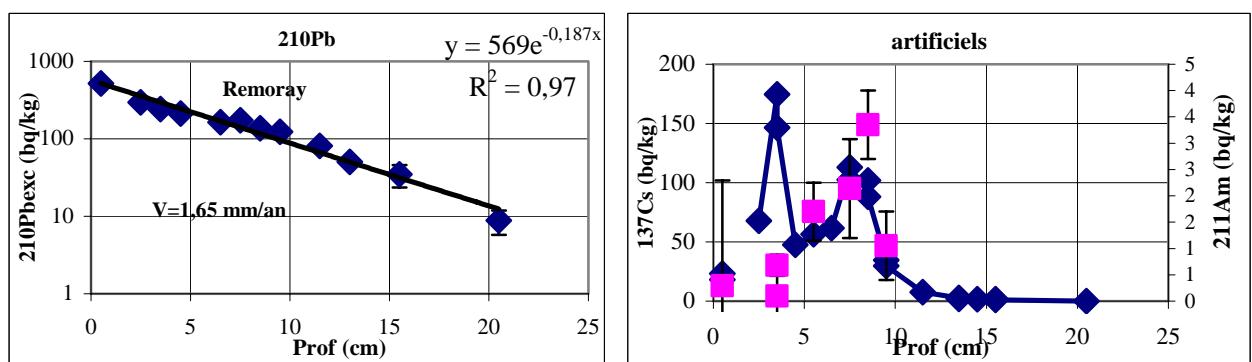
Ces résultats pourraient être précisés par un comptage des lamines.



**Figure 8c :** Profils des radionucléides après suppression des zones de turbidites.

### Remoray.

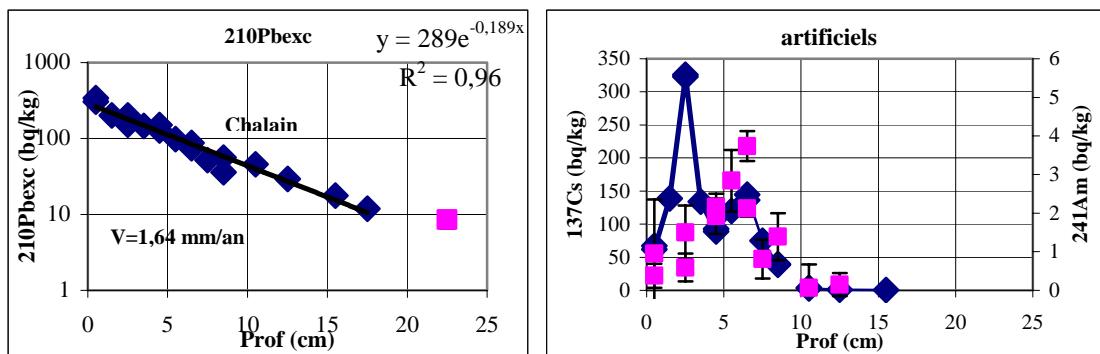
La décroissance exponentielle très régulière du  $^{210}\text{Pbexc}$  en fonction de la profondeur correspond à un taux de sédimentation de **1,65mm/an**. (Fig 9). La position des deux pics de radionucléides artificiels est en accord avec ce taux.



**Figure 9 :** Profils des radioéléments dans la carotte « Remoray »

## Chalain.

Comme pour le lac « Remoray », la chronologie du lac « Chalain » ne pose pas de problème, les deux approches conduisent à des taux de sédimentation cohérents de **1,6mm/an** (Fig 10)



**Figure 10 :** Profils des radioéléments dans la carotte « Chalain »

## Tableau récapitulatif de l'étude

LAC	dep	ville	alt	bassin ha	prof m	sup.p.e ha	V (mm/an)	210Pb(I0) Bq/kg	coef cor R2	Tche cm	CsTch1986 Bq/Kg	Tests1963 cm	CsBomb Bq/kg	226Ra Bq/kg	228Ra Bq/kg	K %	Cs/Am tests 1963	U Bq/kg	210Pb résiduel
nègre	6	valdeblore	2354	200	28	10	1,1	1877	0,94	5	330	5	250	130	2,7		4000	100	
vens 1	5	StEt Tin	2327	402	32	11	0,8	3290	0,95	2,5	2770	3,8	2200	80	45	2,2		300-100	40
9coul	4	St p sur Ub	2841	85			0,5	131	0,97			1	15	45	80	3,9	30	60	10
Lauvitel	38	Bourg d'Oisan	1495	1554	68	37	4,6	1020	0,89	8	210	19,5	290	120	90	4	32	300	90
Vallon	38	Chantelouve	2510	125	47	14	1,0	3775	0,95	2	515	4	380	200	80	4	45	1500	70
Anterne	74	Passy	2061	336	13	12	2,6*	510	0,90	7*	120	10,5*	350	40	40	2	40	50	20
Chalain	39	Fontenu	488	3850	45	230	1,64	289	0,96	2,5	330	6,5	150	12	9	0,4	40	10	8
Remoray	25	Largement	850	2990	27	95	1,65	569	0,97	3,5	170	8	110	20	12	0,3	28	25	10

- \* =après suppression des turbidites
- le  $^{210}\text{Pb}$  résiduel représente l'excès encore présent après la décroissance exponentielle

• **Annexe 2 :**  
Tableau de résultats des dosages  
des paramètres physico-chimiques  
dans les carottes de sédiments



• **Annexe 3 :**  
Tableau de résultats des  
dosages en micropolluants  
dans les carottes de sédiments

Element	Segment	Lac des 9 Couleurs	Lac d'Anterne	Lac de Châtel	Lac du Guet	Lac Nantua	Lac de Remoray	Lac du Veyran	Element	Segment	Lac des 9 Couleurs	Lac d'Anterne	Lac de Châtel	Lac du Guet
zinc	1	0,393	0,318	0,324	0,324	0,164	0,272	0,319	0,422	1,15	0,389	0,183	0,150	0,150
mgg	2	0,779	0,118	0,028	0,084	0,031	0,042	0,038	0,196	2	0,136	0,196	0,227	0,345
	3	0,083	0,014	0,023	0,165	0,025	0,041	0,038	0,205	3	0,136	0,174	0,213	0,350
	4	0,088	0,017	0,021	0,164	0,025	0,041	0,038	0,196	4	0,138	0,194	0,213	0,218
	5	0,080	0,014	0,021	0,120	0,012	0,134	0,011	0,052	5	0,142	0,181	0,198	0,167
	6	0,084	0,017	0,021	0,120	0,012	0,128	0,010	0,052	6	0,142	0,180	0,198	0,166
	7	0,083	0,020	0,020	0,118	0,010	0,110	0,010	0,059	7	0,136	0,169	0,176	0,206
	8	0,083	0,018	0,009	0,128	0,011	0,111	0,011	0,059	8	0,140	0,104	0,069	0,183
	9	0,080	0,021	0,009	0,085	0,009	0,061	0,011	0,054	9	0,140	0,045	0,049	0,088
	10	0,087	0,022	0,008	0,107	0,011	0,061	0,011	0,053	10	0,130	0,042	0,042	0,220
	11	0,082	0,024	0,009	0,126	0,016	0,088	0,011	0,059	11	0,132	0,118	0,052	0,194
	12	0,090	0,019	0,008	0,105	0,010	0,075	0,007	0,059	12	0,142	0,101	0,046	0,232
	13	0,088	0,022	0,009	0,128	0,017	0,074	0,012	0,056	13	0,133	0,100	0,046	0,188
	14	0,080	0,017	0,007	0,127	0,017	0,071	0,010	0,056	14	0,137	0,088	0,052	0,279
	15	0,075	0,017	0,010	0,110	0,010	0,060	0,006	0,056	15	0,140	0,091	0,065	0,191
	16	0,081	0,018	0,006	0,091	0,007	0,058	0,003	0,053	16	0,139	0,098	0,053	0,276
	17	0,080	0,015	0,006	0,095	0,008	0,058	0,008	0,053	17	0,138	0,087	0,053	0,233
	18	0,082	0,016	0,012	0,087	0,009	0,040	0,010	0,056	18	0,137	0,090	0,056	0,096
	19	0,087	0,015	0,005	0,071	0,014	0,034	0,007	0,051	19	0,144	0,087	0,053	0,084
	20	0,084	0,018	0,006	0,092	0,019	0,037	0,012	0,052	20	0,137	0,101	0,042	0,200
Chrome	1	0,009	0,005	0,043	0,054	0,008	0,040	0,018	0,018	1	0,047	0,017	0,019	0,082
mgg	2	0,008	0,006	0,050	0,070	0,010	0,055	0,017	0,017	2	0,041	0,027	0,027	0,082
	3	0,008	0,002	0,051	0,025	0,007	0,054	0,015	0,014	3	0,040	0,019	0,026	0,084
	4	0,008	0,005	0,048	0,038	0,004	0,050	0,017	0,015	4	0,037	0,026	0,026	0,089
	5	0,009	0,002	0,038	0,042	0,003	0,050	0,018	0,018	5	0,038	0,024	0,024	0,087
	6	0,008	0,004	0,041	0,039	0,003	0,048	0,016	0,018	6	0,038	0,024	0,046	0,084
	7	0,008	0,006	0,048	0,050	0,003	0,047	0,017	0,021	7	0,034	0,027	0,041	0,087
	8	0,012	0,004	0,035	0,045	0,003	0,033	0,015	0,020	8	0,049	0,023	0,034	0,087
	9	0,013	0,005	0,042	0,041	0,001	0,050	0,013	0,016	9	0,032	0,018	0,029	0,084
	10	0,007	0,006	0,042	0,056	0,003	0,054	0,013	0,017	10	0,063	0,046	0,032	0,109
	11	0,012	0,010	0,045	0,048	0,005	0,054	0,017	0,020	11	0,059	0,049	0,035	0,096
	12	0,013	0,006	0,044	0,042	0,005	0,051	0,014	0,016	12	0,062	0,039	0,028	0,098
	13	0,018	0,006	0,039	0,035	0,003	0,053	0,016	0,016	13	0,057	0,036	0,023	0,095
	14	0,013	0,007	0,031	0,034	0,003	0,046	0,014	0,020	14	0,050	0,035	0,023	0,094
	15	0,013	0,004	0,034	0,036	0,002	0,044	0,014	0,018	15	0,057	0,036	0,023	0,097
	16	0,012	0,010	0,034	0,036	0,002	0,044	0,014	0,020	16	0,051	0,036	0,023	0,097
	17	0,012	0,010	0,034	0,036	0,002	0,044	0,014	0,020	17	0,051	0,036	0,023	0,097
	18	0,012	0,010	0,034	0,036	0,002	0,044	0,014	0,020	18	0,051	0,036	0,023	0,097
	19	0,012	0,010	0,034	0,036	0,002	0,044	0,014	0,020	19	0,051	0,036	0,023	0,097
	20	0,011	0,010	0,032	0,036	0,001	0,047	0,014	0,020	20	0,057	0,037	0,023	0,097
Nicel	1	0,053	0,047	0,031	0,172	0,014	0,043	0,039	0,023	1	0,052	0,032	0,028	0,053
mgg	2	0,055	0,049	0,037	0,172	0,014	0,043	0,039	0,023	2	0,053	0,032	0,028	0,053
	3	0,053	0,039	0,032	0,129	0,013	0,032	0,039	0,023	3	0,053	0,032	0,028	0,053
	4	0,054	0,045	0,027	0,177	0,009	0,028	0,041	0,025	4	0,055	0,042	0,040	0,041
	5	0,054	0,040	0,022	0,201	0,008	0,028	0,035	0,021	5	0,059	0,040	0,042	0,042
	6	0,059	0,041	0,020	0,214	0,009	0,024	0,038	0,027	6	0,057	0,044	0,045	0,046
	7	0,059	0,041	0,020	0,202	0,017	0,028	0,039	0,027	7	0,051	0,031	0,027	0,041
	8	0,063	0,044	0,016	0,248	0,009	0,015	0,034	0,025	8	0,050	0,035	0,027	0,041
	9	0,062	0,042	0,016	0,202	0,007	0,023	0,027	0,023	9	0,058	0,042	0,042	0,042
	10	0,064	0,053	0,018	0,217	0,010	0,027	0,027	0,022	10	0,053	0,044	0,042	0,042
	11	0,059	0,025	0,028	0,226	0,008	0,031	0,049	0,025	11	0,045	0,053	0,066	0,066
	12	0,062	0,057	0,028	0,189	0,012	0,023	0,028	0,024	12	0,047	0,046	0,043	0,045
	13	0,062	0,051	0,020	0,230	0,010	0,027	0,032	0,023	13	0,042	0,045	0,055	0,055
	14	0,062	0,046	0,015	0,206	0,009	0,023	0,037	0,023	14	0,040	0,042	0,042	0,042
	15	0,064	0,046	0,028	0,179	0,017	0,027	0,036	0,029	15	0,046	0,043	0,043	0,043
	16	0,061	0,050	0,016	0,145	0,008	0,020	0,040	0,024	16	0,041	0,044	0,042	0,042
	17	0,060	0,044	0,017	0,159	0,009	0,024	0,034	0,024	17	0,045	0,042	0,040	0,040
	18	0,058	0,047	0,038	0,136	0,009	0,027	0,051	0,027	18	0,036	0,037	0,027	0,038
	19	0,061	0,042	0,019	0,107	0,008	0,028	0,030	0,023	19	0,036	0,036	0,026	0,036
	20	0,053	0,022	0,008	0,028	0,002	0,005	0,019	0,019	20	0,035	0,035	0,020	0,035
Cadmium	1	0,007	0,002	0,002	0,002	0,000	0,003	0,002	0,002	1	0,000	0,001	0,001	0,003
mgg	2	0,000	0,002	0,002	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	2	0,000	0,001	0,001	0,002
	3	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,007	0,000	0,007	3	0,001	0,001	0,001	0,009
	4	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,014	0,000	0,014	4	0,000	0,001	0,001	0,001
	5	0,000	0,003	0,002	0,001	0,000	0,001	0,005	0,001	5	0,001	0,001	0,001	0,001
	6	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	6	0,001	0,001	0,001	0,001
	7	0,000	0,003	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	7	0,000	0,001	0,001	0,001
	8	0,000	0,003	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	8	0,000	0,001	0,001	0,001
	9	0,000	0,003	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	9	0,000	0,001	0,001	0,001
	10	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	10	0,000	0,001	0,001	0,001
	11	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	11	0,000	0,001	0,001	0,001
	12	0,002	0,003	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	12	0,001	0,001	0,001	0,001
	13	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	13	0,001	0,001	0,001	0,001
	14	0,003	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	14	0,001	0,001	0,001	0,001
	15	0,005	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	15				

• **Annexe 4 :**  
Listes floristiques  
des peuplements  
diatomiques

## Listes floristiques des 20 lames du lac des 9 Couleurs (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

## Listes floristiques des 20 lames du lac des 9 Couleurs (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment

### Listes floristiques des 20 lames du lac des 9 Couleurs (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

### Listes floristiques des 20 lames du lac d'Anterne (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

### Listes floristiques des 20 lames du lac d'Anterne (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment

#### Listes floristiques des 20 lames du lac d'Anterne (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Chalain (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

GREBE

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Chalain (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments.

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Chalain (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

Listes floristiques des 20 lames du lac de Lauvitel (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments.

Code	Taxons	Lames																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ACHN	Achnanthes atlatica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABA	Achnanthes brasiliensis var bisiotelliana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Achnanthes brachysiphon var subatomus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABIO	Achnanthes borealis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACAH	Achnanthes boryi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACAL	Achnanthes calathoides	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACLE	Achnanthes var clevei	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACON	Achnanthes conspicua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACUR	Achnanthes curtissiana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADAO	Achnanthes denticulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADAU	Achnanthes daudi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADEL	Achnanthes delicatula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADDO	Achnanthes doddyi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AEXG	Achnanthes exigua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AFLF	Achnanthes flexella	131442	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGRL	Achnanthes gracilis	131442	926851	708561	4206140	1669569	3666553	1314428	5783442	3160305	789801	322032	322038	1314419	131445	659724	1056744	729268	1162977	1211530	1446460
AGHN	Achnanthes grisebachii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AHNL	Achnanthes helvetica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AHNN	Achnanthes hirsutissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AHUN	Achnanthes hungarica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AKRY	Achnanthes kryphialis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAN	Achnanthes levii	131442	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAE	Achnanthes lancolata	131442	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAE	Achnanthes lancolata var elliptica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALFT	Achnanthes lancolata var frequentissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALIM	Achnanthes limosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAR	Achnanthes lancolata var rostrata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAP	Achnanthes lapidosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALDN	Achnanthes lanuginosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAT	Achnanthes latostachys	131442	262884	525767	128455	263890	527779	1051535	0	262884	65972	257855	0	65972	65972	525767	131945	0	131945	0	0
ALBD	Achnanthes levieri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALIN	Achnanthes minima	10252465	1414421	1405721	26105140	886654	2610661	2710019	27350019	1261419	2525037	6056886	2440618	1450047	4700111	10567480	2004900	752651	1064771	1507702	1110558
AMAF	Achnanthes minissima var affine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AMAJ	Achnanthes minissima var jacki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADM	Achnanthes oblongula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADST	Achnanthes ostreopoda	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APET	Achnanthes petersonii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APLO	Achnanthes pinnatifida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APWA	Achnanthes pseudowatzkiae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APUS	Achnanthes pusilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACHN	Achnanthes rectirostris	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AROK	Achnanthes rostellaria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADCL	Achnanthes stellata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASAT	Achnanthes stroblioides	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASUC	Achnanthes suchlandii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACHN	Achnanthes suchlandii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATHU	Achnanthes thunbergii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AVEN	Achnanthes verna	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANTU	Achnanthus luculentus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AFOR	Asterionella formosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AULI	Aulacoseira longa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AAMB	Aulacoseira ambigua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AUCR	Aulacoseira crenulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AUDI	Aulacoseira dubia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AUGA	Aulacoseira granulata var angustissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGCU	Aulacoseira granulata var curvata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AUDS	Aulacoseira granulata var granulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BRCB	Bryocrypta crassula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BRCV	Bryocrypta crasseps	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBAC	Calones baculum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CLPD	Calones lepidula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CMOL	Calones mollis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CSHU	Calones schmidti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CCS	Caloceros pectinatus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CCDS	Caloceros scutellifer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CCOC	Caloceros cyclopterus	394326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDTG	Calotropis distinguis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COLA	Calotropis gabriellae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CRDM	Calotropis procera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CYLS	Calotropis cylindrica	0</																			

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Lauvitel (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment

Listes floristiques des 20 lames du lac de Lauvitel (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments.

Code	Taxons	Lames																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
NGPE	Navicula gallica var pepulosa	0	131442	0	0	128455	0	0	0	0	131442	0	131945	64684	131442	0	131945	0	65972	0	131945	262884
NGOT	Navicula gotlandica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NGRE	Navicula gregaria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NASP	Navicula apertissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NAJG	Navicula jagii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NLAE	Navicula laevissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NASB	Navicula subcrenulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NLVD	Navicula levanderi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NLEN	Navicula lenticula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NMEN	Navicula menisculus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NMUP	Navicula menisculus var upsaliensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NMIS	Navicula minuscula	0	0	0	0	525767	0	0	0	0	0	0	0	0	262884	0	0	0	0	0	0	0
NMMU	Navicula minuscula var murisia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NASP	Navicula pseudocrenulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NMMO	Navicula monostylata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NRSB	Navicula rotundata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSMM	Navicula schmassmanni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSCH	Navicula schoenfeldii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSEM	Navicula seminulum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSPR	Navicula subrotundata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSTR	Navicula stromeli	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSBN	Navicula subalpina	0	0	0	0	525767	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSBH	Navicula subhastata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSBM	Navicula subrotundata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSUC	Navicula subundulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSCP	Navicula tenuirostris	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTEN	Navicula tenellae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTNR	Navicula tenera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTPT	Navicula punctata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTCX	Navicula triangularis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTUS	Navicula fuscula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NVEN	Navicula veneta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTL	Navicula longirostris	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NVIR	Navicula viridis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NTVB	Navicula viburnum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NWPS	Navicula wiesneri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NASP	Navicula sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NEAF	Neidium affine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NALD	Neidium alpinum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NEBE	Neidium bergii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NEDU	Neidium dubium	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NEHC	Neidium hercynicum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NDAL	Neidium alatum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NAMP	Nitzschia amphibia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NZSS	Nitzschia ampulligera	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NAAN	Nitzschia angustata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NCPL	Nitzschia paleacea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NCOM	Nitzschia communis	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NDIS	Nitzschia dentifolia	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NDME	Nitzschia dissipata var media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NFLX	Nitzschia flexilobata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NFOM	Nitzschia fontinalis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NFR	Nitzschia frustulum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NHAN	Nitzschia hantzschiana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NCPO	Nitzschia punctata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NLNA	Nitzschia lacuum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NZLA	Nitzschia lanceolata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NUNL	Nitzschia linearis	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NULS	Nitzschia uliginosa var subtilis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPZM	Nitzschia pectinata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPML	Nitzschia paleacea	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPNS	Nitzschia pura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPNU	Nitzschia pulchella	131442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NPSE	Nitzschia sinuata var delignei	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSIN	Nitzschia sinuata var sinuata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NSIS	Nitzschia subtilis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NZSS	Nitzschia subulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PBRE	Pinnularia brevisetosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PBRA	Pinnularia brevisetosa var acuta	131442	0</td																			

### Listes floristiques des 20 lames du lac Nègre (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

Listes floristiques des 20 lames du lac Nègre (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments.

Codes	Taxons	Lames																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
DHIE	<i>Diatoma hyalinum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DMES	<i>Diatoma mesostigma</i>	1051535	0	0	0	0	0	0	0	0	527779	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1051535
DMDM	<i>Diatoma mediterraneum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DWUL	<i>Diatoma vulgaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DELL	<i>Diploneis elliptica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DMOD	<i>Diploneis modica</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DOLB	<i>Diploneis longirostris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DOVA	<i>Diploneis ovalis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DPAR	<i>Diploneis parma</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DPS	<i>Diploneis punctata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DPET	<i>Diploneis petersonii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DIPS	<i>Diploneis peterseni</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DSPO	<i>Diploneis subovalis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DRUE	<i>Diplolepis puella</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DSBO	<i>Diplolepis subovalis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DPS	<i>Diplolepis sp</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EARE	<i>Eleotrichia arenaria</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENAL	<i>Encyonema alpinum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENBY	<i>Encyonema brehmii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECAS	<i>Encyonema caspium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EGAE	<i>Encyonema gaudemani</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENGC	<i>Encyonema gracilis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema neoseptentri</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema neoseptentri</i>	9463814	1051535	15707323	10351535	3036505	0	14368009	2000777	3109574	3002000	3086009	6303009	6303009	6303009	6303009	6303009	73074744	1027636	4206140	
ENNG	<i>Encyonema neogracilis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema neoseptentri</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENOA	<i>Encyonema obsoletum var. alpinum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema obsoletum var. alpina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENPE	<i>Encyonema perpusillum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENRE	<i>Encyonema rotundatum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema rostratum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema subgracile</i>	1051535	1051535	1051535	1051535	1051535	0	2005273	2005273	62009	211116	16052482	70074744	2103070	2103070	2103070	2103070	2103070	2103070	1051535	
ENVF	<i>Encyonema ventricosum</i>	8412279	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EVOL	<i>Encyonema vulgaris</i>	1051535	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonema vulgaris</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECAL	<i>Encyonopsis alpina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECES	<i>Encyonopsis cesalpina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ECKR	<i>Encyonopsis crassicornis</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENCM	<i>Encyonopsis microcephala</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EGRO	<i>Encyonopsis robusta</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESUM	<i>Encyonopsis subminuta</i>	7307044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENSP	<i>Encyonopsis thunbergii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EOMI	<i>Emilia minima</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EADM	<i>Emilia adnata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EADM	<i>Emilia minima</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESOR	<i>Emilia sororia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETGR	<i>Epithemis turgida var granulata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EARC	<i>Eurosta arcuata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EDBI	<i>Eurosta bicarinata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EDMI	<i>Eurosta diodon</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EEXI	<i>Eurosta exigua</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EVAF	<i>Eurosta varifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EVAF	<i>Eurosta varifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FACM	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FCAP	<i>Fragaria caprifolia</i>	2103070	8412279	1034148	1034148	5704907	0	1055588	2005273	527779	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FCPH	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOFE	<i>Fragaria caprifolia</i>	0																			

### Listes floristiques des 20 lames du lac Nègre (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Remoray (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Remoray (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment.

#### Listes floristiques des 20 lames du lac de Remoray (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Vallon (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Vallon (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment

#### Listes floristiques des 20 lames du lac de Vallon (3/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments

Listes floristiques des 20 lames du lac de Vens 1er (1/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiments.

Code	Taxons	Lames																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AICH	Achnanthes afflata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABA	Achnanthes brasiliensis var. bissoletiana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Achnanthes brachysiphon var subatomus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABIO	Achnanthes biorelli	0	0	262884	0	0	262884	770727	1314419	513818	0	0	513818	1051535	263890	0	0	0	0	262884	262884
AALC	Achnanthes calata	256909	131442	525767	262884	1051535	262884	256909	0	0	262884	0	0	513818	0	0	0	0	128927	0	262884
AGLE	Achnanthes var clevei	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACON	Achnanthes conspicua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACUR	Achnanthes curtissiana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADAO	Achnanthes daudinii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADAU	Achnanthes dasii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADEL	Achnanthes deliciata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AEXG	Achnanthes exigua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AFLF	Achnanthes flexella var flexella	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	262884
AICH	Achnanthes grisebachii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AHEL	Achnanthes helvetica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AHIN	Achnanthes hirsuta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AKRY	Achnanthes kryphialis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALVN	Achnanthes levii	770727	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1314419
ALAN	Achnanthes lanuginosus	256909	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAE	Achnanthes lancolata var elliptica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALFT	Achnanthes lancolata var frequentissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALIM	Achnanthes lancolata var imitans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAR	Achnanthes lancolata var rostrata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAP	Achnanthes lapidosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADHN	Achnanthes leptostoma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALAT	Achnanthes laterostachys	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ALVD	Achnanthes levieri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AMIN	Achnanthes minima	350518	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AMAF	Achnanthes minissima var affine	0	0	262884	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AMAH	Achnanthes minissima var jackii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AMAE	Achnanthes oblongula	256909	0	0	262884	262884	525767	0	788051	256909	0	0	1577302	0	0	262884	0	0	128927	0	525767
APET	Achnanthes petriana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APLO	Achnanthes ploemensis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APRS	Achnanthes pseudowatzkiae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APWS	Achnanthes pusilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADHN	Achnanthes rostellata	256909	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADOL	Achnanthes reichensteini	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASAT	Achnanthes rostellata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASJC	Achnanthes subchondri	0	0	262884	131442	262884	262884	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AICH	Achnanthes undulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATRI	Achnanthes variabilis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AZIE	Achnanthes ziegleri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AICH	Achnanthes sp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANMH	Achnanthes tenuissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AROK	Achnanthes rostellata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ADOL	Achnanthes rostellata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASAT	Achnanthes rostellata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASJC	Achnanthes subchondri	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AVOA	Achnanthes granulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
APED	Achnanthes pediculus	256909	262884	1840186	2760279	1577302	1840186	798364	236953	1027636	3154605	1577302	3082909	4206140	2375008	1051535	791669	3268047	1160346	2891721	3154605
ATHU	Achnanthes thunbergii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AVEN	Achnanthes venusta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANTU	Ancistrus luscus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AFOR	Ancistrion formosum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AJAL	Ancistrion elongatum	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AAIB	Amphora lyngbyae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora ovalis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora pediculus	256909	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora pinnula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora punctulata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora quadrata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora rathbuni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora rotundata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilissima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABSI	Amphora subtilissima	0	0	0	0</td																

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Vens 1er (2/3)

Les abondances sont en individus par g de sédiment

### Listes floristiques des 20 lames du lac de Vens 1er (3/3)

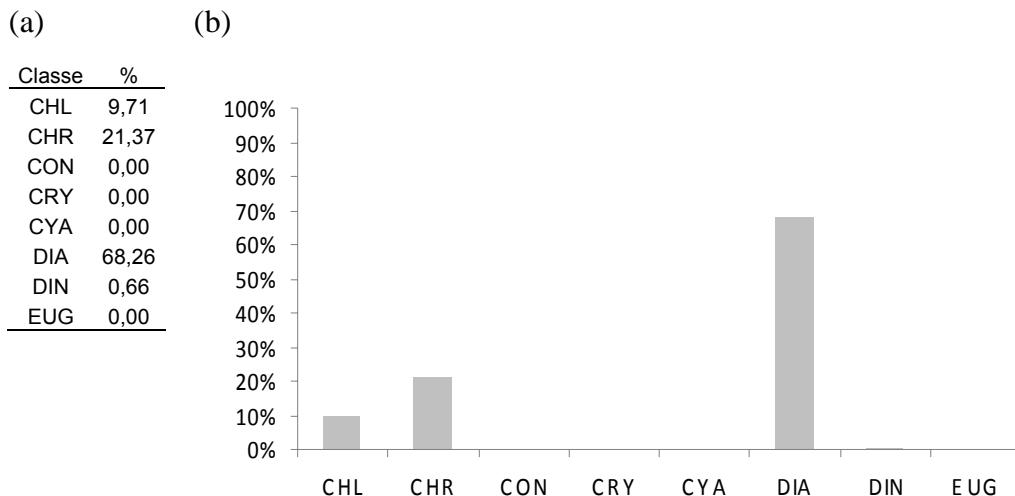
Les abondances sont en individus par g de sédiments

• **Annexe 5 :**  
Listes floristiques  
des peuplements  
phytoplanctoniques

## Peuplement phytoplanctonique du lac des 9 Couleurs.

Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac des 9 Couleurs. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	<i>Chlorella vulgaris</i>	166,8	9,70
CHL	<i>Hyaloraphidium contortum</i>	0,1	0,01
CHR	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>americanum</i>	14,1	0,82
CHR	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>stipitatum</i>	17,0	0,99
CHR	<i>Erkenia subaequiciliata</i>	36,8	2,14
CHR	<i>Kephryion</i> sp	299,7	17,43
DIA	<i>Achnanthes minutissima</i>	5,7	0,33
DIA	<i>Amphora ovalis</i>	0,1	0,01
DIA	<i>Aulacoseira</i> sp	0,1	0,01
DIA	<i>Cyclotella cyclopunctata</i>	1150,8	66,91
DIA	<i>Diploneis elliptica</i>	0,1	0,01
DIA	<i>Fragilaria parasitica</i>	0,1	0,01
DIA	<i>Fragilaria ulna</i> var. <i>acus</i>	8,5	0,49
DIA	<i>Navicula</i> sp	2,8	0,16
DIA	<i>Sellaphora pupula</i>	5,7	0,33
DIN	<i>Gymnodinium helveticum</i>	11,3	0,66
Total		1719,8	100,0

## Peuplement phytoplanctonique du lac d'Anterne.

Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac d'Anterne. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

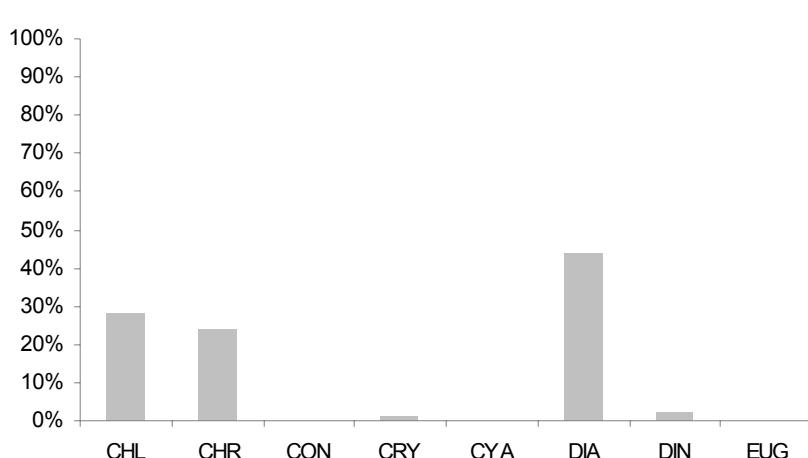
(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

A noter que sur le lac d'Anterne, le nombre d'individus dénombrés était inférieur à 400.

(a)

Classe	%
CHL	28,49
CHR	24,11
CON	0,00
CRY	1,10
CYA	0,05
DIA	44,00
DIN	2,25
EUG	0,00

(b)



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	<i>Chlorella vulgaris</i>	73,5	28,49
CHR	<i>Dinobryon cylindricum</i>	2,8	1,10
CHR	<i>Erkenia subaequiciliata</i>	43,8	16,99
CHR	<i>Kephyrion sp</i>	15,6	6,03
CRY	<i>Rhodomonas minuta var.nannoplanctonica</i>	2,8	1,10
CYA	<i>Merismopedia glauca</i>	0,1	0,05
DIA	<i>Achnanthes minutissima</i>	9,9	3,84
DIA	<i>Aneumastus stroesei</i>	0,1	0,05
DIA	<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	76,3	29,59
DIA	<i>Cymbella laevis</i>	0,1	0,05
DIA	<i>Cymbella sp</i>	11,3	4,38
DIA	<i>Diploneis oblongella</i>	4,2	1,64
DIA	<i>Fragilaria construens</i>	1,4	0,55
DIA	<i>Fragilaria ulna</i>	0,1	0,05
DIA	<i>Fragilaria ulna var.acus</i>	8,5	3,29
DIA	<i>Navicula sp</i>	1,4	0,55
DIN	<i>Gymnodinium helveticum</i>	1,4	0,55
DIN	<i>Katodinium fongiforme</i>	4,2	1,64
DIN	<i>Peridinium willei</i>	0,1	0,05
		Total	258,0 100,0

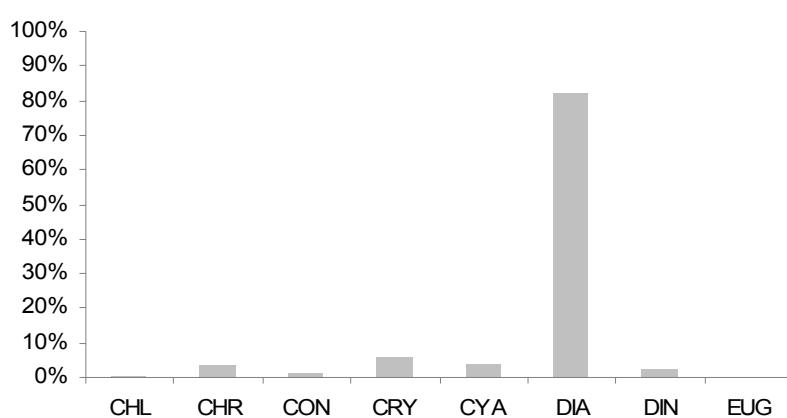
## Peuplement phytoplanctonique du lac de Chalain.

Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac de Chalain. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

(a) (b)

Classe	%
CHL	0,84
CHR	3,66
CON	1,17
CRY	5,65
CYA	4,32
DIA	82,05
DIN	2,32
EUG	0,00



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%	Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	<i>Elakatothrix gelatinosa</i>	0,1	0,00	DIA	<i>Diatoma tenuis</i>	0,1	0,00
CHL	<i>Monoraphidium kormakovae</i>	28,3	0,83	DIA	<i>Diploneis ovalis</i>	0,1	0,00
CHL	<i>Phacotus lenderii</i>	0,1	0,00	DIA	<i>Encyonopsis sp</i>	5,7	0,17
CHR	<i>Bitrichia chodatii</i>	67,9	1,99	DIA	<i>Eunotia arcus</i>	0,7	0,02
CHR	<i>Dinobryon divergens</i>	5,7	0,17	DIA	<i>Fragilaria arcus</i>	0,1	0,00
CHR	<i>Dinobryon elegantissima</i>	0,1	0,00	DIA	<i>Fragilaria banana</i>	0,1	0,00
CHR	<i>Erkenia sub</i>	11,3	0,33	DIA	<i>Fragilaria ulna var.angustissima</i>	0,1	0,00
CHR	<i>Kephyriion sp</i>	28,3	0,83	DIA	<i>Gomphonema sp</i>	0,1	0,00
CHR	<i>Ochromonas sp</i>	11,3	0,33	DIA	<i>Gyrosigma sp</i>	0,1	0,00
CON	<i>Closterium acutum var. variable</i>	39,6	1,16	DIA	<i>Navicula sp</i>	11,3	0,33
CON	<i>Cosmarium tenue</i>	0,1	0,00	DIA	<i>Sellaphora pupula</i>	0,1	0,00
CON	<i>Mougeotia gracillima</i>	0,0	0,00	DIN	<i>Ceratium hirundinella</i>	28,3	0,83
CRY	<i>Cryptomonas rostriformis</i>	0,1	0,00	DIN	<i>Gymnodinium lantzschii</i>	22,6	0,66
CRY	<i>Cryptomonas sp</i>	11,3	0,33	DIN	<i>Katodinium fongiforme</i>	5,7	0,17
CRY	<i>Rhodomonas minuta var.nannoplanktonica</i>	181,0	5,31	DIN	<i>Peridinium umbonatum</i>	17,0	0,50
CYA	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	135,7	3,98	DIN	<i>Peridinium willei</i>	5,7	0,17
CYA	<i>Rhabdoderma lineare</i>	11,3	0,33				
DIA	<i>Achnanthes minutissima</i>	17,0	0,50				
DIA	<i>Amphora sp</i>	5,7	0,17				
DIA	<i>Aulacoseira islandica</i>	5,7	0,17				
DIA	<i>Cyclotella bodanica</i>	5,7	0,17				
DIA	<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	2731,3	80,16				
DIA	<i>Cyclotella sp</i>	11,3	0,33				
DIA	<i>Cymbella sp</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Cymbopleura lata</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Cymbopleura similiformis</i>	0,1	0,00				

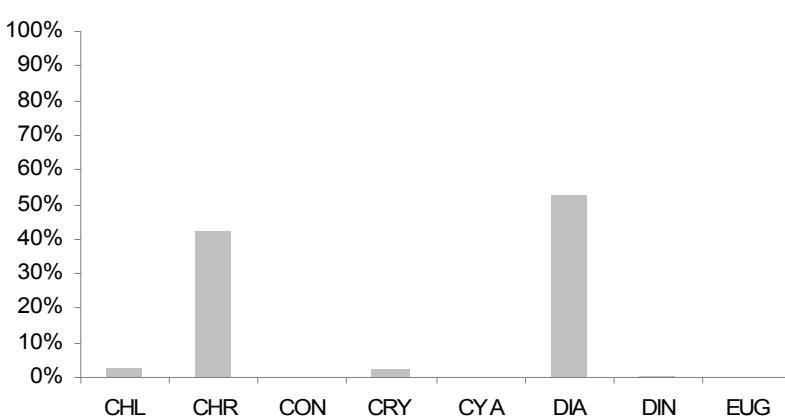
## Peuplement phytoplanctonique du lac de Lauvitel.

Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac de Lauvitel. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

(a) (b)

Classe	%
CHL	2,99
CHR	42,14
CON	0,00
CRY	2,14
CYA	0,02
DIA	52,39
DIN	0,33
EUG	0,00



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%	Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	Chlorella vulgaris	11,3	0,66	DIA	Fragilaria arcus	11,3	0,66
CHL	Chlorophycées indeterminées	0,1	0,01	DIA	Fragilaria sp	0,1	0,01
CHL	Elakatothrix gelatinosa	0,1	0,01	DIA	Fragilaria ulna var.acus	234,7	13,66
CHL	Flagellées sp	36,8	2,14	DIA	Fragilaria ulna var.angustissima	0,1	0,01
CHL	Stichogloea globosa	2,8	0,16	DIA	Gomphonema minutum	11,3	0,66
CHL	Trochiscia aciculifera	0,1	0,01	DIA	Navicula sp	2,8	0,16
CHR	Bitrichia chodatii	5,7	0,33	DIA	Nitzschia acicularis	2,8	0,16
CHR	Chrysolykos planctonicus	2,8	0,16	DIA	Nitzschia palea	2,8	0,16
CHR	Dinobryon divergens	2,8	0,16	DIA	Nitzschia sp	0,1	0,01
CHR	Dinobryon sociale var.amERICANUM	0,1	0,01	DIA	Pinnularia viridis	0,1	0,01
CHR	Erkenia subaequiciliata	393,0	22,88	DIA	Sellaphora pupula	2,8	0,16
CHR	Kephryion sp	268,6	15,64	DIN	Katodinium fongiforme	2,8	0,16
CHR	Kephryion spirale	5,7	0,33	DIN	Peridinium umbonatum	2,8	0,16
CHR	Mallomonas sp	8,5	0,49				
CHR	Ochromonas sp	36,8	2,14				
CRY	Cryptomonas rostratiformis	5,7	0,33				
CRY	Rhodomonas minuta var.nannoplanktonica	31,1	1,81				
CYA	Aphanocapsa musicola	0,1	0,01				
CYA	Pseudanabaena limnetica	0,1	0,01				
DIA	Achnanthes minutissima	67,9	3,95				
DIA	Amphora sp	0,1	0,01				
DIA	Caloneis sp	0,1	0,01				
DIA	<b>Cyclotella cyclopunctata</b>	<b>415,6</b>	<b>24,19</b>				
DIA	Cyclotella sp	138,5	8,06				
DIA	Cymbella sp	2,8	0,16				
DIA	Denticula kuetzingii	2,8	0,16				
DIA	Diatoma mesodon	2,8	0,16				
				Total		1718,0	100,0

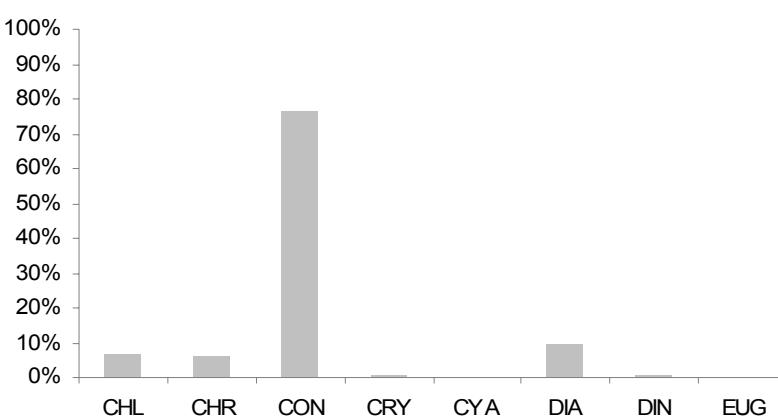
## Peuplement phytoplanctonique du lac Nègre.

Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac Nègre. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

(a) (b)

Classe	%
CHL	6,92
CHR	6,20
CON	76,73
CRY	0,35
CYA	0,00
DIA	9,43
DIN	0,36
EUG	0,00



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%	Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	Chlorella vulgaris	141,4	4,43	DIA	Pinnularia gibba	0,1	0,00
CHL	Choricystis minor	67,9	2,13	DIA	Pinnularia lundii	0,1	0,00
CHL	Hyaloraphidium contortum	5,7	0,18	DIA	Pinnularia septentrionalis	0,1	0,00
CHL	Pseudanabaena limnetica	0,1	0,00	DIA	Tabellaria ventricosa	0,1	0,00
CHL	Radiococcus nimbatus	0,1	0,00	DIN	Katodinium fongiforme	5,7	0,18
CHL	Sphaerocystis schroeteri	5,7	0,18	DIN	Peridinium cunningtonii	5,7	0,18
CHR	Dinobryon cylindricum	147,0	4,61	DIN	Peridinium willei	0,1	0,00
CHR	Dinobryon sociale var.americana	22,6	0,71			Total	3191,3 100,0
CHR	Mallomonas sp	5,7	0,18				
CHR	Ochromonas sp	22,6	0,71				
CON	<b>Spondylosium pygmaeum</b>	<b>2448,6</b>	<b>76,73</b>				
CON	Staurastrum cingulum	0,1	0,00				
CON	Staurastrum sp	0,1	0,00				
CRY	Cryptomonas sp	11,3	0,35				
DIA	Achnanthes minutissima	39,6	1,24				
DIA	Amphora pediculus	5,7	0,18				
DIA	Cyclotella bodanica	5,7	0,18				
DIA	Cyclotella cyclopunctata	28,3	0,89				
DIA	Cymbella excisiformis	0,1	0,00				
DIA	Diatoma mesodon	0,1	0,00				
DIA	Fragilaria construens	5,7	0,18				
DIA	Fragilaria lapponica	5,7	0,18				
DIA	Fragilaria lata	0,1	0,00				
DIA	Fragilaria ulna	0,1	0,00				
DIA	Fragilaria ulna var.acus	203,6	6,38				
DIA	Navicula sp	5,7	0,18				
DIA	Nitzschia palea	0,1	0,00				

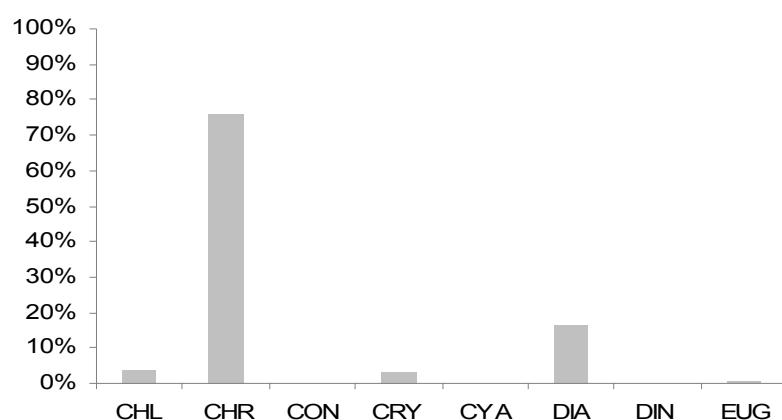
## Peuplement phytoplanctonique du lac de Remoray.

Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac de Remoray. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

(a) (b)

Classe	%
CHL	3,63
CHR	76,08
CON	0,00
CRY	3,12
CYA	0,14
DIA	16,51
DIN	0,13
EUG	0,37



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%	Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	Chlorella vulgaris	101,8	2,25	DIA	Amphora sp	0,1	0,00
CHL	Elakatothrix gelatinosa	0,1	0,00	DIA	Asterionella formosa	118,8	2,62
CHL	Flagellées sp	39,6	0,87	DIA	Aulacoseira islandica	17,0	0,37
CHL	Monoraphidium kormakovae	5,7	0,12	DIA	Cyclotella bodanica	0,1	0,00
CHL	Oocystis lacustris	5,7	0,12	DIA	Cyclotella cyclopunctata	181,0	4,00
CHL	Planctococcus sphaerocystiformis	5,7	0,12	DIA	Cymbella sp	5,7	0,12
CHL	Scenedesmus ecornis	0,1	0,00	DIA	Cymbella subhelvetica	11,3	0,25
CHL	Tetracliorella alternans	0,1	0,00	DIA	Cymbopleura amphicephala	11,3	0,25
CHL	Tetraedron triangulare	5,7	0,12	DIA	Denticula tenuis	5,7	0,12
CHR	Dinobryon bavaricum	554,2	12,24	DIA	Diploneis ovalis	0,1	0,00
CHR	<b>Dinobryon divergens</b>	<b>2810,5</b>	<b>62,09</b>	DIA	Encyonopsis sp	5,7	0,12
CHR	Dinobryon elegantissima	5,7	0,12	DIA	Fragilaria capucina	50,9	1,12
CHR	Kephryion sp	33,9	0,75	DIA	Fragilaria construens f. binodis	0,1	0,00
CHR	Mallomonas sp	11,3	0,25	DIA	Fragilaria crotonensis	277,1	6,12
CHR	Ochromonas sp	28,3	0,62	DIA	Navicula sp	5,7	0,12
CON	Mougeotia gracillima	0,1	0,00	DIA	Nitzschia sp	0,1	0,00
CRY	Cryptomonas rostratiformis	17,0	0,37	DIN	Ceratium hirundinella	0,1	0,00
CRY	Cryptomonas sp	17,0	0,37	DIN	Gymnodinium helveticum	0,1	0,00
CRY	Rhodomonas minuta	22,6	0,50	DIN	Gymnodinium sp	5,7	0,12
CRY	Rhodomonas minuta var. nannoplanktonica	84,8	1,87	DIN	Peridinium wellei	0,1	0,00
CYA	Anabaena circinalis	0,1	0,00	EUG	Trachelomonas volvocina	17,0	0,37
CYA	Aphanothece minutissima	5,7	0,12				
CYA	Chroococcus minutus	0,1	0,00				
CYA	Eucapsis minor	0,1	0,00				
CYA	Planktothrix rubescens	0,1	0,00				
CYA	Pseudanabaena arcuata	0,1	0,00				
DIA	Achnanthes minutissima	56,5	1,25				
				Total		4526,3	100,0

## Peuplement phytoplanctonique du lac du Vallon.

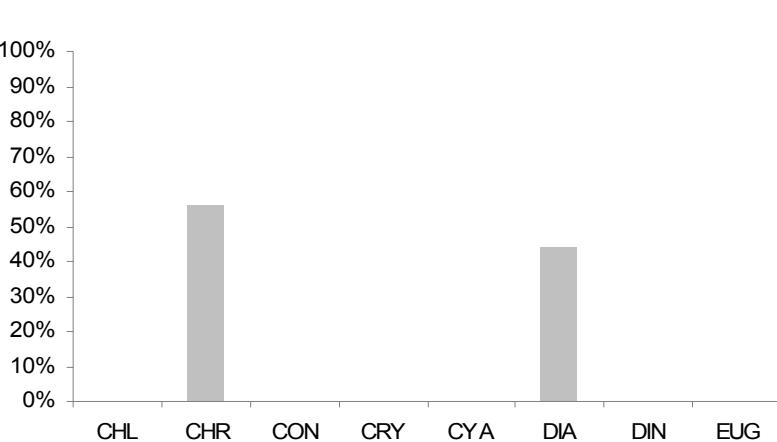
Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac du Vallon. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae.

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

(a)

Classe	%
CHL	0,00
CHR	55,74
CON	0,00
CRY	0,00
CYA	0,01
DIA	44,25
DIN	0,00
EUG	0,00

(b)



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHR	<i>Dinobryon cylindricum</i>	729,5	53,07
CHR	<i>Erkenia subaequiciliata</i>	36,8	2,67
CYA	<i>Merismopedia glauca</i>	0,1	0,01
DIA	<i>Achnanthes minutissima</i>	25,4	1,85
DIA	<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	118,8	8,64
DIA	<i>Cymbella sp</i>	11,3	0,82
DIA	<i>Fragilaria arcus</i>	8,5	0,62
DIA	<i>Fragilaria construens</i>	0,1	0,01
DIA	<i>Fragilaria ulna var. acus</i>	435,4	31,68
DIA	<i>Nitzschia acicularis</i>	5,7	0,41
DIA	<i>Nitzschia dissipata</i>	0,1	0,01
DIA	<i>Sellaphora pupula</i>	2,8	0,21
Total		1374,6	100,0

## Peuplement phytoplanctonique du lac de Vens 1<sup>er</sup>.

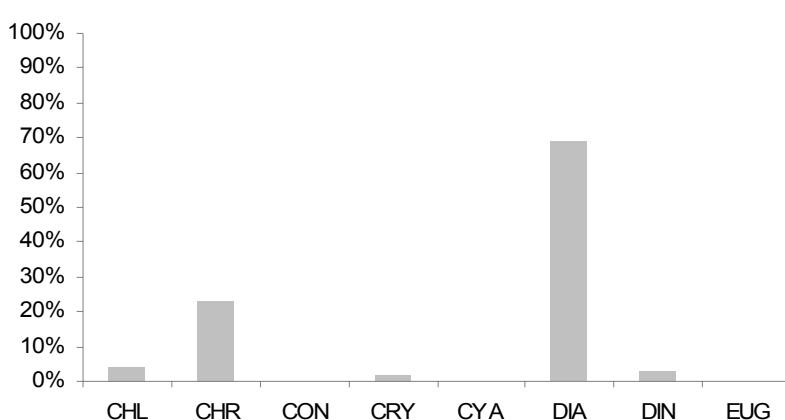
Analyse du peuplement phytoplanctonique de pleine eau intégrant la zone euphotique du lac du Vallon. Les abondances sont données au niveau spécifique et à la classe. CHL : Chlorophyceae ; CHR : Chrysophyceae ; CON : Conjuguées ; CRY : Cryptophyceae ; CYA : Cyanophyceae ; Diatomophyceae ; DIN : Dinophyceae ; EUG : Euglenophyceae..

(a) Résumé de la liste floristique à la classe. (b) Graphique représentant les abondances relatives des classes de phytoplancton. (c) Liste floristique. En rouge, le taxon dominant.

(a)

Classe	%
CHL	3,88
CHR	22,90
CON	0,00
CRY	1,55
CYA	0,00
DIA	68,95
DIN	2,72
EUG	0,00

(b)



(c)

Classe	Taxons	Cellules/mL	%	Classe	Taxons	Cellules/mL	%
CHL	Chlorella vulgaris	96,1	3,30	DIA	<i>Fragilaria ulna</i> var. <i>acus</i>	1283,7	44,06
CHL	Elakothrix gelatinosa	11,3	0,39	DIA	<i>Gomphonema minutum</i>	5,7	0,19
CHL	<i>Hyaloraphidium contortum</i>	5,7	0,19	DIA	<i>Navicula radiosa</i>	0,1	0,00
CHR	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>stipitatum</i>	17,0	0,58	DIA	<i>Nitzschia dissipata</i>	5,7	0,19
CHR	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>americanum</i>	50,9	1,75	DIA	<i>Sellaphora pupula</i>	0,1	0,00
CHR	<i>Erkenia subaequiciliata</i>	22,6	0,78	DIA	<i>Surirella</i> sp	0,1	0,00
CHR	<i>Kephryion mastigophorum</i>	186,6	6,40	DIN	<i>Gymnodinium helveticum</i>	62,2	2,13
CHR	<i>Kephryion</i> sp	271,4	9,32	DIN	<i>Katodinium fongiforme</i>	11,3	0,39
CHR	<i>Ochromonas</i> sp	118,8	4,08	DIN	<i>Peridinium</i> sp	5,7	0,19
CRY	<i>Cryptomonas</i> sp	5,7	0,19				
CRY	<i>Rhodomonas minuta</i> var. <i>nannoplanktonica</i>	39,6	1,36			Total	2913,5 100,0
DIA	<i>Achnanthes delicatula</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Achnanthes minutissima</i>	152,7	5,24				
DIA	<i>Aneumastus stroesei</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Asterionella formosa</i>	67,9	2,33				
DIA	<i>Aulacoseira</i> sp	0,1	0,00				
DIA	<i>Cyclotella bodanica</i>	5,7	0,19				
DIA	<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	429,8	14,75				
DIA	<i>Cyclotella radiosa</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Cymbella</i> sp	5,7	0,19				
DIA	<i>Diatoma mesodon</i>	11,3	0,39				
DIA	<i>Diploneis oblongella</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Epithemia smithii</i>	0,1	0,00				
DIA	<i>Fragilaria arcus</i>	5,7	0,19				
DIA	<i>Fragilaria construens</i>	22,6	0,78				
DIA	<i>Fragilaria ulna</i>	11,3	0,39				